



**CHALMERS**

# **Materialkrav för komponenter i förbränningsmotorer för vätgas**

Kandidatarbete

DELER ABDA  
JOEL ANDERSSON  
SVANTE ANDERSSON  
HUGO KÅHRE  
HENRIK JÖNSSON  
MELKER TORSLÉN

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2023  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

KANDIDATARBETE 2023

# Materialkrav för komponenter i förbränningsmotorer för vätgas

En litteraturstudie om hur väte påverkar vanligt förekommande  
material i förbränningsmotorer

DELER ABDA  
JOEL ANDERSSON  
SVANTE ANDERSSON  
HUGO KÅHRE  
HENRIK JÖNSSON  
MELKER TORSLÉN



**CHALMERS**

Institutionen för industri- och materialvetenskap  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2023

Materialkrav för komponenter i förbränningsmotorer för vätgas

- © DELER ABDA, 2023.
- © JOEL ANDERSSON, 2023.
- © SVANTE ANDERSSON, 2023.
- © HUGO KÅHRE, 2023.
- © HENRIK JÖNSSON, 2023.
- © MELKER TORSLÉN, 2023.

Handledare: Mats Norell & Emmy Yu Cao, Industri- och materialvetenskap  
Examinator: Lars Nyborg, Industri- och materialvetenskap

IMSX16-VT23-10  
Kandidatarbete 2023  
Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

## Sammandrag

På grund av den rådande klimatkrisen undersöks vätgas som bränsle i förbränningsmotorer. Vätgas har potentialen att vara ett miljövänligt bränsle då det kan framställas med förnybar el samt inte släpper ut någon koldioxid vid förbränning. Ett problem med väte är att det försprödar många metaller och därmed potentiellt begränsar vilka material en vätgasmotor kan konstrueras av. Syftet med studien är att undersöka hur väte kan påverka material och komponenter i vätgasdrivna förbränningsmotorer. Väteförsprödning uppstår genom olika mekanismer och dessa mekanismer undersöktes närmare under projektet. Detta leder generellt till bland annat minskad duktilitet och utmattningsgräns hos materialen. Väte diffunderar och försprödar BCC-metaller mer än FCC-metaller. Vidare undersöktes olika typer av kolvmotorer med intern förbränning för att se vilken motortyp som är mest lämpad för att drivas med vätgas. Detta för att avgöra vilka komponenter som är mest relevanta att studera. Gnistantändning visade sig vara fördelaktigt då väte kräver betydligt högre kompression än vad som normalt sett används idag för kompressionsantändning. Påverkan av väte på de legeringar som oftast används i konventionella förbränningsmotorer studerades. Höghållfasta stål tenderar att försprödas i högre utsträckning än exempelvis aluminium och austenitiska rostfria stål. Dock finns stora variationer mellan legeringar inom legeringsgrupper. Sist undersöktes de komponenter som kommer i kontakt med väte och vilka krav de utsätts för samt vilka legeringar de vanligen består av. Det kunde inte fastställas exakt hur olika komponenter kommer att påverkas av vätgas gällande utmattning och livslängd. För att undersöka detta krävs experiment i vätgasmotorer under en längre tid. En slutsats är att komponenter som är närmast förbränningskammaren är kritiska att studera vidare, dels för att det är där som några av de högsta halterna av vätgas finns, samt för att dessa komponenterna utsätts för några av de högsta spänningarna och den högsta temperaturen.

## Abstract

Because of the current climate crisis hydrogen gas is investigated as a fuel for internal combustion engines. Hydrogen gas has the potential to be an environmentally friendly fuel since it can be produced with renewable electricity and it does not release carbon dioxide during combustion. One problem with hydrogen is that it embrittles many metals and thus potentially limits the material selection that could be used to construct a hydrogen powered engine. The purpose of the study is to investigate how hydrogen can affect materials and components in hydrogen powered internal combustion engines. Hydrogen embrittlement can be attributed to several mechanisms, these mechanisms are more thoroughly described during this project. This generally leads to for instance reduced ductility and fatigue limit for the affected materials. Different crystal structures have different susceptibility to this effect, for instance hydrogen diffusion is higher in BCC metals and BCC metals are embrittled to a greater extent compared to FCC metals. Different types of piston engines with internal combustion was further investigated to determine what engine type is more suited to being powered by hydrogen gas. This was done in order to determine components which are more relevant to study further. Spark ignition was perceived to be advantageous since hydrogen gas requires significantly higher compression than is currently used in compression ignition engines. The effect of hydrogen on the alloys most commonly used in conventional internal combustion engines was studied. High strength steel, in general, embrittles to a higher extent compared to, for instance, aluminium and austenitic stainless steels. However, the variation is large even between different alloys within the same alloy group. Finally, components with direct exposure to hydrogen were studied as well as their requirements and which alloys they usually consist of. Exactly how fatigue limit and service life for different components would be affected could not be determined. Investigating this would require experiments with hydrogen powered engines for long periods of time. A conclusion is that components in proximity to the combustion chamber are critical to study further, partially because of the high concentrations of hydrogen and partially because of the high mechanical and thermal stresses.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	2
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Precisering av frågeställningen . . . . .	3
1.4	Metod . . . . .	3
1.5	Avgränsningar . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Vätets påverkan på metaller</b>	<b>5</b>
2.1	Väteförsprödning . . . . .	6
2.1.1	Intern väteförsprödning . . . . .	7
2.1.1.1	Väteinducerade blåsor . . . . .	7
2.1.1.2	Sprickbildning från väteutfällning . . . . .	7
2.1.1.3	Reversibel väteförsprödning . . . . .	8
2.1.2	Vät miljöförsprödning . . . . .	8
2.1.3	Vätreaktionsförsprödning . . . . .	9
2.1.3.1	Väteattack . . . . .	9
2.1.3.2	Hydridbildning . . . . .	9
2.2	Vätets påverkan på korrosionsmekanismer . . . . .	10
2.2.1	Vätets påverkan på sammansättningen och strukturen av passivskiktet i stål . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Motortyper och komponenter</b>	<b>12</b>
3.1	Olika motortyper . . . . .	17
3.1.1	Tvåtaktsmotorer . . . . .	17
3.1.2	Fyrtaktsmotorer . . . . .	17
3.1.3	Extern bränsleblandning . . . . .	18
3.1.4	Intern bränsleblandning . . . . .	18
3.1.5	Indirekt bränsleinjektion . . . . .	19
3.1.6	Direkt bränsleinjektion . . . . .	19
3.1.7	Gnistantändning . . . . .	19
3.1.8	Kompressionsantändning . . . . .	20
3.2	Hur väte förhåller sig till de olika motortyperna . . . . .	21
3.3	Vätebärare . . . . .	22
3.3.1	Ammoniak . . . . .	23
3.3.2	Organiska vätebärare . . . . .	23
3.3.3	Metalliska vätebärare . . . . .	23

3.3.4	Vätebärare till förbränningsmotorer . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Hur väte påverkar komponenternas material</b>	<b>24</b>
4.1	Gjutjärn . . . . .	24
4.2	Stållegeringar . . . . .	25
4.2.1	Martensitiska höghållfasta stål . . . . .	27
4.2.2	Rostfria stål . . . . .	27
4.3	Nickellegeringar . . . . .	28
4.4	Aluminiumlegeringar . . . . .	29
4.5	Kopparlegeringar . . . . .	30
4.6	Magnesiumlegeringar . . . . .	31
4.7	Titanlegeringar . . . . .	33
4.8	Andra potentiella material . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Sammanställning och diskussion om komponenter, material och krav</b>	<b>36</b>
5.1	Komponenter . . . . .	36
5.1.1	Cylinder . . . . .	37
5.1.2	Topplöck . . . . .	37
5.1.3	Kolv . . . . .	38
5.1.4	Kolvringar . . . . .	40
5.1.5	Ventiler . . . . .	40
5.1.6	Bränsleledning . . . . .	41
5.1.7	Avgassystem . . . . .	41
5.1.8	Turbo . . . . .	42
5.2	Allmän diskussion . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>45</b>
	<b>Källhänvisning</b>	<b>46</b>

# 1

## Inledning

Jordens temperatur ökar i stadig takt och klimatutmaningarna blir allt mer påtagliga (Shine, 2022). Sverige, tillsammans med övriga länder som skrivit på Parisavtalet, har enats om att den globala uppvärmningen måste hanteras så snabbt som möjligt. Stora satsningar har lagts på att subventionera hållbara energikällor och elfordon vilket har gett stort utslag. Mellan åren 2012 och 2021 har andelen elbilar av den globala försäljningen ökat från 0.2% till 8.3%. Ökningen är exponentiell och återförsäljare har svårt att tillfredsställa efterfrågan från marknaden (Shine, 2022). Men samma tryck upplevs även vid litiumgruvorna. Litium är ett viktigt material för batterierna som driver elfordonen och vissa bedömare uppskattar att det redan 2025 kan uppstå brist på ämnet. Därför är det viktigt att utforska alternativ till batterierna för att nå klimatmålen.

Ett potentiellt drivmedel som bör övervägas är vätgas. Vätgas framställs genom processerna elektrolys, reformering eller förgasning (VätgasSverige, u. å). Vid förbränning av vätgas är vatten den huvudsakliga biprodukten och kan därför anses vara ett miljövänligt bränsle. Problemet med vätgas är inte tillgänglighet, framställningen eller klimatavtryck. Ämnet är däremot väldigt explosivt och kan därför vara svårhanterligt. Väteförspredning och korrosion är också problem som kan påverka en motors livslängd. Det finns därför ett behov av att titta närmare på vilka material som är lämpliga för förbränningsmotorer som drivs med vätgas.

Framför allt är vätgas som bränsle för förbränningsmotorer i tunga fordon intressant (Kågeson, 2022). Trots att bränslet beräknas vara dyrare per fordonskilometer är det mer effektivt ur andra aspekter. Fordon med Vätgasdrivna förbränningsmotorer väger mindre än batteridrivna elfordon på grund av batteriernas vikt och fordon med vätgasmotorer kan därför bära mer last vid transport. Vätgasdrivna fordon kan också tankas snabbare än batteridrivna vilket ger ekonomiskt incitament för åkerier som får högre fordonsutnyttjande.

Väte används idag inom ett par olika tekniker som drivmedel (Wróbel m. fl., 2022). Bränsleceller omvandlar vätgas till elektricitet som i sin tur driver fordon via elmotorer. Vätgas kan även förbrännas i en motor likt de fossila bränslen som används idag. Det finns vissa fördelar med att använda vätgas till förbränning kontra bränsleceller. Motorer som använder vätgas kan använda bränsle av lägre renhet än bränsleceller samt har fördelen att bygga på den vida kunskapsbasen som redan finns kring förbränningsmotorer inom transportsektorn. Vätgasdrivna förbränningsmotorer finns inte ute på marknaden men flera större aktörer har börjat undersöka ämnet.

### 1.1 Bakgrund

Sverige har som mål att ha blivit utsläppsneutrala när det gäller växthusgaser år 2045 (Håkansson, 2022). Kopplat till denna omställning till fossilfrihet har Chalmers startat ett kompetenscentrum, TechForH2, för att forska på hur väte kan användas till diverse tekniska applikationer. Centret får under 2023 bidrag av energimyndigheten, och kommer tillsammans med flertalet industripartners att utveckla kunskapen inom väte som förnybart drivmedel, särskilt inom tyngre fordonsindustri. Vätgas är exempelvis ett lovande alternativ till batterier i tyngre fordon, då den stora mängden batterier som krävs för tunga fordon är problematisk.

Företag som Volvo Group jobbar aktivt med att bygga förbränningsmotorer drivna med vätgas baserat på dieselmotorer. Under ett studiebesök hos Volvo Group betenade Jonas Wärnberg (personlig kommunikation, 24 mars, 2023), projektledare för Hydrogen ICE (Internal Combustion Engine) på Volvo Powertrain Strategic Development, svårigheterna med batteridrivna fordon för fjärrtransport, den sektor som Volvo siktar på för sina vätgasmotorer. Batteridrivna lastbilar är bättre anpassade för kortare sträckor menar Wärnberg. Det krävs förhållandevis lite arbete för att få en lastbilmotor designad för diesel att gå på vätgas istället och det är bortslösat att inte bygga på den kunskap som redan finns. Volvo Group anser sig även kunna erbjuda en billigare produkt i slutändan än både el- och bränslecellsfordon på grund av detta.

Användningen av vätgas medför generellt särskilda problem hos material som kommer i kontakt med gasen (Lynch, 2011). Dessa problem innefattar bland annat väteinducerad sprickbildning och väteförsprödning. Väte påverkar i stor mån metaller. Väteatomer är mycket små och kan vid exponering av en metall diffundera in i metallens kristallstruktur. Där leder vätet till försämrade mekaniska egenskaper, särskilt kopplat till metallens plasticitet (X. Li m. fl., 2020). Förbränningen av vätgas ändrar även miljön för komponenterna jämfört vid förbränning av fossila bränslen. Detta kan påverka komponenternas korrosions- och oxidationsmotstånd. Väte har påverkan på metallers utmattningsgräns. Studier har visat att väteförsprödning har signifikant påverkan på många legeringars utmattningsgräns, oavsett om det är lågcykelutmattning eller högcykelutmattning (Gangloff och Somerday, 2012). Detta medför särskilt problem för förbränningsmotorer som utnyttjar vätgas som bränsle. De komponenter i förbränningsmotorer som kommer i kontakt med bränslet är i hög grad metalliska (Yamagata, 2005).

### 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att sammanställa och undersöka information kring hur väte kan komma att påverka material i vätgasdrivna förbränningsmotorer, och att utforska vilka möjligheter som finns inom ämnet. Arbetet ska undersöka dels hur enbart vätgas påverkar komponenterna men även andra fysiska påfrestningar såsom tryck

och temperatur som material i förbränningsmotorer vanligtvis utsätts för. Detta görs för att sedan erhålla kunskap om hur dessa material kommer påverkas vad gäller utmattning, livslängd och andra aspekter i en vätgasdriven förbränningsmotor. Kunskapen som arbetet kommer samla ihop kan användas för generell förståelse av hur komponenterna i en förbränningsmotor samt dess material påverkas av vätgas som drivmedel. Kunskapen kan bidra till att ge läsaren en förståelse om vilka problem som kan finnas när det gäller material för en vätgasdriven förbränningsmotor. Kunskapen kan även utgöra ett underlag för framtida arbeten inom detta eller liknande ämnen.

### 1.3 Preciserings av frågeställningen

- Hur påverkas metaller av kontakt med väte?
- Med vilka mekanismer påverkar väte metallers egenskaper?
- Hur mycket påverkas de material som ofta används i förbränningsmotorer av väte?
- Påverkas vissa komponenter i förbränningsmotorer mer än andra vid kontakt med väte på grund av dess material?

### 1.4 Metod

Detta projekt är huvudsakligen en litteraturstudie, vilket innebär att information har inhämtats från litterära källor och granskats. Arbetet har främst gått ut på att inhämta information om de olika motordelarna som kommer i kontakt med vätgasen, så att de mest lämpade materialen för dessa motordelar har kunnat sammanställas. Till största del har denna sammanställning byggts på redan tillgänglig information inhämtad från böcker, e-böcker, artiklar eller annan expertis inom området. Detta betyder att en informationinsamling och informationbearbetning har skett samtidigt under projektets gång, parallellt som detta dokumenterats och diskuterats inom projektgruppen. Information har sökts framförallt på de databaser som finns listade på *Chalmers biblioteks* hemsida, bland annat *Knovel*, *Web of Science* och *Scopus*. Artiklar och annan information har även hämtats från andra hemsidor när det har varit lämpligt, samtidigt som stor vikt lagts på att undersöka pålitligheten av källorna. Arbetsgången har gått ut på att finna lämpliga sökord relaterade till ämnen. Följande sökord har bland annat använts, *hydrogen embrittlement*, *internal combustion engines*, *engine materials*, *stress corrosion cracking* med flera. Även en kombination av dessa sökord har använts. I viss mån har även källor till lästa artiklar undersökts när viss information har varit otydlig eller när mer fördjupning behövts göras inom ett specifikt ämne. Projektet har hanterat en rad olika ämnen som efterforskades av olika gruppmedlemmar parallellt.

### 1.5 Avgränsningar

Arbetet har ej innefattat analyser av andra bränslen än vätgas, som annars är vanligt förekommande i förbränningsmotorer, såsom bensin eller diesel. Information om dessa konventionella förbränningsmotorer har dock inhämtats för att kunna jämföra med vätgasmotorer. Det har dock inte gjorts någon avgränsning till ren vätgas som bränsle. Ämnen såsom ammoniak och vatten har nämnts då de kommer i kontakt med de komponenter som har betraktats, men undersöks inte närmare. Vätgas används även idag som drivmedel till bränslecellsfordon. Bränsleceller har därför inte omfattats i arbetet.

Under arbetet har komponenter som kommer i direktkontakt med vätgasen analyserats, då dessa har en direkt inverkan från bränslet. Det finns även komponenter i motorn som kan få en indirekt inverkan av vätgasen, såsom från avgaserna, och även dessa komponenter har analyserats. Komponenter som påverkas av vätgas som eventuellt sipprar ur förbränningskammaren ut i motorn kommer inte analyseras. Detta för att begränsa projektets omfattning. Bränsletanken är dock en komponent som är i direkt kontakt med väte men som inte har undersökts under arbetet. En anledning till att denna komponent inte studerats närmare är att det redan finns stora tankar där vätgas förvaras både i gasform under högt tryck och i väteskeform under låga temperaturer. Därmed kan information om sådana system redan finnas tillgänglig.

Under arbetet har fokus lagts på metaller då majoriteten av komponenterna i konventionella motorer består av metall. Anledningen till detta är att metaller har egenskaper som kan bista de höga temperaturer, spänningar, tryck och andra påfrestningar som uppenbaras i motorn. Däremot finns det vissa fåtal komponenter som består av exempelvis keramer och polymerer men dessa material har inte undersökts i koppling till vätgas.

Arbetet har omfattat undersökning av komponenter som finns i en kolvmotor och vilka krav som ställs på dessa, därmed har andra modeller av förbränningsmotorer såsom wankelmotorer inte undersökts. Projektet har ej fokuserat på att bidra med en lösning utan som en studie för ökad kunskapsbredd hos läsaren. Arbetet har pågått under vårterminen 2023 och utförts på halvtid.

# 2

## Vätets påverkan på metaller

Väte har länge varit känt för att påverka metalliska material negativt (Johnson, 1875). Forskningen kring väteskador på material har ökat de senaste åren som följd av omställningen till att använda väte som en miljövänlig energibärare (Lynch, 2019). Förståelsen till hur väte påverkar material är kritiskt för att kunna motverka skador. Väte påverkar de flesta legeringsgruppers duktilitet och kan leda till brott av komponenter i förtid.

Problemet med väte härstammar från den lilla storleken hos atomerna (X. Li m. fl., 2020). Det gör att vätet i hög grad löses i metallgittret. När väte löses i en metall lägger sig väteatomen i hålrummen i metallgittret (Gangloff och Somerday, 2012). Metaller av FCC-struktur har större hålrum än BCC och tillåter därmed högre löslighet av väte. Men det större antalet hålrum i BCC-gittret låter vätet diffundera genom materialet mycket snabbare. Vätediffusionen ökar generellt med ökande temperatur, och detta påverkar i högre grad FCC- och HCP-metaller än BCC. Många material som genomgått behandlingar där väte kan ha ansamlats i höga koncentrationer bakas därför i hög temperatur under lång tid för att låta vätet diffundera ur materialet.

Det krävs atomärt väte för att en metall ska absorbera och lösa väte. Det finns tre sätt som metaller laddas med väte (Truschner m. fl., 2021). Den första är absorption i trycksatt vätgas. Detta sker främst vid högre temperaturer och gstryck. Detta för att övervinna energin som krävs för att vätemolekyler ska dela sig till enskilda väteamtomter som metallen kan absorbera. Till viss begränsad mån kan väte absorberas vid rumstemperatur och under lägre tryck. Den andra typen är korrosionsbaserad. Denna kallas även elektrolytisk väteladdning och innebär att metallen absorberar väte från en syralösning. Här korroderar syran metallen och absorptionen av väte beror på till vilken utsträckning korrosionen sker. Den tredje typen av väteladdning innefattar en applicerad elektrisk potential. Denna typ kallas för katodisk väteladdning och utförs ofta i en neutral vätska. Vatten reduceras till vätejoner och hydroxidjoner där vätet kan absorberas av metallen. Här har inte korrosionsmekanismer något betydande inflytande.

I en studie där de tre olika metoderna att ladda väte används jämförs rent järn samt en stållegering för att se hur mycket väte som absorberas av materialen (Truschner m. fl., 2021). Här visade katodisk laddning av väte betydligt högre absorptionsgrad än de andra metoderna. Stållegeringen hade absorberat 3 ppm väte jämfört med 1.5 ppm för elektrolytisk laddning efter 300 timmar. Studien påvisade vissa skillnader

i absorption beroende på vilken syra och medium som metallen laddades i, men generellt absorberades upp till dubbelt så mycket väte vid katodisk laddning för både stållegeringen och järnet. Jämförelsevis visade inget av materialen någon betydande absorption från att ha laddats i gasmiljö i rumstemperatur under 20 bar och 100 bar. Resultaten från denna studie tyder på att laddning av väte i trycksatt gasmiljö inte ger lika stor inverkan som de andra typerna. Dock ökar laddningen av väte från gas med ökad temperatur, så experimentet som utfördes i rumstemperatur kan inte säga något om hur omfattande vätgasupptagningen blir i en förbränningsmotor där temperaturerna kan uppnå 1000 °C (van Basshuysen och Schäfer, 2016).

Många studier som genomförs för att undersöka vätes påverkan på metaller använder sig ofta av elektrolytisk eller katodisk laddning. Att ladda material med hjälp av vätgas kräver mer avancerad utrustning vilket gör det enklare att använda de andra metoderna. Detta gör att det inte finns lika mycket litteratur med tester för vätgasmiljöer. Särskilt katodisk laddning är effektiv och introducerar stora mängder väte i materialet vilket gör att man se hur stora absorptionsmängder påverkar materialet. Dock speglar detta inte alltid hur särskilt gasmiljö påverkar väteförsprödning, då mekanismerna i gasmiljö och i våt miljö är något annorlunda.

### 2.1 Väteförsprödning

Generellt när det talas om påverkan från väte på metaller används ordet väteförsprödning (Lynch, 2019). Det används ofta som en generell term för alla typer av skador från väte på metaller, då väte oftast påverkar duktiliteten hos material och gör dem sprödare.

Litteraturen kring ämnet är inte helt enhetlig. Klassificeringen av vad som är väteförsprödning eller inte varierar beroende på författare. American Society for Metals, ASM international, listar fem specifika typer av skador som uppstår på material från väte (Miller m. fl., 2021): (1) Väteförsprödning, (2) Väteinducerade blåsor, (3) Sprickbildning från väteutfällning, (4) Väteattack och (5) Hydridbildning. Andra författare använder istället väteförsprödning som en paraplyterm där (2)-(5) inkluderas (Lynch, 2011). Mekanismerna bakom vätes påverkan är inte heller helt förstådda (Lynch, 2019). Där finns en mängd teorier som forskningsvärlden ännu inte har enats om. Den här rapporten listar generellt vad som sker mellan väte och metaller utan att gå in djupare på teorierna kring mekanismerna.

Känsligheten för väteförsprödning ökar i de flesta material med ökad hållfasthet (Lynch, 2011). Mikrostrukturen kan spela lika stor roll på ett materials påverkan från väte. En ökad mängd defekter medför ofta ökad känslighet. Brott på komponenter utsatta för väteförsprödning visar generellt på lokaliserad plasticitet och brott längs korngränser enligt Lynch (2011).

### 2.1.1 Intern väteförsprödning

Intern väteförsprödning härstammar från vätekoncentrationer som redan finns inuti ett material vid belastning (Lynch, 2011). Vätet kommer ofta från tillverkningsfasen då metallen i smält fas reagerar med fuktigheten i omgivningen. Därför påverkas ofta smidda detaljer, svetsfogar och gjutna detaljer av denna typ av försprödning. I smält fas löser sig väte i stor mängd i metallen och när metallen stelnar minskar lösligheten. Då fälls vätet ut i fria ytor inuti metallstrukturen nära ytan, vid porer och inklusioner. Höghållfasta stål ytbehandlas i vissa processer, som elektroplätning och betning. Båda processerna gör att materialet utsätts för vätemiljöer som kan få väte att fastna i materialet. Utfallet från intern väteförsprödning beror på materialstrukturen.

#### 2.1.1.1 Väteinducerade blåsor

Väteinducerade blåsor är ett fenomen som uppstår från atomärt väte som diffunderar in i inklusioner och defekter i metaller (Miller m. fl., 2021). Här bildas molekyllär vätgas som ackumulerar och ökar i tryck. Det ökande trycket kan tillsammans med en pålagd last få materialet runt den interna ytan att plasticera om trycket blir för högt. Interna hålrum kan då bildas. Om dessa hålrum är nära ytan på metallen och materialet är duktilt nog kan metallens yta bukta ut till att likna en blåsa.

För att blåsor ska bildas krävs att metallen måste förbli duktil efter absorption av vätet (Louthan, 2008). Därför påverkar väteinducerade blåsor främst låghållfasta legeringar. Metallen måste även innehålla interna ytor där vätgasen kan ansamlas, såsom defekter och korngränser. Väte måste absorberas innan lasten läggs på metallen. Legeringar som är hög-hållfasta tenderar att plasticera mindre och spricker därvid mer än att utveckla blåsor kring inklusionerna där vätgasen samlas, som täcks i avsnitt *2.1.1.2*.

#### 2.1.1.2 Sprickbildning från väteutfällning

Sprickbildning från utfällning av vätgas är liknande väteinducerade blåsor. De beror också på att vätgas fälls ut vid inklusioner och defekter i metallen (Louthan, 2008). Då gastrycket ökar kan sprickor vid ytan som vätet är utfällt vid propagera som en intergranulär spricka, särskilt vid pålagd last. Denna mekanism är till skillnad från väteinducerade blåsor av spröd karaktär, vilket innebär att materialet snarare spricker än plasticerar. Vätet förhindrar att sprickans front trubbas av (Miller m. fl., 2021). Detta minskar storleken på den plastiska zonen framför sprickan och låter den propagera snabbt och sprött. Det krävs ett högt tryck från vätgasen för propageringen av sprickan, och därför slutar den göra det vid en viss storlek.

För att sprickor ska växa på grund av utfällt väte krävs töjspänningar som verkar på materialet (Miller m. fl., 2021). Det finns primärt två typer av sprickor som bildas på det här sättet: "fiskögon" och "flagor". Skillnaden mellan dem är att den första bildas i användningen av ett material medan den andra är en produkt av tillverkningen, såsom smide. Problemet med fiskögon och flagor är att de är stora hålrum

i materialet som bidrar till spänningskoncentrationer, förminskar den bärande ytan inuti materialet och agerar ofta initieringspunkt för utmattningsbrott.

### 2.1.1.3 Reversibel väteförsprödning

Reversibel väteförsprödning innebär att materialet kan återfå sina initiala egenskaper efter att vätet drivs ut ur materialet (Miller m. fl., 2021). Därför får inte vätet kemiskt reagera med materialet eller påbörja sprickbildning i mikrostrukturen för att detta fenomen ska gälla. Intern reversibel väteförsprödning uppkommer genom att materialet absorberar vätet in mellan korngränserna. Vidare leder detta till försämrad duktilitet vilket försvagar materialet och gör det mer utsatt för brott vid lägre belastningar. Väteförsprödningen påverkar materialet mest då det utsätts för oavbruten pålagd spänning vid rumstemperatur. Vid högre temperaturer diffunderar väte iväg ifrån materialet och befriar det således från inverkan.

Det kan ta tid att upptäcka intern reversibel väteförsprödning eftersom brott uppkommer efter en viss inkubationstid (Miller m. fl., 2021). Det är därför som fenomenet är mest märkbart vid låga töjningshastigheter. Fenomenet har observerats bland flera olika metaller och legeringar men mest studier har gjorts kring komponenter som är tillverkade av höghållfasta stål (Lynch, 2011).

### 2.1.2 Vätemiljöförsprödning

Vätemiljöförsprödning uppstår när material utsätts för direkt kontakt med gaser i form av väte eller vätesulfid under högt tryck (Lynch, 2011). Väte absorberas in i materialet vid sprickfronterna i ytan. Miljöförsprödningen kan ske vid ett stort omfång av temperaturer men är mest potent vid rumstemperatur. Fenomenet blev först uppmärksammat i tankar som förvarade vätgas under högt tryck. De effekter som vätemiljöförsprödning har på ett material är att de försämrar duktilitet och sänker tröskeln för sprickinitiering (Jewett m. fl., 1973).

Upplösningen av väte i metaller vid högt tryck av vätgas följer tre steg: det första steget är vätgasadsorption på ytan, vilket orsakas av svaga van der Waals bindningar mellan vätgasmolekylen och metallytan (X. Li m. fl., 2020). Detta steg är helt reversibel. Det andra steget är att vätemolekylen dissocierar till atomärt väte och sista steget är när väteatomerna diffunderar längre in i materialet. En av faktorerna som påverkar diffusionen är koncentrationsgradienten av vätgas. Gasmolekyler rör sig alltså från ett område med högre koncentration till ett område med lägre koncentration. För väte som befinner sig under högt tryck följer koncentrationen av upplöst väte i metallen Sieverts lag, när systemet har nått termodynamisk jämvikt:

$$C_h = S \cdot \sqrt{P_{H_2}}$$

där  $C_h$  är koncentrationen av upplöst väte i metallen,  $S$  är löslighetskonstanten som beror på temperatur och legeringstyp, och  $P_{H_2}$  är partialtrycket av väte. Formeln ger dock inte helt noggrant resultat eftersom det finns andra parametrar i verkligheten som påverkar koncentrationen av upplöst väte i metaller. Enligt Sieverts lag är till

exempel koncentrationen av löst väte i BCC järn  $2 \cdot 10^{-8}$  vid rumstemperatur och 0.1 MPa, medan i verkligheten är denna siffra högre på grund av många dislokationer, vakanser och andra ställen i metallen där väte kan sitta.

Vätgas under högt tryck skulle kunna vara relevant i vätgasförvaringstanken i fordonet, även om tanken inte studeras närmare i det här studiet. Ett annat exempel skulle kunna vara förbränningskammaren där vätgas komprimeras i cylindern, vilket medför högt tryck. Det höga trycket i förbränningskammaren varar en väldigt kort period, då vätgasen komprimeras innan den förbränns. Mer specifika studier och experiment behöver därför göras för att undersöka detta.

### 2.1.3 Vätreaktionsförsprödning

Väte kan reagera kemiskt med vissa legeringstyper (Louthan, 2008). De två primära utfallen är att väte reagerar med ämnen i metallen till att bilda en olöslig gas eller en hydrid.

#### 2.1.3.1 Väteattack

Väte är ett starkt reduktionsmedel (Louthan, 2008). Därför kan absorberat väte kemiskt reagera med legeringselement eller föroreningar i mikrostrukturen hos ett material och bilda en oftast gasformig fas. Väte kan komma att påverka särskilda komponenter eller mikrostrukturella element i materialet. Exponeringen av väte för exempelvis stål vid höga temperaturer och tryck kan signifikant påverka mikrostrukturen, hållfastheten och leda till brott.

När stål exponeras för väte reagerar kolen i stålet med vätet och bildar metangas vilket minskar kolhalten i materialet. Reaktionen är en ytreaktion mellan stålet och vätet. Reaktionen mellan karbid och väte är termodynamiskt fördelaktig över ca 200 °C och metangasen som bildas är en gas som ej kan lösas. Denna samlas vid porer, inklusioner och särskilt korngränser. Ökande mängder metangas ökar trycket inuti porer och kan bidra till tillväxt av hålrum och porer i materialet. Tillsammans med yttre spänningar kan till slut intergranulära sprickor och brott uppstå. Den minskade halten kol i stålet minskar även hållfastheten.

Väteattack är en process som är viktig att motarbeta om material kommer vistas i en vätemiljö med hög temperatur oavsett tryck. Väteattack är en irreversibel process som sker vid höga temperaturer. Stabilitet hos karbiderna i stål minskar risken för väteattack, och vissa legeringsämnen hjälper med detta (Miller m. fl., 2021).

#### 2.1.3.2 Hydridbildning

Särskilda typer av legeringar, särskilt vissa övergångsmetaller, sällsynta jordartsmetaller och alkaliska jordartsmetaller bildar hydrider i kontakt med väte (Louthan, 2008). Hydrider är en kemisk förening mellan väte och ett annat ämne (Zum Dahl, u. å).

Likt metaller som inte bildar hydrider (som stål) löses väte i hydridbildande metaller till en viss gräns. När mängden väte överskrider lösligheten fälls istället metallhydrid ut i metallen. Dessa är generellt av lägre densitet än legeringen, spröda och minskar materialets duktilitet. Detta gör hydriderna genom att förenkla bildandet av hålrum i materialet samt att hålrum sammanfogas. Viktiga legeringsbaser som påverkas av hydridbildning är titan, zirkonium och tantal. I hydridbildande legeringar medför löst väte generellt ingen försprödning utan metallen påverkas främst när hydriderna bildas (Lynch, 2011). Försprödning från hydridbildning uppstår endast under särskilda temperaturspann och töjningshastigheter. Mekanismen uppstår endast då töjningshastigheten är långsam nog att väte kan diffundera framför sprickfronten och då temperaturen är rätt för att hydridfasen ska vara stabil.

## 2.2 Vätets påverkan på korrosionsmekanismer

Många forskare har i sin forskning fokuserat på vätets påverkan på de mekaniska egenskaperna av metaller, i synnerhet väteförsprödningsfenomenet (W. Li m. fl., 2021). Mindre studier har gjorts på vätets roll i olika korrosionsmekanismer. Trots detta, påverkar väte även korrosionsbeteenden hos metaller och passivskiktet som kan bildas på ytan. Reduktionsreaktioner av vätejoner, i samband med katodisk skydd, elektroplätning och korrosion, ökar generellt vätehalten i materialet. Vätets påverkan har inte enbart effekt på de mekaniska egenskaperna och fasövergångarna i metallstrukturen. Det har minst lika viktig effekt på korrosionsbeteenden hos stål, samt oxidation och upplösning av spetsen på en spricka i metallen.

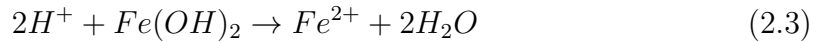
Det är viktigt att nämna här att i följande studier som gjorts om vätets påverkan på oxidationsmekanismer har man inducerat fram miljöer där korrosion kan ske mycket hastigt som i vanliga fall inte sker naturligt. Man har till exempel elektrokemiskt laddat provmetaller med väte för att öka vätekoncentrationen i metallen. Man har också minskat pH-värdet genom att introducera syror och lagt metaller i olika lösningar, såsom NaCl-lösningar. Därför är detta inte direkt relevant för vätedrivna förbränningsmotorer, men är fortfarande viktigt att förstå hur väte kan påverka och påskynda korrosionsmekanismer. I avgassystemet skulle det till viss del vara relevant då det är en fuktig miljö med vattenånga och kväveoxider. Det är också värt att nämna att följande studier har enbart fokuserats på stål.

### 2.2.1 Vätets påverkan på sammansättningen och strukturen av passivskiktet i stål

Passivskiktet på stål är endast några nanometer tjockt, men skyddar stålet från korrosion, inte minst i rostfritt stål (W. Li m. fl., 2021). Krom, nickel, Ni och molybden, Mo är de ämnen i rostfritt stål som bidrar till stabilitet och formation av passivskiktet, och därmed skyddar mot korrosion. Passivskiktet är vanligen sammansatt av hydroxider och oxider av krom och järn. I en analys av 310 rostfritt stål, har väte visat sig kunna öka  $OH^-/O^{2-}$  förhållandet, vilket förbättrar konduktivite-

ten av passivskiktet eftersom hydroxider har mer defekter. Förbättrad konduktivitet gör filmen mindre stabil. I duplex rostfritt stål som består av ferrit- och austenitfas, kan ett liknande fenomen observeras. Efter att stålet laddats med väte ökade strömledningen i passivfilmen, vilket gjorde passivfilmen mindre stabil. Strömmen ökade elva gånger i austenitfasen och två gånger i ferritfasen. Detta på grund av att det finns mer väte i austenitfasen och passivskiktet på austenitfasen har högre konduktivitet än den på ferritfasen. Väte kan även minska innehållet av  $Cr_2O_3$  och N i passivskiktet, vilket minskar dess tjocklek. Passivskiktet som har lägre koncentration av kväve försvagar skiktets förmåga att skydda mot korrosiva joner såsom kloridjoner, vilket gör skiktet mer sårbart.

Väteladdning resulterar i kontinuerlig vätediffusion från metallen till passivskiktet där den joniseras, vilket medför att väte befinner sig i form av protoner i skiktet (W. Li m. fl., 2021). Väteprotoner har en starkt reducerande förmåga och är därför ogynn- sam vad gäller passivfilmens skyddsförmåga. I det inre skiktet av passivfilmen där det finns oxider, reducerar väteatomer i gränssnittet mellan skiktet och metallen  $Fe^{3+}$  till  $Fe^{2+}$ . Detta medför lägre pH-värde enligt (2.1), vilket förhindrar bildan- det av passivfilmen. Väte ökar även koncentrationen av  $Fe^{2+}$  enligt (2.2) vilket gör passivfilmen tunnare. I det yttre skiktet av passivfilmen minskar förhållandet  $O^{2-}/Fe^{2+}$ , medan  $OH^-/O^{2-}$  ökar enligt (2.3 - 2.5). Passivfilmen blir mer oordnad på grund av att hydroxider har mer defekter än oxider.



Det har föreslagits att väte ackumuleras vid sprickspetsen när en metall utsätts för en spricka (W. Li m. fl., 2021). Detta förvärrar den anodiska upplösningen, vilket främjar SCC (stress corrosion cracking). Detta kan hända genom att vätet i sprick- spetsen inducerar övergång från austenit till martensit fas. Den galvaniska skillnaden medför upplösningen av martensitfasen, vilket främjar SCC.

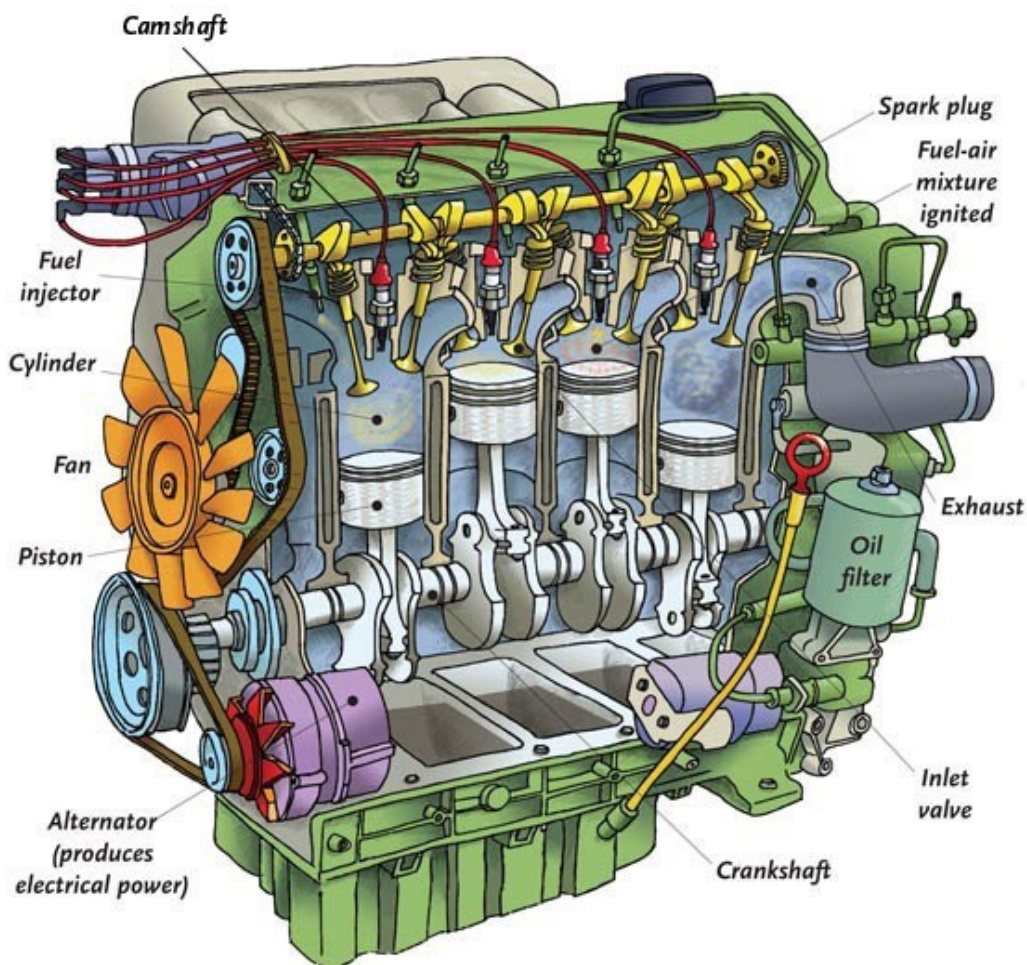
# 3

## Motortyper och komponenter

För att kunna dra slutsatser om vilka material som är lämpliga i en förbränningsmotor för vätgas behövs kunskap om hur en förbränningsmotor fungerar, vilka motortyper som finns samt vilka komponenter dessa består av. I detta avsnitt kommer en översiktlig analys göras på de konventionella förbränningsmotorer som finns. Vidare i arbetet kommer det undersökas hur väte förhåller sig till de olika motortyperna, exempelvis om det finns vissa motortyper som inte är kompatibla med förbränning av vätgas samt vilka komponenter detta gäller.

Ottomotorn uppfanns år 1876 av Nicolaus August Otto, och var den första motorn med intern förbränning i en cylinder med kolv (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Ottomotorn skapade den grund som senare interna förbränningsmotorer skulle byggas på. Motorn var på den tiden ett alternativ till ångmotorn, och till skillnad från ångmotorn arbetade ottomotorn med inre förbränning. Alternativa motorer, så som dieselmotorn, skulle utvecklas först många år senare. I dagsläget är det ottomotorn och dieselmotorn som fått störst genomslag och det är dessa motorer som används i de flesta transportfordon i modern tid. Principen för förbränningsmotorerna bygger på att låta bränslet reagera med en oxidator, som tillsammans omvandlar kemisk energi till mekanisk energi. De stora skillnaderna mellan motorerna är vilket bränsle som används, samt hur bränslet förbränns, något som förklaras i kapitel 3.1.7 samt kapitel 3.1.8. Dessa motorer kan bestå av tvåtaktstyp eller fyrtaktstyp, vilket förklaras i kapitel 3.1.1 och kapitel 3.1.2.

På grund av det faktum att motorerna förbränner bränslet på olika sätt (stiftantändning kontra kompressionsantändning) finns det vissa motorkomponenter som särskiljer dem. I en gnistantändningsmotor krävs ett tändstift för att antända bränslet, medan en kompressionsantändningsmotor enbart består av en insprutningsventil som sprutar in bränsle som sedermera antänds när det komprimeras i förbränningskammaren. Många komponenter är dock inkluderade i båda motortyperna. En överblick över dessa komponenter kan ses nedan i figur 3.1.



**Figur 3.1:** Överblick över en intern förbränningsmotor, i detta fall en tändstiftsmotor. Många av komponenterna är standardiserade i alla typer av förbränningsmotorer (Q-files, 2023). Figuren är använd med tillåtelse från Q-files.

Tidigare i rapporten (avsnitt 1.5) sattes avgränsningar till vilka komponenter som kommer analyseras i detta arbete. Bedömningen gjordes att enbart de komponenter som kommer i direkt kontakt med vätgasen kommer analyseras utifrån ett materialperspektiv. Resterande komponenter som ändå är vitala för motorns funktionalitet kommer ej analyseras då dessa inte anses påverkas av vilket typ av bränsle som används. Däremot bör man ha kännedom om vad exempelvis en vevaxel eller vevstake är för att förstå följande förklaringar. Samtliga komponenter går att finna i figur 3.1 ovan. De olika komponenterna som innefattas av arbetet och deras funktioner är följande (van Basshuysen och Schäfer, 2016):

- **Cylinder**

Cylindern är den huvudsakliga komponent där förbränning av bränslet och energiomvandling från kemisk till mekanisk energi sker. I en typisk förbränningsmotor innehåller varje cylinder en kolv som kan röra sig upp och ned. En

motor kan ha ett olika antal cylindrar beroende på motorstorlek samt vilken effekt man vill att den ska medföra.

- **Topplock (Cylinder head)**

Topplocket är placerat ovanför cylindern och försluter därmed förbränningskammaren ovanifrån. Därför har den till uppgift att försluta förbränningskammaren så att gaser ej läcker ut. Topplocket innehåller även de ventiler som kontrollerar inflödet av luft och utflödet av bränsle till och från förbränningskammaren. Kanaler för kylvätska som har till uppgift att kyla ned förbränningskammaren finns även i topplocket, likaså ventilerna samt andra vitala motorkomponenter. I topplocket brukar även en rad andra komponenter monteras fast, så som kamaxel, ventilfjädrar och insprutningsventiler.

- **Kolv (Piston)**

Kolven är som tidigare nämnt placerad inne i cylindern. När kolven rör sig nedåt bildas ett vakuum som resulterar i att luft och bränsle sugas in i cylindern. Vevaxeln får sedan kolven att röra sig uppåt igen och komprimerar bränslet, som sedan antänds via en tändstiftsantändning eller kompressionsantändning. Detta medför i sin tur en kraft som får kolven att röra sig i en linjär rörelse. Kolven driver i sin tur vevaxeln som omvandlar den vertikala rörelsen till en cirkulär, som sedan överförs till växellådan för att driva fordonet.

- **Kolvringar (Piston rings)**

Kolvringarna är metalliska packningar som sitter på kolvens ytterkant och har, för det första, till uppgift att tätat förbränningskammaren mot vevhuset. Detta krävs för att förbränningsgaserna ej ska spridas till andra delar av motorn där de riskerar att skada komponenter. Detta görs även för att säkerställa att förbränningskammaren har lämpligt tryck under förbränningen. För det andra har kolvringarna till uppgift att leda bort värme från kolvarna ut till cylinderväggarna. Detta görs för att motverka skador på kolvarna till följd av för höga temperaturer. För det tredje har de till uppgift att reglera oljeförbrukningen. Om kolvringarna tillförs för lite olja utsätts motorkomponenterna för onödigt slitage och om de tillför för mycket kan motoreffekten minska. Det är därför viktigt att oljeförbrukningen ligger på en rimlig nivå.

- **Ventiler (Valves)**

Det finns tre olika typer av ventiler i en förbränningsmotor - inloppsventiler, avgasventiler och insprutningsventiler. Inlopps- och avgasventilerna består av en stång med en fjäder runt som är monterade till kamaxeln, som i sin tur har kontakt med motorns vevaxel. Ventilerna har en cirkulär, platt form längst ned så att dessa kan försluta förbränningskammaren från gasinsläppet och avgasutsläppet. Ventilerna kan röra sig i en linjär rörelse och styrs av motorns processer. Insprutningsventilen har en annan konstruktion och har till uppgift att spruta in bränsle i förbränningskammaren. Detta brukar oftast göras elektroniskt.

Inloppsventilen har till uppgift att reglera tillförseln av luft in till förbränningskammaren. När inloppsventilen rör sig uppåt släpps luft in i förbränningskammaren, under det som kallas insugningstakten. När inloppsventilen rör sig nedåt försluts förbränningskammaren och luften och bränslet kan komprimeras och sedan förbrännas. I motorer som har extern bränsleblandning blandas bränslet med luften och både luft och bränsle tas sedan in genom inloppsventilen.

Avgasventilerna har till uppgift att reglera utförseln av de avgaser som bildats under förbränningen. Under avgastakten rör sig avgasventilerna uppåt vilket gör att avgaserna kan lämna förbränningskammaren, och ventilen rör sig sedan nedåt för att återigen försluta förbränningskammaren.

Inlopps- och avgasventiler behövs enbart när motorn är av fyrtaktstyp, då kolven själv försluter förbränningskammaren från bränsleinsläppet och avgasutsläppet i en tvåtaktsmotor. Mer om detta i avsnitt *3.1.1* och *3.1.2*.

Insprutningsventilen (fuel injector) är en vital komponent i kompressionsmotorer, vilket förklaras i avsnitt *3.1.8*, och krävs för att bränslet ska kunna förbrännas. Tändstiftsmotorer har å andra sidan traditionellt sett konstruerats utan insprutningsventil och haft förgasare som blandat bränsle och luft innan det transporterats till förbränningskammaren. Under senare tid har dock majoriteten av alla tändstiftsmotorer även konstruerats med insprutningsventil då det visat sig fördelaktigt att kunna reglera bränsletillförseln på det sättet. Insprutningsventilen har till uppgift att spruta in bränsle i förbränningskammaren under kompressionstakten. Den är oftast fäst i taket på förbränningskammaren för att det insprutade bränslet jämnt ska fördelas i kammaren. När bränslet har sprutats in självantänds det, för kompressionsmotorer, av den komprimerade laddningen (där laddningen består av en blandning av bränsle och luft eller enbart luft). Hos tändstiftsmotorer antänds bränslet av ett tändstift istället för självantändning, men bränsleinsprutningen sker fortfarande under kompressionstakten (avsnitt *3.1.7*).

Efter att ventilerna har öppnats av kamaxeln hålls de stängda av ventilfjädrarna. Fjädrarna måste hålla tillbaka trycket från kompressionen av gasen i förbränningskammaren samt förbränningen. Om fjädrarna inte får ventilerna att hålla tätt förlorar motorn prestanda då inte all kraft från förbränningen överförs till vevaxeln.

- **Bränsleledning (Fuel line)**

Bränsletransporten sker via grenrör från bränsletanken till de olika förbränningskamrarna. Under transporten behöver bränslet genomgå ett filter för att filtrera bort eventuella kontaminationer. En katalysator behövs också för att spjälka eventuell vätebärare till ren vätgas, men hur denna är konstruerad beror på vilken typ av vätebärare som används. En kompressor ingår också i systemet för att bränslets tryck ska kunna styras.

- **Avgassystem (Exhaust system)**

Avgassystem består av fyra huvuddelar - grenrör, flexrör, katalysator och ljuddämpare.

Grenrör kan vara integrerad med katalysatorn (Walker, u. å). Grenröret är kopplat till motorns avgassportar genom en flänskontakt. Grenrörets uppgift är att samla in alla avgaser som släpps ut från cylindrarna och föra ut dem genom ett gemensamt rör.

Flexrörets uppgift är att dämpa de vibrationer som uppstår i avgassystemet när motorn arbetar, och att motverka potentiell sprickbildning i avgassystemet till följd av detta. Vanligtvis är flexröret kopplat till grenröret (PipsIslandHome, u. å).

Katalysatorn renar avgaserna från farliga ämnen innan det släpps ut i luften (Universal Technical Institute, 2021). Det finns två typer av katalysatorer som förekommer, reduktionskatalysatorer och oxidationskatalysatorer. Reduktionskatalysatorn reducerar kväveoxid genom att ta bort syret. Kväveoxid delas alltså upp i kväve och syre vilket inte är skadliga gaser. Oxidationskatalysatorn är till för att addera syre till kolmonoxid och på så sätt skapa koldioxid.

Ljuddämparen minskar ljudet genom att driva avgaserna genom hål och tuber som i sin tur minskar avgastrycket (Tire och Repair, 2020). Minskat avgastryck leder också till minskade ljudnivåer. Ljuddämparna leder också avgaserna ut i luften.

- **Turbo**

Turbons uppgift är att komprimera luft och föra in det i förbränningskammaren (Cummins, u. å). Resultatet av att luften komprimeras är att luftmolekylerna packas tätare tillsammans och mer bränsle kan sprutas in. Detta ökar förbränningsprocessens verkningsgrad och medför högre motoreffekt. Genom att använda turbon kan man använda sig av en mindre motor och fortfarande få samma prestanda. Med en mindre motor ökar lastvikten för fordonet och mer material kan transporteras med samma mängd bränsle. Turbon består av två huvudkomponenter - turbinen och kompressorn.

Turbinen innehåller turbinhjulet och turbinhuset. Turbinhusets uppgift är att leda avgaserna till turbinhjulet. Turbinhjulet börjar då snurra och avgaserna lämnar sedan turbinhuset.

Kompressorn innehåller på samma sätt som turbinen två huvuddelar, kompressorhjulet och kompressorhuset. Kompressorhjulet sitter fast i turbinen via en smidd stålaxel. När turbinen rör sig genererar det en roterande rörelse för kompressorhjulet. Den höga rotationshastigheten drar in luft och komprimerar den. Kompressorhuset omvandlar sedan luftflödet som först har en hög has-

tighet med lågt tryck till ett luftflöde med låg hastighet och högt tryck. Det komprimerade luftflödet trycks sedan in i motorn vilket tillåter den att bränna mer bränsle och således generera mer kraft.

## 3.1 Olika motortyper

En förbränningsmotor kan konstrueras på olika sätt och de existerande motortyperna har olika fördelar och nackdelar som behöver jämföras med varandra. Skillnaderna beror på hur de termodynamiska cyklerna i förbränningskammaren ser ut, hur bränslet blandas innan det förbränns samt om antändningen sker via ett tändstift eller självantändning från kompression. I kommande underavsnitt ges korta beskrivningar av dessa motortyper och vad som särskiljer dem. Detta görs för att bygga en faktagrund som sedan kan användas för att analysera hur vätgas kan användas i en förbränningsmotor. Det ger även en grund för att avgöra om vilken typ av miljö som råder i motorn då det kan variera med exempelvis tryck och temperatur mellan olika motortyper.

### 3.1.1 Tvåtaktsmotorer

En tvåtaktsmotor är en typ av förbränningsmotor som har en termodynamisk cykel som genomförs i två steg (Kasab och Strzelec, 2020). Varje steg innebär rörelsen av en kolv, och brukar kallas takt. De två takterna genomförs då en vevaxel roterar ett varv. Takterna som cykeln består av är arbetstakt och avgastakt. Arbetstakten är när kolven rör sig uppåt och komprimerar laddningen. Laddningen består antingen av luft eller en blandning av luft och bränsle baserat på vilken typ av bränsleblandning motorn har. När laddningen är komprimerad antänds den och därmed inleds avgastakten. Avgastakten är när kolven rör sig nedåt och tillför arbete till vevaxeln, under denna takt ventileras även avgaserna ut och därefter dras laddningen som lagrats i vevhuset in. Därefter börjar cykeln om med en ny arbetstakt.

Tvåtaktsmotorer har generellt sett hög effekt både per volymenhet och per massenhet då arbete tillförs för varje cylinder vid varje rotation (Kasab och Strzelec, 2020). Tvåtaktsmotorer tenderar dock att ha en lägre verkningsgrad än fyrtaktsmotorer. Dessutom är arbetstemperaturen högre än i fyrtaktsmotorer då förbränning sker för varje rotation (Kumar, 2022). Tvåtaktsmotorer används ofta i små lätta fordon eller verktyg men kan också användas i stora fordon som exempelvis fartyg och tåg, då ofta dieselmotorer som motkolvmotor (Mang och Wilfried, 2017).

### 3.1.2 Fyrtaktsmotorer

Fyrtaktsmotorer har, som namnet antyder, fyra takter, alltså består en cykel av fyra rörelser vilket är två varv för vevaxeln (Kasab och Strzelec, 2020). Takterna som utgör cykeln är: insugningstakt, kompressionstakt, expansionstakt och avgastakt. Insugningstakten drar in en ny laddning i cylindern, en ventil öppnas precis innan insugningstakten börjar så att laddningen kan flöda in varpå kolven rör sig

nedåt och suger in laddningen och ventilen stängs precis innan kolven når sin lägsta punkt. Därefter inleds kompressionstakten, ventilerna hålls stängda och kolven rör sig uppåt vilket komprimerar laddningen. När laddningen är som mest komprimerad inleds förbränningen och trycket ökar snabbt. Efter detta inleds expansionstakten då kolven pressas ner av det höga trycket så att gaserna expanderar och överför arbete till vevaxeln. När kolven når sin lägsta punkt öppnas avgasventilen vilket inleder avgastakten. Under avgastakten rör sig kolven uppåt igen vilket pressar ut avgaserna genom den öppna avgasventilen, precis innan kolven når sin högsta punkt stängs avgasventilen så att nästa cykel kan börja.

Trots att fyrtaktsmotorer är tyngre, tar upp mer utrymme och är mer komplicerade används de till de flesta fordon, med undantag för mindre fordon (Mang och Wilfried, 2017). Detta beror mycket på att de har högre verkningsgrad samt är mer pålitliga än tvåtaktsmotorer (Abdo, 2011). Fyrtaktsmotorn håller även lägre temperatur generellt sett vilket bidrar till bättre livslängd.

#### 3.1.3 Extern bränsleblandning

Extern bränsleblandning, även kallat grenrörsinjektion är när bränslet och luft blandas externt från cylindern innan det injiceras för förbränning (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Extern bränsleblandning används bland annat av motorer med en förgasare eller enpunktsinsprutning. Däremot produceras inga bilar eller tyngre fordon längre där en förgasare används, nu används bränsleinjektion istället. För konventionella motorer uppstår problem med extern bränsleblandning då den förångade luft-bränsleblandningen kondenserar mot grenrören vid injicering vilket bidrar till en inhomogen distribution av bränslet till cylindrarna. Dagens bränsleinledning är en typ av inloppsgrenrör som tillsätter luft-bränsleblandningen direkt till insprutningsventilen vilket bidrar till en homogen bränsletillförsel och kompression. Motorer med gnistantändning kan använda extern bränsleblandning (port fuel injection (PFI)) (van Basshuysen och Schäfer, 2016), vilket förklaras i detalj i avsnitt 3.1.7.

#### 3.1.4 Intern bränsleblandning

Intern bränsleblandning betyder att luft injiceras i cylindern där det komprimeras av kolven, bränsle sprutas sedan in då luften har rätt tryck (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Den vanligaste användningen av intern bränsleblandning är hos dieselmotorer för kompressionsantändning. Däremot används även intern bränsleblandning ihop med gnistantändning, detta kallas direkt injektion med gnistantändning. I dieselmotorer kan fördelningen av bränslet under den interna bränsleblandningsprocessen vara relativt ojämn. Denna ojämn fördelning leder till att en ökad mängd bränsle förbränns, vilket resulterar i högre nivåer av utsläpp. Därför är det troligt att intern bränsleblandning kommer användas till bensin- istället för dieselmotorer i framtiden. Motorer med gnistantändning kan använda intern bränsleblandning i form av till exempel homogen direktinjicerad gnistantändning. Motorer med kompressionsantändning använder intern bränsleblandning i form av till exempel direktinjicerad kompressionsantändning (van Basshuysen och Schäfer, 2016), något som

även förklaras i detalj i avsnitt 3.1.8.

#### 3.1.5 Indirekt bränsleinjektion

En indirekt bränsleinjektion består av en primär och en sekundär förbränningskammare där den primära befinner sig som vanligt i cylindern och där den sekundära befinner sig ovanför både bränsleledningen och ventiler i topplocket (Atkins, 2009). Bränslet injiceras vid ett tryck på ungefär 300 bar till 400 bar in i den sekundära förbränningskammaren. Metoden används för att bidra med en homogen luft-bränsleblandning. En nackdel som medförs av förbränning av diesel med en indirekt bränsleinjektion är att det bildas sot som lägger sig i den sekundära kammaren i brist av luft vid höga temperaturer. Motorer med indirekt bränsleinjektion representerar en stor del av snabba och medium-snabba motorer (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Därför används motorerna med indirekt bränsleinjektion oftast på personbilar och lätta lastbilar (Rizvi, 2009). Det finns olika versioner av indirekt bränsleinjektion där en har en vanlig förkammare med ett utrymme, en annan sort är en med en virvelkammare där kammaren är disk-formad, sfärisk eller oval.

#### 3.1.6 Direkt bränsleinjektion

Vid direkt bränsleinjektion sprutas bränslet in direkt i förbränningskammaren för att blandas med luften under kompression (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Bränslet sprutas in under högt tryck med elektroniskt kontrollerade bränsleinjektorer, denna metod skapar ett relativt bra bränslemoln i kammaren vilket bidrar till en pålitlig tändning. Det är fördelaktigt att använda direkt injektion för att nå en bränslesnål förbränning eftersom bränsleinjektionens höga tryck snabbt kyler ner bränsleblandningen då den expanderar vilket kyler ner kammarens väggar och i sin tur möjliggör högre kompression. Denna nedkylning medför även en reducerad risk för baktändning vid full belastning. Beroende på vart injektorn är placerad finns det olika typer av direkt injektion. En metod är högtrycks direktinjektion med väggorienterad injektion. Vid denna metod sprutas bränslet in från sidan för att träffa kolven. Kolven är här formad på ett sätt där bränslet reflekteras för att träffa tändstiftet. En annan metod använder högtrycks direktinjicering med jet-orienterad insprutning där insprutningen sker från mitten av taket på kammaren precis bredvid tändstiftet. Denna andra nämnda metoden har visat sig som den mest bränslesnåla.

#### 3.1.7 Gnistantändning

Hos en motor som använder sig av gnistantändning påbörjas själva förbränningsprocessen av bränslet med hjälp av ett tändstift (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Vanligtvis utgörs bränslet i en gnistantändningsmotor av bensin. Tändstiftet antänder via en elektrisk urladdning under slutet av kompressionscykeln, vilket påbörjar förbränningsfasen. De komponenter som möjliggör en gnistantändning är:

- Tändspole som högspänningskälla.
- Tändstift som elektrod, placerad i förbränningskammaren.

Vid antändning bildas en plasmakanal med hög temperatur mellan spänningskällan och elektroden. Resultatet blir en exotermisk reaktion som utvecklar en snabbt expanderande flamma, som sedermera förbränner bränslet i förbränningskammaren.

Konventionella antändningssystem förser vanligtvis en energimängd på minst 40 mJ under 1 ms vid tändstiftet för att säkerställa att antändning sker felfritt. Ofta är bränsleblandningen ej helt homogen och kan innehålla syre eller återanvänd gas vilket medför ej ideala förhållanden. I fallet för detta projekt då vätgas används som bränsle kommer antändningsenergin vara något annat då denna varierar mellan olika bränslen, utöver detta måste även mycket större krav sättas på att syre ej blandas med vätgasen vilket även medför att bränslet blir mer homogent.

#### 3.1.8 Kompressionsantändning

Det andra alternativet är en kompressionsantändning och detta sker genom att bränsle sprutas in i förbränningskammaren när förgasen (laddningen) i denna har högt tryck och hög temperatur, vilket medför att bränsleblandningen börjar förbrännas (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Förgasen syftar här på den gasblandning som transporterats in till förbränningskammaren under insugningstakten och består antingen av luft eller en blandning av luft och bränsle. Förbränningen sker, precis som för gnistantändningsmotorer, under slutet av kompressionscykeln. Det traditionella bränslet som används i denna typ av motorer är diesel. Man brukar kalla den tid som går från att bränslet sprutas in till att den automatiska antändningen sker för antändningsfördröjning, och under denna korta fas sker en rad komplexa fysiska och kemiska delprocesser så som förångning samt blandning av ingångsämnen. Detta leder direkt till att antändningen är beroende av startvillkoren för bränsleblandningen i förbränningskammaren. Dessa startvillkor följer nedan.

- Tryck och temperatur hos förgasen i förbränningskammaren innan bränslet har sprutats in.
- Temperatur, viskositet, förångningsegenskaper samt antändbarhet hos bränslet.
- Tryck, tid och karaktär hos insprutningen, samt geometrin hos munstycket som injekterar bränslet in i kammaren.
- Laddningens rörelse.
- Laddningens sammansättning.
- Geometrin hos förbränningskammaren.

Kompressionsantändningen startar lokalt i de delar av kammaren där bränslet har avdunstat helt (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Under denna fas brukar insprutningen fortsätta samtidigt som förgasen (laddningen) i kammaren och det bränsle som sprutas in blandas. Det är temperaturen inne i förbränningskammaren som bestämmer antändningsfördröjningen samt tillhörande processer. Starten för kompressionsantändningen måste optimeras utifrån mängden utsläpp som blir från gaserna, bränsleförbrukning, prestanda samt ljudet detta medför. Kompromisser krävs för att skapa en så effektiv lösning som möjligt.

Gällande insprutningsmotorer finns framförallt två olika typer, anpassade till personbilar respektive tyngre fordon så som lastbilar och bussar (van Basshuysen och Schäfer, 2016). För personbilar kompletteras en insprutningsmotor med en elektrisk motor för att möjliggöra kallstart av motorn. Motorns uppbyggnad beror på en rad olika parametrar, så som konstruktionstyp av motorn (DI/IDI), antalet cylindrar, kompressionsförhållandet, injektionssystem med mera. Hos tyngre fordon som använder insprutningsprincipen brukar en upphettningssläns ingå som komponent i motorsystemet för att möjliggöra kallstart samt reducera gasutsläppen. Dessa är elektriska. Principen bygger på att ha en upphettningssläns (0,5 kW - 2 kW) med tillhörande kabel installerad intill eller inuti insprutningsventilen. Denna konverterar elektrisk energi till värme som värmer upp bränslet innan det sprutas in i förbränningskammaren. Slänsarna består vanligtvis av någon form av metall eller keramiskt material. Ett krav för diesel är att slänsen värmer upp bränslet med minst 30°C ökning för att en kompressionsantändning ska kunna ske.

## 3.2 Hur väte förhåller sig till de olika motortyperna

För en vätdriven förbränningsmotor är det inte etablerat vilken typ av motor som passar bäst för användning i olika fordon, därför är det av intresse att jämföra och identifiera olika motorsystem där vätd används som drivmedel (Jonas Wärnberg, personlig kommunikation, 23 mars, 2023). Studier har gjorts där en bensindriven förbränningsmotor med gnistantändning byggdes om till att istället förbränna vätd (Kahraman m. fl., 2007). Motorn som användes i studien använde extern bränsleblandning i form av en förgasare där ett vattenlås användes för att eliminera risker för baktändning, motorn var dock experimentell och det är sannolikt att en annan konfiguration skulle användas i en kommersiell motor. Det är alltså möjligt att använda en motor med gnistantändning och extern bränsleblandning.

När en motor använder extern bränsleblandning så kommer bränslet i direkt kontakt med inloppsgrenröret vilket inte är fallet för en motor som använder intern bränsleblandning (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Enligt Jonas Wärnberg (personlig kommunikation, 23 mars, 2023) på Volvo Group fanns det flera användbara metoder för injicering av vätdgasen i motorn där de olika hade varierade egenskaper. Däremot betonade Jonas att direktinsprutning är den mest sannolika metoden för bränsletillförsel i framtida vätdgasmotorer. Eftersom direktinsprutning är den vanligaste insprutningsmetoden idag på grund av dess precision i bränsletillförseln (avsnitt 3.1.6), innebär detta att vätdgasmotorer som injicerar bränslet via inloppsgrenröret kan uteslutas från vidare analys i arbetet. Det bör däremot nämnas att det finns fördelar med att använda injektion via grenröret och att det är smidigt för en motorproduktion att ställa om till vätddrivna motorer.

Eftersom tvåtaktsmotorer har visat sig användas i högst utsträckning i mindre motorer till lätta tvåhjulfordon och verktyg, kommer det inte finnas något större intres-

se att undersöka dessa motorer (Mang och Wilfried, 2017). Detta på grund av att det största intresset för vätgasmotorer ligger hos tyngre fordon. En sak som Jonas Wärnberg (personlig kommunikation, 23 mars, 2023) tryckte på var att det finns ett intresse i att ersätta de dieselmotorer som används i fordon för fjärrtransport. Då fokus ligger hos tyngre fordon kommer tvåtaktsmotorer uteslutas. På grund av skillnaden i konstruktion hos två- och fyrtaktsmotorer kommer vevaxel, vevstake samt vevhus inte att analyseras då de inte utsätts för vätgas kopplat till förbränningen.

Om en vätgasmotor bör använda gnistantändning eller kompressionsantändning för att antända bränslet är en fråga under diskussion. Det finns för- och nackdelar med båda alternativen. Kompressionsantändningsmotorer tenderar förbruka mindre bränsle, använda bränslet mer effektivt och till en följd av detta - att släppa ut mindre avgaser (Threewitt, 2022). Samtidigt har diesel högre energidensitet än bensin vilket kan förstärka fördelarna. Motorer med kompressionsantändning har blivit mer och mer aktuellt genom åren då dess funktion har utvecklats och effektiviserats. En kombination av att kompressionsmotorer behöver konstrueras mer robust för att kunna hantera de extrema kompressionsförhållandena, och att motorn arbetar med lägre varvtal, leder till att de generellt sett har längre livstid än gnistantändningsmotorer (Valvoline, 2020). Å andra sidan har gnistantändningsmotorer fördelar som innefattar lägre tillverkningskostnad och tystare motorljud. De brukar även anses släppa ut mindre mängd kväveoxider än kompressionsmotorer men detta beror mer på skillnaderna mellan bensin och diesel, och inte själva motortyperna. Ett problem med gnistantändning vid användning av vätgas är dock risken för baktändning (Folkson och Sapsford, 2022), och detta är något som anses kan lösas med direktinsprutning. En utmaning med vätgas som alternativ till diesel i en kompressionsantändningsmotor är de stora skillnaderna i antändningstemperatur. Hos diesel ligger denna temperatur på cirka 250 °C, jämfört med cirka 585 °C hos vätgas (Babayev m. fl., 2022). För att självantändningen ska kunna ske krävs att bränslet komprimeras tills självantändningstemperaturen nås. Problemet är att vätgasen behöver komprimeras mer än vad som är praktiskt rimligt. Ett alternativ är att kombinera processerna, och skapa en hybridmotor, som låter förgasen komprimeras maximalt för att sedan spruta in bränsle och låta ett glödstift antända gasen.

### 3.3 Vätebärare

Väte som bränsle har en del mycket önskvärda egenskaper, exempelvis hög gravimetrisk energidensitet (Dicks och Rand, 2018). Väte har dock också en hel del egenskaper som gör det svårt att använda som bränsle, huvudsakligen mycket låg volymetrisk energidensitet. Den volymetriska energidensiteten kan ökas genom att komprimera vätet eller kyla ner det tills det blir flytande, men även i dessa former är dess volymetriska energidensitet 5,6 MJ/L för komprimerad gas vid 700 bar jämfört med 32 MJ/L för bensin (“Hydrogen - A sustainable energy carrier”, 2017). Även i flytande form är den volymetriska energidensiteten för väte 8 MJ/L. Väte har även väldigt låg antändningsenergi samt kan antända i ett brett koncentrations-

spann (Rhodes, 2022). Detta gör att väte väldigt lätt antänder kombinerat med det faktum att väte väldigt lätt läcker gör att väte har en hög explosionsrisk. Dessa problem går till viss del att undvika genom att använda vätebärare (Dicks och Rand, 2018).

#### 3.3.1 Ammoniak

En vätebärare som ofta föreslås är ammoniak ( $NH_3$ ) (Dicks och Rand, 2018). Ammoniak har en relativt hög massandel väte och är en vätska i rumstemperatur vid ett tryck på under tio atmosfärer (EngineeringToolBox, u. å). Genom att låta ammoniak flöda förbi en katalysator i hög temperatur spjälkas ammoniak till kväve och väte ( $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$ ) (Dicks och Rand, 2018). I praktiken kan inte all ammoniak spjälkas och en viss mängd ammoniak kommer finnas kvar i bränslet när det injiceras i motorn.

#### 3.3.2 Organiska vätebärare

Många organiska ämnen kan användas som vätebärare. En grupp ämnen som ofta föreslås är cykliska kolväten, exempelvis cyklohexan ( $C_6H_{12}$ ) som genom en relativt enkel process kan brytas ned till bensen och väte ( $C_6H_{12} \rightarrow C_6H_6 + 3H_2$ ) (Dicks och Rand, 2018). Reaktionerna för att utvinna vätet sker ofta vid höga temperaturer vilket kan leda till krackning som genererar oönskade biprodukter i form av korta kolväten (ofta i gasform) som blir svåra att separera från vätgasen till skillnad från exempelvis cyklohexan som är flytande vid rumstemperatur i atmosfäriskt tryck.

#### 3.3.3 Metalliska vätebärare

Metalliska vätebärare är huvudsakligen olika metallhydrider, dels finns enklare hydrider, exempelvis litiumhydrid ( $LiH$ ), men även mer komplexa hydrider som litiumaluminiumhydrid ( $LiAlH_4$ ) (Dicks och Rand, 2018). Många hydrider reagerar snabbt med vatten och bildar väte och någon biprodukt, ofta något salt, andra hydrider reagerar vid uppvärmning och bildar vätgas. Gemensamt är att metalliska vätebärare lämnar en biprodukt i fast form, detta gör det väldigt lätt att skilja vätgasen från biprodukten och vätgasen som leds in i motorn kan antas inte innehålla biprodukter från vätebäraren.

#### 3.3.4 Vätebärare till förbränningsmotorer

Informationen kring vätebärare i detta arbete är till stor del kopplat till lagring då det inte finns så mycket offentlig information gällande vätebärare för förbränningsmotorer. Då det inte finns någon tydlig information om vilken eller vilka vätebärare som skulle kunna användas för en förbränningsmotor kommer rapporten inte djupare undersöka dess potentiella påverkan på materialen.

# 4

## Hur väte påverkar komponenternas material

I detta kapitel kommer fokus läggas på de material som konventionella förbränningsmotorer vanligtvis består av och hur de påverkas av väterelaterade problem. Många av de materialen som används i traditionella förbränningsmotorer, så som gjutjärn eller stål, har i många sammanhang påvisat att de påverkats negativt av väteförspädning och spänningskorrosion. Resultatet av detta leder till att andra potentiella material behöver analyseras då dessa kan konstateras vara mer resistenta mot väterelaterade problem. Några exempel på sådana material är koppar samt dess olika legeringar, austenitiska rostfria stål och aluminiumlegeringar. Sammanfattningsvis kommer bedömningar göras på de olika materialen för att se om de eventuellt skulle kunna användas i en vätgasmotor.

### 4.1 Gjutjärn

Gjutjärn är väldigt känsligt för väteabsorption under gjutningsprocessen då järnet är i smält form. För att minimera riskerna krävs noga designade gjutformar (Orlenius m. fl., 2008). Väte byggs upp i austeniten i hypoeutektiska gjutjärn under solidifiering och när austeniten bryts ner under kylning agerar grafiten i gjutjärn som fällor för vätgasen (Sahiluoma m. fl., 2021).

Stora mängder väte samlas i gränsskiktet mellan grafitnodulerna och ferritfasen i materialet (Sahiluoma m. fl., 2021). Vätet inducerar här sprickor som propagerar mellan nodulerna under pålagd last. Vid töjspanningar är teorin att hålrum bildas runt grafitnodulerna som i väteladdat gjutjärn fylls med vätgas. Väte påverkar den lokala plasticiteten och får sprickor att bildas. Spänningsinducerad diffusion av väte från grafiten till sprickfronten uppstår. Då diffusionsmekanismen är långsam i rumstemperatur sker detta särskilt vid låga töjningshastigheter. En annan teori kring sprickinitiering i gjutjärn är att väte lätt diffunderar i ferrit. Grafitnodulerna kan då ledigt absorbera vätet och bli mättade. Gastrycket i grafiten kan leda till att nodulerna separerar från ferritgittret vilket medför att sprickor bildas och initierar ett sprött brott.

Ökad mängd väte ökar mängden sprickor samt längden till vilken sprickorna propagerar (Sahiluoma m. fl., 2021). De duktila egenskaperna hos järnet försämras markant för väteladdat gjutjärn jämfört med icke-laddat gjutjärn. Brottytan visar på

typiskt sprött utseende kontra det duktila utseendet för icke-laddat segjärn.

I dragtester utförda på väteladdat nodulärt gjutjärn (segjärn) har det fastställts att väte påverkar duktiliteten negativt (Matsunaga m. fl., 2014). Samma studie tillsammans med en annan visar på att segjärn som laddas elektrokemiskt med väte klarar ungefär en halverad töjning till brott jämfört med utan att laddas med väte (Sahiluoma m. fl., 2021). Detta stöds även av ytterligare en studie som undersöker tre olika typer av segjärn som katodiskt laddats med väte (Usuda m. fl., 2013). Studien visar att duktiliteten minskar med 33% - 59% samt att brottgränsen minskar med 3% - 14%. För de material som undersöks i studien påverkas duktiliteten och brottgränsen mer för material med en större andel perlit och mindre andel ferrit.

Studier om andra typer av gjutjärn kopplat till väteskador har inte hittats. Det går inte med säkerhet att dra några slutsatser om exempelvis grått gjutjärn utifrån informationen, då vissa skillnader i legeringselement och grafitstruktur finns.

## 4.2 Stållegeringar

Stållegeringars motstånd mot väteförsprödning minskar generellt med ökad sträckgräns (Gangloff och Somerday, 2012), det vill säga ökad hållfasthet. Jämförelser mellan olika mikrostrukturers och legeringselements påverkan på väteförsprödning har sammanfattats i en rapport från 2018 (Depover m. fl., 2018). Höghållfasta stål med olika strukturer jämförs, såväl som FeC-legeringar faser och mikrostrukturer samt olika Fe-X-C-legeringar för att se karbidens inverkan på väteförsprödning. Alla prover laddades katodiskt i studierna.

Två höghållfasta stål undersöktes, med följande mikrostruktur: high strength low alloy (HSLA) med  $Fe_3C$  i ferrit samt Nb- och Ti-baserade karbonitrider och transformation induced plasticity (TRIP) med martensit, ferrit, bainit och restaustenit (Depover m. fl., 2018). TRIP och HSLA är stålvarianter som ofta används till plåt jämfördes med varandra i dragtester i ett väteladdat tillstånd. HSLA förlorade 8% duktilitet medan duktiliteten hos TRIP minskade med 60%. Detta kopplar författarna till bland annat närvaron av Ti- och Nb-baserade utfällningar som agerar fällor för vätet, vilket minskar lösligheten av vätet i övriga metallgittret för HSLA. Karbider anses öka motståndet mot väteförsprödning (Nagao m. fl., 2014). TRIP-stålet innehåller vissa mängder restaustenit som under dragbelastning omvandlas till martensit (Depover m. fl., 2018). Austenit har högre löslighet av väte än de andra faserna i stål. Vid omvandlingen ärver den nybildade martensiten vätet. Martensit är den fas av stål som påverkas mest av väte i medel- och höghållfasta stål (Hirth, 1980). I fallande ordning påverkas ståls faser av väte: martensit, perlit, härdad och anlöpt martensit och bainit. För TRIP-stålet uppstod 85% av sprickorna i eller runt martensitfasen (Laureys m. fl., 2016).

Labbgjutna Fe-C-legeringar med 0.2% kolhalt undersöktes för att se inflytandet av enskilda stålfaser eller mikrostrukturer på väteförsprödning (Depover m. fl., 2018). Dessa var av martensit, bainit och perlit. Den minskade duktiliteten för marten-

#### 4. Hur väte påverkar komponenternas material

sit, bainit och perlit var 22%, 21%, respektive 52%. Detta tycks säga emot Hirth om att martensit påverkas mest av väteförsprödning. Dock är det mest en tumregel, samt att han inte specificerar just duktilitet utan materialets ”känslighet” för väteförsprödning. Hirth skriver även om höghållfasta stål med betydligt fler legeringselement.

Sist diskuterades undersökningar av olika Fe-C-X-legeringar (Depover m. fl., 2018). Karbider i stål agerar platser för att fånga vätet vilket hindrar det från att diffundera ut i metallgittret. Karbiderna blir irreversibla fällor för vätet där det gör mindre skada än i resterande gitterstruktur.

I (Gangloff och Somerday, 2012) finns en mängd studier sammanställda för framför allt ståls utmattningsegenskaper kopplade till väte. Dessa finns sammanställda i tabell 4.1. Studierna fokuserar på högcykelutmattning till ett fixt antal cykler som jämför spänningsamplituden materialet klarar av i oladdat tillstånd kontra laddat med vätgas. I tabellen är  $N$  antalet cykler,  $\sigma_A$  spänningsamplituden i MPa och  $B_H$  är kvoten mellan spänningsamplituden i laddat tillstånd jämfört med oladdat tillstånd.

**Tabell 4.1:** Tabell över data för högcykelutmattning sammanställd från Gangloff och Somerday, 2012

Legering	Testmiljö	$N$	$\sigma_{A,oladdat}(MPa)$	$\sigma_{A,laddat}(MPa)$	$B_H$
<b>Ferritiskt-perlitiskt stål</b>					
Fe-C	Förladdad	$10^7$	225	225	1
<b>Martensitiska stål</b>					
C-Mn	Katodisk, luft	$10^7$	480	390	0.81
SAE52100	Förladdad	$10^7$	990	325	0.33
Fe-C-Si-C	Förladdad	$10^6$	590	570	0.97
Fe-C-Mn	Förladdad	$10^7$	600	400	0.67
Cr-Mo stål	Vätgas, luft	$10^7$	500	500	1
Cr-Mo stål	Förladdad	$10^7$	625	375	0.6
<b>Austenitiska stål</b>					
304 SS	Vätgas, luft	$10^7$	450	414	0.92
Kh17N50	Vätgas, luft	$10^7$	475	400	0.84
<b>Specialstål</b>					
Fe-C-Cr-Ni	Förladdad	$10^7$	675	450	0.67
12-10 maråldrat	Vätgas, luft	$10^7$	440	450	1.02
Mar M 247	Vätgas, luft	$10^7$	920	690	0.75
Waspaloy	Vätgas, helium	$10^6$	630	590	0.94
Fe-C-Cr-Mo-V-Nb	Vätgas, luft, vakuum	$10^4$	650	380	0.58
Fe-9Cr-1W-TaV	Katodisk	-	-	-	0.35

Tabellen sammanställer en mängd olika legeringar från olika typer av stål. Den ska inte tolkas som representabel för exempelvis alla martensitiska eller austenitiska stål,

utan visar endast enstaka experiment på enskilda legeringar. Det som är intressant med tabellen är att  $B_H$  kan variera väldigt, baserat på hur materialet laddas med väte samt materialets sammansättning. Framför allt kan noteras från tabellen att de flesta legeringsars utmattningsgräns påverkas av väte, och särskilda legeringar påverkas till en hög grad, där en legering visar ett  $B_H$  på 0,35.

Exempelvis är datan för Cr-Mo-stålen från olika studier som använder samma legering (SCM435). Vätgastestet utfördes i rumstemperatur och 45 MPa (WADA, 2005). Denna studie visade stor påverkan på lågcykelutmattning där töjningen var större, men ingen skillnad på utmattningsgränsen på materialet för högcykelutmattning. Det andra experimentet använde katodisk laddning för att uppnå 10 ppm väte i materialet 1,5 timmar efter laddning (Murakami och Matsunaga, 2006). För vätgasmotorer är testerna genomförda i vätgas av särskilt intresse. Dock genomfördes testerna på exempelvis båda de austenitiska stålen i rumstemperatur, vilket inte är representabelt för förhållandena som råder under förbränning (Tkachev m. fl., 1998), (Fukuyama m. fl., 1985).

### 4.2.1 Martensitiska höghållfasta stål

När hållfastheten ökar i ett material ökar generellt drivkraften för väte att diffundera till spänningskoncentrationer (Gangloff och Somerday, 2012). Martensit innehåller mycket gränsskikt mellan martensitkorn, dislokation och ferrit-cementit gränsskikt som håller väte tills att det kan diffundera till spänningskoncentrationer. Dessa bidrar till hög hållfasthet i materialet men också till fällor för väte att samlas och bidrar till försprödning. Högre kolhalt ökar även dislokationstätheten och ökar tendensen till försprödning. Enligt författarna till boken bör martensitiska och ferritiska höghållfasta stål ej användas i vätemiljöer med högt tryck.

Substitutionell lösningshärdning av martensitiska stål kan påverka lösligheten av väte (Gangloff och Somerday, 2012). Följande ämnen minskar diffusiviteten av väte i ökande ordning:  $Co < Si < Cr < Al < Ni < Mo < V$ . Karbider kan elastiskt binda med vätet med en högre energi än drivkraften för väte att förspröda materialet. Nämnvärda karbider har en ökande förmåga att hindra väteförsprödning:  $Mo_2C < VC \ll TiC < NbC$ . Särskilt  $NbC$  och  $TiC$  är effektiva mot väteförsprödning. I tabell 4.1 finns en mängd martensitiska ståls utmattningsgränser sammanställda. Tabellen visar särskilt att martensitiska stål som laddas elektrolytiskt kan få stor påverkan på hur höga laster materialet klarar ur en utmattningssynpunkt.

### 4.2.2 Rostfria stål

Rostfria stål är stållegeringar som innehåller mer än 10% krom som legeringsämne, men kan innehålla upp mot 25% krom (Grubb, 2020). Det finns olika typer av rostfria stål som främst är uppdelade efter mikrostruktur. Vanligast är austenitiska rostfria stål. Dessa har högt korrosionmotstånd och innehåller höga halter nickel, från 8% upp till 35% (Augustyn, 2022). Austenitiska rostfria stål har bra vätemotstånd och en lång historia av att användas till förvaring och transport av vätgas

(Gangloff och Somerday, 2012). Ferritiska, martensitiska och duplexa rostfria stål påverkan från väte är likt höghållfasta stål med motsvarande mikrostruktur, och behandlas därmed inte i detta kapitel.

Austenitiska rostfria stål har en FCC-struktur som gör att väte löser sig mer och diffunderar till lägre grad än hos BCC-stål (Gangloff och Somerday, 2012). Väteförspredning i austenitiska rostfria stål kopplas ibland till stabiliteten hos austeniten i materialet från att övergå till martensit vid deformation. Detta är dock inte helt fastställt. Höga nickelhalter i materialet motverkar väteförspredning. Nickel stabiliserar austenitfasen i stålet, vilket ger materialet sin FCC-struktur. Det krävs ungefär 8% eller högre nickel i legeringen för att austeniten ska stabiliseras nog att materialet blir austenitiskt. Nickel är en effektiv austenitstabilisator, och påverkar deformationsbeteendet hos materialet på ett sätt som är gynnsamt i motstånd mot väteförspredning.

Makrosegregation ger ökar känsligheten för väteförspredning. Homogeniserade smidda detaljer uppvisar bättre motstånd mot väteförspredning än material som uppvisar makrosegregation. Ett exempel på detta är sensitisering, då karbider löses ut i korngränser vid höga temperaturer, som vid svetsning.

En studie gjordes där ferritiskt rostfritt stål 1.4005IA som förladdats med väte testades i vätemiljöer med ett tryck på 1 MPa (Schauer m. fl., 2015). Studien visade att duktiliteten minskade med 13% och att brottgränsen var opåverkad. I studien testade även för utmattning och fann att utmattningsgränsen var inte märkbart påverkad men för högre spänningar klarade det väteladdade provet färre cykler än det som inte laddats med väte, skillnaden mellan väteladdat och inte väteladdat tycks öka med högre spänningar.

### 4.3 Nickellegeringar

Som nämnt ovan bildas austenit när en tillräckligt stor mängd nickel adderas till ett rostfritt kromstål (Nickel Institute, 2000). Austenit är både starkare och tål högre temperaturer än ferrit. Nickel ökar även motståndet mot nitrering, uppkolning, oxidation och termisk utmattning för det rostfria stålet. Dessa egenskaper gör att nickellegeringar är användbara i miljöer som till exempel en förbränningsmotor. Mängden nickel som adderas till ett stål kan variera mycket för att utvinna olika egenskaper hos ett material, på samma sätt kan andra material ihop med nickel adderas till ett stål för att uppnå andra specifika egenskaper. Detta gör att det finns en mängd olika nickellegeringar att undersöka med intressanta egenskaper.

Nickel-kromlegeringar och nickelbaserade superlegeringar har låga termiska expansionskoefficienter och är vanligt förekommande i särskilda komponenter i förbränningsmotorer. Detta är komponenter som utsätts för höga temperaturer, som ventiler och i turbon (Smith, 1998). Nickel-kromlegeringar har ett väldigt bra motstånd mot korrosion och oxidation. De nickelbaserade superlegeringarna kan karaktäriseras genom deras höga spänningstålighet under hög temperatur.

I (Gangloff och Somerday, 2012) diskuteras väteförsprödning som en funktion av temperaturen för några nickelbaserade superlegeringar. Utav de legeringar som nämns är Inconel 718 den enda som vanligtvis förekommer i förbränningsmotorer. För Inconel 718 ökar väteförsprödningen gradvis mer för temperaturer under 0 °C där det vid ungefär -150 °C når en HEE index på 1. HEE index är en jämförelse av förminskningen på tvärsnittsarean av två olika provbitar, det vill säga en väteladdad och en icke väteladdad, där index 1 är högst och index 0 är lägst förändring. Minst påverkad av väteförsprödning var Inconel 718 mellan 0 °C och 100 °C där HEE indexen når ett värde på omkring 0.2. För en förbränningsmotor nås däremot högre temperaturer för många komponenter, vid 600 °C når HEE indexet ungefär 0.7 vilket är relativt högt jämfört med fallet vid 0 °C till 100 °C.

I (Hardy m. fl., 2016) undersöktes utmaningar som finns för nickelbaserade superlegeringar som väteförspröds. Det konstateras att nickelbaserade superlegeringar är kända för att vara väldigt temperatur- och trycktåliga material vilket gör det till ett användbart material i exempelvis djupa olje- och gasbrunnar. Däremot framkom det att en stor utmaning fortfarande är hur man ska motverka den väteinducerade försprödningen när materialet utsätts för hydrering. För att undersöka de mekaniska förändringarna genomförde (Hardy m. fl., 2016) ett dragprovstest. Testet som utfördes var att undersöka hur mikrostrukturen på metallen Inconel 718 betedde sig vid ett dragprov vid kontakt med väte samt för att observera hur väteförsprödning beter sig vid dragprov med konstant töjningshastighet. Ett dragtest gjordes på en bit Inconel 718 i rumstemperatur och ett där en likadan bit utsattes för väteladdning. De båda metallstängerna drogs ut med en längdökning på 3%. Efter testerna kunde några slutsatser dras. En slutsats var att de små deformationerna hos den legeringen som inte blev utsatt för väte var mer utspridda än deformationerna hos den legeringen som blev väteladdad. Den väteladdade stångens deformationer var lokala dislokationsglidningar som efter en tids utdragning resulterade i sprickor vilket enligt (Dong m. fl., 2023) med hjälp av metoden HELP (som är ett mått för att mäta mekanismerna hos väteförsprödning) bevisar att den väteladdade legeringens mekanismer blivit påverkade. Den väteladdade legeringsstången nådde en töjning på 3.5% innan den nådde brott. Den stången som inte utsattes för väte nådde en töjning på 15% utan att det nämndes att något brott uppnåddes.

### 4.4 Aluminiumlegeringar

Det har bevisats att aluminium och aluminiumlegeringars egenskaper påverkas av väteförsprödning (Ambat och Dwarakadasa, 1996). Väteförsprödning har också stor påverkan på spänningskorrosionsprickbildning. Olika typer av defekter i kristallstrukturen, såsom gittervakanser och dislokationer kan potentiellt tillåta vätet att fastna i aluminiumet. Vid gjutning av aluminium är väte ett återkommande problem. Porer kan bildas efter att smältan har absorberat vätgasen och stelnat, vilket skapar porositet hos den gjutna detaljen. Vid förbränning av vätgas i en motor är detta inte ett problem.

Vid rumstemperatur är diffusionen av väte i aluminium väldigt liten och har ingen märkbar påverkan på materialegenskaperna. Väte absorberas in i aluminium främst i våta förhållanden (Gangloff och Somerday, 2012). Torr vätgas leder inte till betydande diffusion in i materialet. Vattenånga och våt kontakt med syror medför störst absorption av väte i aluminium. Hur väteförsprödning påverkar aluminiumet beror generellt på omgivningstemperaturen, töjningshastigheten och materialets mikrostruktur. Smidda aluminiumlegeringar av 7000-serien har studerats noggrant och det har bevisats att väteförsprödning skapade intergranulära sprickor i dessa legeringar. Aluminiumlegeringsserien 7000 innehåller zink som legeringsämne och när man blandar med magnesium får man en värmebehandlingsbar legering med hög styrka.

Vid experiment har det observerats att när Al-Zn-Mg legeringar utsätts för fuktig luft kan fenomenet reversibel väteförsprödning sättas igång. Korngränsutfällningar som  $MgZn_2$  är ställen där väte kan fastna. Vätebubblor vid korngränserna, som är associerade med dessa partiklar, ligger inte bakom väteförsprödningen men kan initiera sprickor vid last under sträckgränsen. Aluminium som har blivit laddat med väte och utsatt för dragprov visade minskning av duktilitet vilket varierar med töjningshastigheten och temperaturen. Vid ökning av töjningshastigheten är den försämrade duktiliteten mindre beroende av vätet. En studie av aluminium legeringen 7050 visade att duktiliteten minskade med omkring 44% och att brottgränsen minskade med omkring 34% när metallen blivit laddat med väte. (Qi m. fl., 2015). En annan studie på legeringen 2091 visade att duktiliteten minskade med 13% och att brottgränsen minskade med 11% (Ambat och Dwarakadasa, 1996). Ytterligare en studie på en Al-Cu-Mg legering visade att brottgränsen inte påverkades märkbart och att duktiliteten minskade med 15% (Barannikova m. fl., 2017).

### 4.5 Kopparlegeringar

Koppar är en ädel metall som i ren form kan motstå korrosion i många olika typer av miljöer. Koppar brukar legeras med andra metaller för att uppnå önskvärda materiella egenskaper. Detta riskerar att leda till begränsade användningsmöjligheter då väteförsprödning och korrosionssprickor kan uppstå (Davis, 2001). Risken för väteförsprödning varierar mellan de olika kopparlegeringarna men allmänt brukar koppar och kopparlegeringar anses vara immuna mot väteförsprödning (Francis, 2010). Denna slutsats kan göras då koppar och dess legeringar har en låg absorptionskoefficient för väte. En låg absorptionskoefficient innebär att vätet nästan inte diffunderar in i materialet.

Sprickbildning till följd av spänningskorrosion är ett vanligt förekommande problem i mässing (Davis, 2001). Mässingstyper som innehåller mer än 15% zink riskerar att påverkas av detta i större utsträckning än de legeringar som har en mindre zinkhalt. I koppar och de kopparlegeringar som ej innehåller zink uppstår vanligtvis inte sprickbildningar från spänningskorrosion. Det har dock påvisats under tester att vissa kopparnickel-legeringar riskerar påverkas av väteförsprödning om de utsätts

för spänningar (Francis, 2010). Författaren hänvisar till dragtester som utfördes av BNF Metals Technology Centre på två kopparlegeringar - Alloy 400 (UNS N04400) och K-500 (UNS N05500). Dragtesterna gjordes på 1980-talet då legeringarna användes i fästnanordningar på oljefält placerade i Nordsjön. Teorin var då att dessa legeringar kunde motstå väteförsprödning väl. Det upptäcktes dock att dessa komponenter riskerade försprödning. På grund av den speciella miljön och de spänningar materialet utsattes för uppstod väteförsprödningen.

I en artikel publicerad 2016 (Yamabe m. fl., 2016) redovisar författarna en viss höghållfast berylliumbrons-legering som visat sig vara resistent mot väteförsprödning. Det nämns att det tidigare inte har funnits material med en sträckgräns på minst 1000 MPa som samtidigt varit resistent mot väteförsprödning. Berylliumbrons-legeringen har utskiljningshårdats för att ge det höghållfasta egenskaper, något som resulterat i en sträckgräns på 1400 MPa. Vidare diskuteras att en hög sträckgräns hos ett material kan leda till lägre vikt hos olika komponenter då exempelvis väggarna hos ett rör kan göras tunnare. Detta är aktuellt för komponenter i en förbränningsmotor då man ofta prioriterar att minimera vikten hos motorn och användandet av material. Ett problem med detta material är att beryllium är giftigt, något som kan vara problematiskt om materialet skulle komma att användas i en förbränningsmotor (Beaver och Trautman, 2019).

I (Gangloff och Somerday, 2012) har utmattningsdata sammanställts för 70Cu-30Ni som testats i en vätgasmiljö. Under studien undersöktes vilken spänningsamplitud vid vilken provet klarade att överleva  $10^6$  cykler. I oladdat tillstånd klarade legeringen av en spänningsamplitud på 149 MPa och i laddat tillstånd jämfört med 143 MPa i laddat tillstånd. Under laddat tillstånd klarar materialet av 96% lasten i oladdat tillstånd, vilket tyder på goda utmattningssegenskaper i vätgasmiljö.

Sammanfattningsvis är koppar och dess olika legeringar potentiella material som kan användas i vätgasmotorer då de rent allmänt har låg absorptionskoefficient för väte. Däremot behöver man studera exakt vilka spänningar som aktuella komponenter kommer utsättas för då det kan ge upphov till väterelaterade problem. Samtidigt har olika typer av kopparlegeringar tagits fram som varit både väteresistenta och haft höghållfasta egenskaper.

### 4.6 Magnesiumlegeringar

Lätta magnesiumlegeringar är ett bra val av material i vissa applikationer där bränseleffektivitet är nödvändig utan att göra avkall på prestanda (Liu m. fl., 2017). Detta gäller bland annat flygindustrin där magnesium används idag i viss utsträckning. Dock finns det en del utmaningar med magnesiumlegeringar som begränsar dess användningsområden och i vilken omfattning de används. Lågt korrosionsmotstånd är ett problem för magnesium och dess legeringar. Låg duktilitet är ett annat problem för magnesium, vilket har att göra med dess HCP kristalstruktur som gör det svårare för dislokationer att röra på sig. Detta medför att magnesiumlegeringar i stort sett alltid gjuts. Andra problem med magnesium är hög anisotropi (det vill säga att

egenskaperna för materialet inte är identiska i alla riktningar) och låg hållfasthet.

Magnesium har en högre grad av väteabsorbtion än aluminium på grund av dess förmåga att lösa väte (Liu m. fl., 2017). Fast lösning (solid solution) är den huvudsakliga formen av väte i ren magnesium, där väteatomerna löses i metallen i hålrummen. När väteinnehållet i Mg överskrider löslighetsgränsen, vilket kan hända bland annat när temperaturen av smält magnesium sjunker och väte slängs från den fasta fasen till resterande flytande fasen under stelningsprocessen. Då börjar små gasporer bildas och växa inuti kornen, vid korngränserna och runt den andra fasen, vilket kan vara en källa till sprickinitiering. Detta kan bero på det stora stelningsintervallet under vilket den flytande metallen stelnar, vilket ger extra tid och rum för gasporerna att växa. Detta kan orsaka degradering av de mekaniska egenskaperna och materialfel vid stelningsprocessen, exempelvis vid pressgjutning av tunna delar. Förutom i hålrummen i metallgittret och gasporer kan väte även finnas i form av hydrider i vissa Mg-legeringar där den ingår i kemiska föreningar med tillsatsämnen.

Eftersom magnesium är hydridbildande metall är den av stort intresse för forskning gällande lagring av väte i fast form, med en teoretisk kapacitet på 7.6% (Kappes m. fl., 2013). När magnesium utsätts för vätgas med ett tryck vid 5 MPa och temperaturer mellan 300 °C och 400 °C bildas  $MgH_2$ . Denna stökiometriska förening bidrar till spänningskorrosion vilket kan leda till mekanisk degradering. Denna förening är dock inte lika stabil som andra magnesium hydrider och bryts ner vid 287 °C.

Vid tillsättande av små mängder Al och Zn till Magnesium minskar väteinnehållet i legeringen något (Liu m. fl., 2017). Dock förblir väteinnehållet oförändrad när mer Al och Zn adderas. Mg-legeringar som innehåller Ca och sällsynta jordartsmetaller såsom Y, Gd ökar väteinnehållet markant i legeringen. Vid tillsättande av Nd, vilket också är en jordartsmetall, ökar väteinnehållet först för att sedan minska. Detta har dock inte lett till att Mg-legeringar med jordartsmetaller har omfattande porositetsproblem, troligen på grund av att dessa legeringar absorberar mer väte i hålrummen i metallstrukturen.

En studie gjordes för att undersöka de mekaniska egenskaperna av vissa Mg-legeringar med olika vätekoncentrationer (Liu m. fl., 2017). Legeringarnas vätekoncentration kunde minskas med hjälp av Argonbubblor under smältfasen. Rent magnesium har en låg koncentration av väte (12.7  $\mu g/g$ ). Magnesiums vätekoncentration kunde minskas till 5 mikrogram utan att det ledde till märkbar förändring i draghållfastheten. En viss förändring i brottförlängning kunde observeras, från 7% till 9.3%. AZ91-0.4Ca, vilket är Mg-Al-Zn-legering med mindre mängd Mn och Ca, uppvisade större förändring i draghållfastheten när vätekoncentrationen minskade från 16  $\mu g/g$  till 10  $\mu g/g$ . Brottgränsen ökade från 95 MPa till 147 MPa. Överskott på väte i höglegerade magnesiumlegeringar orsakar gasporer, vilket påverkar de mekaniska egenskaper negativt. Magnesiumlegeringar som innehåller jordartsmetaller är mindre benägna att utveckla gasporositet. Detta kan förklaras med att den mängd väte som överstiger löslighetsgränsen i legeringen bildar kubisk hydridförening runt korngränserna, vilket förhindrar bildandet av gasporositet.

## 4.7 Titanlegeringar

Titan förekommer med två olika kristallstrukturer: hexagonal tätpackning och kubiskt rymdcentrerat (Donachie, 2000). Dessa kallas också alfa- och betastruktur och är grunden för de huvudsakliga klassificeringarna av titanlegeringar. Hexagonal tätpackning är den struktur som förekommer i kommersiellt rent titan vid rumstemperatur och kubiskt rymdcentrerad struktur förekommer vid höga temperaturer men även i vissa legeringar vid rumstemperatur. De fyra olika klasserna av titanlegeringar är alfa, nästan-alfa, alfa-beta och beta. Vilken klass en legering tillhör påverkas av om den innehåller alfa- eller betastabiliserande element. Några ämnen som är alfastabiliserande är aluminium, syre och kväve och några ämnen som är betastabiliserande är molybden, järn, vanadin, krom och mangan. Alfalegeringar kan innehålla både neutrala legeringselement och alfastabiliserande legeringselement, nästan-alfa och alfa-beta innehåller både alfastabiliserande och betastabiliserande legeringselement (nästan-alfa innehåller endast en liten mängd betastabiliserande medan alfa-beta innehåller en större mängd) och betalegeringar är legeringar som innehåller tillräcklig mängd betastabiliserande element för att upprätthålla betafas även vid nedkylning.

Titan har ett relativt bra skydd mot väteskador från dess oxidskikt som starkt begränsar absorption av väte, detta skyddet kräver dock att titan inte skadas (Donachie, 2000). Rent alfatitan påverkas relativt lite av vätekoncentrationer upp till 200 ppm, renheten är dock viktig för att detta ska gälla. Så kallat "kommersiellt rent titan" är känsligare och kan försprödas ner till 30 ppm väte. Betatitan har betydligt högre löslighet för väte och kan klara flera tusen ppm väte innan betydelsefulla förluster i formbarhet uppstår, något att ta hänsyn till är dock att betatitan har mycket högre diffusionskoefficient än alfatitan vilket leder till högre upptag av väte. Temperatur har även stor inverkan på väteförsprödning av titan, upp till 100 °C är det ovanligt med hydridbildning djupare än 0.4 mm då vätet diffunderar relativt långsamt samt att flisning sker när hydridlagret blir tillräckligt tjockt. När temperaturen överstiger 250 °C kan hydrider bildas genom hela komponentens tjocklek till följd av att vätet diffunderar snabbare vilket leder till kraftig försprödning. Hydridbildning kan även öka i närvaro av järnföreningar men det kan också minska om aluminium används som legeringselement.

En studie gjordes där tre olika titanlegeringar, T40, TA6V och Ti10-2-3, laddades med väte (Bignon m. fl., 2018). Dragprover gjordes sedan på legeringarna i två olika temperaturer, i 20 °C och i 300 °C. För proverna i 20 °C minskade duktiliteten med 57%, 81% och 20% för respektive legering och brottgränsen ökade med 9%, 9% och 8% för de respektive legeringarna. För proverna i 300 °C påverkades dock inte varken duktiliteten eller brottgränsen signifikant.

## 4.8 Andra potentiella material

En förbränningsmotor för vätgas har vissa andra materialkrav jämfört med en traditionell förbränningsmotor. De externa kraven som innefattar att motorn ska förbränna bränslet och omvandla den kemiska energin till mekanisk energi är egentligen de samma, däremot skiljer sig de interna kraven då en vätgasmotor riskerar att påverkas av de väterelaterade problem som beskrivits i kapitel 2. Tryck och temperatur varierar också hos en vätgasmotor jämfört med en bensin- eller dieselmotor, vilket resulterar i att användningsmöjligheterna av vissa material varierar mellan de olika motortyperna. Därför kommer fokus i detta avsnitt att läggas på sådana material som vanligtvis inte används i konventionella förbränningsmotorer, för att utforska om de potentiellt skulle kunna användas i en vätgasmotor. Värt att notera är att detta handlar mer om forskning än faktiska användningsmöjligheter, då pris och tillgång på materialen försvårar användning vid stora kvantiteter.

I en artikel publicerad 2020 (Luo m. fl., 2020) presenteras en viss medientropi-legering bestående av kobolt, nickel och vanadin (CoNiV). Medientropi-legering är en legering med tre element med lika eller nästan lika stor halt av varje. Legeringen har en FCC-struktur vilket leder till att materialet är segt och har en hög duktilitet. Vidare beskriver författarna av artikeln att materialet har goda möjligheter att motstå väteförsprödning och andra väterelaterade problem i rumstemperatur tack vare det låga värdet på vätediffusionen, och presenterar en rad olika undersökningar som bevisar detta. Dessutom har materialet ett tjockt oxidskikt som minskar väteabsorbtionen. På grund av legeringens mekaniska egenskaper och korrosionsresistans, samt på grund av det faktum att materialet är relativt lätt att tillverkas, kan materialet potentiellt vara användbart i en vätgasmotor. Däremot är både vanadin (Sveriges Geologiska Undersökningar, 2020) och kobolt dyra material vilket begränsar användningsmöjligheterna (Sveriges Geologiska Undersökningar, 2023).

I ett experiment undersöktes motståndet mot väteförsprödning i en high-entropy legering, vilken har samma definition som medium-entropy legering, dock med fem eller fler metaller (Mohammadi m. fl., 2022). Legeringen CrMnFeCoNi i FCC-struktur med gradient struktur och nanotvillingskristaller på ytan, laddades med väte elektrokemiskt och dragprov utfördes på den. Gradient struktur innebär i korthet gradvis förändring i storleken på karakteristiska mikrostrukturegenskaper, såsom kornstorlek eller tjockleken på tvillingskristaller från ytan mot insidan. Motiveringen bakom detta experiment var baserat på det faktum att FCC-struktur har relativt bra motstånd mot väteförsprödning, men nackdelen är den låga sträckgränsen, och försök som görs för att öka sträckgränsen medför ofta lägre duktilitet.

Resultatet visade på en bra kombination av styrka (500 MPa - 700 MPa i sträckgräns) och duktilitet (15% - 33%) i närvaron av väte i metallen, särskilt när vätekoncentrationen i legeringen hölls under en kritisk nivå på 6,1 viktppm (Mohammadi m. fl., 2022). Detta goda resultat var inte bara på grund av att legeringen är av FCC-struktur (även om det är allmänt känt att FCC-struktur ger bäst skydd mot väteförsprödning då den har lägre diffusivitet). Det har föreslagits att närvaron av

fem legeringselement bidrar till att tröskeln till initiering av HELP-mekanismen vad gäller vätekoncentration minskar. Enligt författarna är denna tolkning rimlig då HELP är en vanlig väteförspärningsmekanism i FCC-metaller. Sammanfattningsvis kunde det konstateras att kombinationen av FCC-struktur, hög-entropi legering och gradientstrukt med nanotvillingskristaller på ytan bidrog till hög duktilitet, hög sträckgräns och bra motstånd mot väteförspärning.

# 5

## Sammanställning och diskussion om komponenter, material och krav

I detta kapitel kommer en djupare genomgång av komponenterna göras med avseende på de material- och legeringsgrupper de vanligtvis består av samt de krav de ställs inför. Tidigare kapitel kommer återkopplas till förståelse för hur material- och legeringsgrupper beter sig vid vätekontakt samt vilken form av påverkan som inträffar i de olika fallen för de olika komponenterna.

Eftersom olika motortillverkare använder generellt sett olika material och legeringar till komponenter i motorer så finns det för många för att alla ska nämnas i den här rapporten. Det är därför endast material- och legeringsgrupper som är mest förekommande som nämns till varje komponent. Däremot kan det vara så att material och legeringar från en grupp används till olika komponenter på grund av dess mer specifika egenskaper. I dessa fall ges några mer specifika exempel på vilka material och legeringar som förekommer.

### 5.1 Komponenter

I en artikel publicerad 2009 (Verhelst och Wallner, 2009) diskuteras väte som bränsle i förbränningsmotorer, där resonerar även författarna om hur väte påverkar olika material. Metalliska material är känsliga mot väteförspredning, där känsligheten i stor grad beror av vilken spänning materialet utsätts för. Vidare skriver författaren att material som kan vara lämpliga i vätegasmotorer är mässing- och kopparlegeringar, aluminium och aluminiumlegeringar och berylliumbrons. För stål beror väteförspredningens påverkan av en rad olika faktorer så som kemisk sammansättning, om mekanisk behandling eller värmebehandling utförts, mikrostruktur, samt renhet och styrka hos materialet. Negativa effekter av väteförspredning har även upptäckts på insprutningsventiler när dessa har bestått av material med piezoegenskaper.

I inledningen på kapitel 3 introducerades motorn och de komponenter den består av. Däremot diskuterades inte några krav eller vilka material dessa vanligtvis består av. Nedan listas de introducerade komponenterna med tillägget att material och materialkrav sammanställs.

### 5.1.1 Cylinder

Cylindrarna kräver en hög slitstyrka samt en hög termisk ledningsförmåga. Dessa krav på cylindern är anledningen till att många är tillverkade i grått gjutjärn, som exemplet i (Raman, 2007) där grått gjutjärn SAE J431a nämns som vanligt förekommande. En annan vanligt förekommande metod (van Basshuysen och Schäfer, 2016) är att gjuta cylindrarna ihop med motorblocket med en gjutjärnslegering men det förekommer även andra metaller så som övareutektiska aluminium-kisellegeringar och undereutektiska aluminium-kisellegeringar.

Cylindrarna med övareutektiska Al-Si legeringar måste ytbearbetas genom antingen kemisk etsning eller mekanisk slipning vilket ger en slitstark yta (van Basshuysen och Schäfer, 2016). För övareutektisk kontra undereutektisk aluminium-kisellegeringar tillverkas den förstnämnda genom lågtrycksgjutning vilket resulterar i att kiselkornen blir mycket större än för den andra som tillverkas genom högtrycksgjutning. Just att kiselkornen får olika dimension ger en snabbare tillverkningsprocess för små korn då det är lägre risk för lossning av flisor men detta kan också komma att ha betydelse för vätgasens påverkan på metallen då längre och kortare korn kan bete sig olika mot väte. Undereutektiska aluminium-kisellegeringar kan även behandlas med en metallfinish som appliceras med antingen galvanisering eller en termisk stänkprocess. Den mest förekommande processen för att ytbehandla cylindern är genom att ett fint fördelat nickellager blir elektrolytiskt utfällt över cylinderytan där sedan ett lager kiselkarbid distribueras. Denna finish har uppvisat exceptionella driftsegenskaper samt lägre slitage. Däremot är denna finishen mest förekommande i encylindriga motorer hos tvåhjulsfordon.

### Diskussion om cylinder

I avsnitt 4.1 diskuterades gjutjärn som material och hur det påverkas av vätgas. En cylinder tillverkad av gjutjärn kan påverkas negativt, speciellt om temperaturerna blir höga och om det utsätts för spänningar. Om cylindrarna gjuts ihop med motorblocket behöver även stor vikt läggas vid att väteabsorption inte sker under gjutningsprocessen. Aluminiumcylindrar kan vara ett mer lovande alternativ då aluminium generellt sett påverkas i mindre utsträckning än gjutjärn.

### 5.1.2 Topplock

För topplocket krävs en hög gjutbarhet på grund av dess komplexa form, där passande och vanligt använda material på detta är grått gjutjärn SAE J431a, en aluminiumlegering eller en magnesiumlegering (Raman, 2007). Gjutjärn eller aluminium-kisellegeringar är vanligast. Magnesiumlegeringar är också intressanta på grund av dess låga densitet, dock är de relativt dyra, har lägre styrka och lägre motstånd mot korrosion. I passagerarbilar är aluminiumlegeringar vanligast då låg vikt har en hög prioritet (van Basshuysen och Schäfer, 2016).

### Diskussion om topplock

Topplocket belastas av tryck som kompressionen och förbränningen medför, med siffror som varierar mellan cirka 69 bar och 152 bar, beroende på motorstorlek (Mehlhoff, 2007). Enligt referensen utfördes ett detonationstest som skulle efterlikna en förbränningsprocess på topplocket och det visade sig att trycket då kan uppgå till cirka 241 bar. Därför kan ett topplock tillverkat i ett material som är väldigt känsligt för väteförsprödning leda till en otillräcklig livslängd av en vätemotor om lasterna blir för höga. Det har påvisats att gjutjärn har en minskad duktilitet och en minskad brottgräns när det laddas med väte (avsnitt 4.1). Väte kan även inducera sprickor när komponenten utsätts för pålagd last, och eftersom topplocket utsätts för spänningar kan detta vara problematiskt. Diffusionsmekanismen för väte ökar även med ökad temperatur, vilket medför att induceringsprocessen kan ske snabbt i ett topplock då temperaturerna i förbränningskamrarna är höga. Trots att inte lika mycket information finns specifikt om grått gjutjärn kan slutsatsen dras att grått gjutjärn borde påverkas på ungefär samma sätt, då strukturen hos materialet är liknande. Om ett topplock i aluminium kan vara ett alternativ beror mycket på om vätgasen är våt eller torr, något som förklaras i avsnitt 4.4. Idealt sätt bör vätgasen vara torr och fri från vatten och bör därför inte påverka aluminiumet i lika stor utsträckning. Magnesium har en högre grad av väteabsorption än aluminium, något som förklaras i avsnitt 4.6, vilket kan begränsa dess användningsmöjligheter som material i en vätgasmotor. Det nämndes också tidigare att de är relativt dyra, och de brukar oftast användas i högpresterande bilar där man vill minimera vikten och inte lägger större vikt på livslängden.

### 5.1.3 Kolv

Kolvens funktion är som tidigare nämnt att ta emot det tryck som bildas i förbränningskammaren när luft/bränsle-blandningen antänds och överföra den translaterande kraften som bildas av trycket och omvandla den, genom vevstaken till roterande rörelse i vevaxeln (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Kolven måste tillsammans med kolvringarna förhindra läckage av gas respektive olja från och till förbränningskammaren. Kolvarna oscillerar i förbränningskammaren lika många gånger som varvtalet motorn går på. Ett högre varvtal medför därmed en högre acceleration, eftersom kolven byter rörelseriktning. Detta kräver att den oscillerande massan, (kolven, kolvringar, vevstaken) ska ha låg vikt för att minska trögheten. Den minskade massan kan åstadkommas genom att ha en materialsnål geometri och material med låg densitet. Smidda aluminium-kisellegeringar är lämpligast för detta ändamål. Ett annat krav på materialet är att det ska motstå plastisk deformation och tåla hög statisk och dynamisk spänning.

Gastemperaturer i förbränningskammaren kan överstiga 1000 °C (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Värmeöverföringen från gasen kan öka kolvens temperatur till 100 °C - 300 °C beroende på var i kolven och vilket material kolven är tillverkad av. Detta medför att det använda materialet har flera krav på sig. Hög konduktivitet är viktig så att värme leds bort snabbt från kolven och temperaturen i den inte blir för hög. Materialets styrka ska inte påverkas negativt vid höga temperaturer. Ett

annat krav gällande värme är att materialet ska ha låg termisk expansionskoefficient. Vissa eutektiska och övereutektiska aluminium-kisellegeringar uppfyller dessa krav.

Kolvtoppen exponeras för de varma förbränningsgaserna i förbränningskammaren och de absorberar olika mängder värme beroende på motorns varvtal och moment (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Denna värmeenergi överförs till cylinderväggen i första hand genom första kolvringen och i mindre utsträckning genom kolvens sidoyta (piston skirt).

Eutektiska aluminium-kisellegeringar innehåller 11% – 13% kisel och mindre mängd koppar, magnesium och nickel (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Övereutektiska aluminium-kisellegeringar innehåller 15% – 25% kisel och mindre mängd koppar, magnesium och nickel. Dessa legeringar är lämpade för både gjutning och varmbearbetning. Aluminium-kopparlegeringar med i princip ingen kisel och en liten mängd nickel används i mindre utsträckning. Dessa legeringar behåller sin styvhet väl i ökande temperaturer, men är mindre slitstarka och har större termisk expansion. Dessa legeringar är lämpade för varmbearbetning.

Anlöp stål och gjutjärn kan också användas men de kräver kylningsmekanismer (van Basshuysen och Schäfer, 2016). När temperaturen ökar expanderar materialet, och om kolven expanderar för mycket medför det problem i motorn. Det är därför viktigt att motverka termisk expansion. Typiska material som uppfyller dessa krav, och som därmed typiskt används i konventionella förbränningsmotorer, är sandgjutet eller formgjutet aluminium. Smitt aluminium J454c är också vanligt förekommande.

### Diskussion om kolv

Det har påpekats i avsnitt 4.4 att vätgas i torra miljöer inte leder till betydande diffusion in i materialet, och att det är främst i våta miljöer som absorption och diffusion av vätgas kan ske. Vad som är gränsen mellan en våt och en torr miljö är dock inte helt självklart. Därmed är det inte helt klart om miljön i förbränningskammaren räknas som våt miljö utifrån avsnittet om aluminium. Även om det är ren vätgas som sprutas in i förbränningskammaren så är det fortfarande lite vattenånga som kommer in tillsammans med luften. Huruvida mängden vattenånga är tillräcklig för att det ska bidra till absorption av väte är oklart.

En annan faktor som kan öka absorption och diffusion av väte in i kolven är det faktum att koncentrationen av upplöst väte i en metall är proportionell mot partialtrycket av väte, enligt Sieverts lag vilket nämndes i avsnitt 2.1.2. Trycket i förbränningskammaren kan grovt sagt nå mellan 8 och 15 bar i en dieseldriven förbränningsmotor. Det är inte klarlagt vilka tryck som uppnås i en vätgasdriven förbränningsmotor, men borde i alla fall vara tillräckligt höga att det påverkar koncentrationen av väte i kolven. Trycket är dock kortvarigt och varierande i förbränningskammaren. Hur denna variation kan påverka är oklart och behöver undersökas.

### 5.1.4 Kolvringar

Kolvringarna liksom kolven kräver ett slitstarkt material, därför är det vanligt förekommande att grått gjutjärn med grafitfjäll används (Raman, 2007). Stålkolvringar kan användas i små motorer. Våldigt stora kolvringar gjuts individuellt och beläggs med hårt krom för att bidra med förbättrad slitstyrka. De översta kolvringarna utsätts för kraftigare tryckökning och högre temperaturer (van Basshuysen och Schäfer, 2016). Därför är det vanligt att nodulärt gjutjärn eller stål används för de kolvringar som är placerade närmast förbränningen. Kolvringar som består av nodulära gjutjärn har en böjhållfasthet på minst 1300 MPa, samtidigt som kolvringar bestående av grått gjutjärn har en böjhållfasthet på minst 650 MPa (härdad) eller minst 350 MPa (ej härdad). Dessa används vanligtvis längre ner på kolven då de inte utsätts för lika höga påfrestningar.

### Diskussion om kolvringar

Precis som för tidigare nämnda komponenter kan ett val av grått gjutjärn medföra vissa väterelaterade problem. I avsnitt 4.1 nämns specifikt att nodulärt gjutjärn som blir utsatt för elektrokemiskt laddat väte i en studie klarar av en halverad töjning jämfört med när vätgas inte är närvarande. Därför kan de kolvringar som består av nodulärt gjutjärn användas i de lägsta ringarna (till skillnad från att användas i de översta ringarna), för att få en tillräckligt reducerad töjning och säkerställa hållfastheten. Stål å andra sidan kan vara ett lovande alternativ för alla (eller iallafall de översta ringarna), men effekten beror mycket på ståltyp. I avsnitt 4.2.2 diskuterades rostfria stål, och det är påvisat att austenitiska rostfria stål är speciellt väteresistanta då materialet har en FCC-struktur som gör att vätet diffunderar mindre än hos BCC-stål. Därmed kan rostfritt stål vara ett bra materialval till en kolvring i en vätgasmotor.

### 5.1.5 Ventiler

Martensitisk rostfritt stål är vanligast. Ett krav för inloppsventilerna är att de består av material som har god styrka samt kan motstå utmattning (Raman, 2007). Potentiella material till inloppsventilerna är ferritiskt rostfritt stål eller olika typer av nickel-krom-legeringar.

Det är vanligt förekommande att austenitiska rostfria stål används för avgasventiler. Enligt (Raman, 2007) är det däremot fördelaktigt att använda en legering med högre kromhalt, som Silichrome XB. Det nämns även att martensitiskt utskiljningshärdat rostfria stål eller nickelbaserade superlegeringar såsom Inconel används i moderna tunga motorer på grund av deras höga styrka, måttliga korrosionsbeständighet och goda tillverkningsbarhet. Aluminium kan användas ibland som beläggningsmedel på järnlegeringar för att skydda mot korrosion (Aniekan m. fl., 2016). Icke järnbaserade material såsom titan och nickel används också, dock är titan ett dyrt material.

### Diskussion om ventiler

Martensitiska rostfria stål påverkas mer negativt av väte än austenitiska rostfria stål, något som nämns i avsnitt 4.2.1 och 4.2.2. Ett alternativ är därför att tillverka både inloppsventiler och avgasventiler i autentiskt rostfritt stål. Krom-nickellegeringar är också lovande alternativ (avsnitt 4.3). Det är tidigare nämnt i avsnittet om nickellegeringar att austenitiskt rostfritt stål är ett intressant material för applikationer i vätgasmotorer. De nickelbaserade superlegeringarna har även en hög spänningstålighet under höga temperaturer, och gemensamt för alla nickellegeringarna är att de har bra korrosionsmotstånd. Däremot riskerar de nickelbaserade legeringarna väteförspädning när de utsätts för hydrering. För att kunna göra ett val av material till ventilerna behövs därför mer undersökningar för att analysera hur stor risken är för brott eller deformationer i kombination med vätgas.

Insprutningsventiler tillverkas av många olika ståltyper men ofta värmebehandlas de med någon typ av sätthårdning (Aubert Duval, u. å). Det kan röra sig om både nitrering eller uppkolning. I både diesel- och bensinmotorer kan martensitiska rostfria stål eller hårdbara verktygsstål användas. Legeringarna kan ha sträckgränser kring 1GPa utan stora mängder nickel. Materialvalet särskiljer sig något mellan insprutningsventiler för diesel och bensin på grund av skillnaderna i bränslets sammansättning. Att det ofta är höghållfasta stål utan FCC-struktur som används kan bli problematiskt vid användning av vätgas, enligt avsnitt 4.2.

### 5.1.6 Bränsleledning

Då det inte finns offentlig information om hur ett bränsleledningssystem för en vätgasmotor ser ut kommer det inte undersökas djupare. Det som kan hittas är vanliga material som används för vätgasledningar i andra sammanhang. För ledningar som används till transport av vätgas är polymerer eller kompositer vanliga material för bränslecellfordon (Fuel Cell Technologies Office, 2012). Därför är det också ett troligt materialval för bränslesystemet för en förbränningsmotor som drivs på vätgas. Kraven som ställs på bränsleledningssystemet är bland annat att klara stora temperaturvariationer som uppstår när vätet komprimeras eller expanderar. Att klara höga tryck är också ett viktigt krav. Eftersom polymerer är vanligast för bränsleledningen och detta faller utanför rapportens avgränsningar kommer detta inte undersökas vidare.

### 5.1.7 Avgassystem

Temperaturen blir avgörande för avgassystemet eftersom det når temperaturer omkring 700 °C - 800 °C (Raman, 2007). Dessa temperaturer kan resultera i termisk expansion, krypning, termiska spänningar och högtemperaturkorrosion på de komponenter avgassystemet består av. Det nämndes tidigare i avsnitt 3 att avgassystemet består av fyra vitala delar - grenrör, flexrör, katalysator och ljuddämpare. Det ställs höga krav på dessa komponenter då de ansvarar för att leda bort de avgaser

som bildas under förbränning.

### Diskussion om avgassystem

Grenröret är vanligtvis tillverkat i gjutjärn och kan vara integrerad med katalysatorn (Walker, u. å). I avsnitt 4.1 framfördes att gjutjärn kan vara känsligt för väte, och att duktiliteten och brottgränsen minskar när det laddas med väte. Detta i kombination med den information som går att finna i avsnitt 2, där det framfördes att diffusionen av väte generellt ökar med ökande temperatur, resulterar i begränsningar med användandet av gjutjärn som material till grenröret. Temperaturerna blir höga i grenröret när de varma avgaserna behöver ledas bort, något som måste tas i beaktning när ett materialval ska göras.

Flexröret är vanligtvis tillverkad av flätat rostfritt stål då komponenten kräver flexibilitet (PipsIslandHome, u. å). Rostfritt stål kan generellt motstå väteförsprödning bra jämfört med andra material, speciellt austenitiska rostfria stål (avsnitt 4.2.2).

Katalysatorns insida består vanligtvis av platina men även rodium och palladium förekommer (Universal Technical Institute, 2021). Alla tre är dyra och exklusiva material, men de är nödvändiga för att katalysatorn ska kunna uppfylla sin funktion. Det finns dock risk för väteförsprödning vid användandet av dessa och det är något som måste undersökas mer.

Ljuddämparen brukar oftast tillverkas av rostfritt stål men aluminiumbeläggningar används ibland för att motverka korrosion (Jääskeläinen, 2022b). Eftersom ljuddämparen är omgiven av luft är det en komponent som ofta konstrueras med korrosionsskydd, vilket är fördelaktigt för en förbränningsmotor som drivs av vätgas.

### 5.1.8 Turbo

Turbon i fordon består huvudsakligen av turbinhjul, kompressorhjul och en gemensam axel, där alla komponenter sitter i ett gemensamt hus (Jääskeläinen, 2022a). Endast delar som kommer i kontakt med avgaserna studeras här, alltså turbinhjulet och turbinhuset. Små obetydliga mängder av avgaser kan troligen komma i kontakt med axeln, dock avgränsas analysen till turbinhjulet och turbinhuset.

När det kommer till turbohjulet brukar nickelbaserade superlegeringar användas i turbinbladen (turbinhjulet). Titan-aluminiumlegeringar används också, där kisel och koppar också kan adderas för att få olika önskade egenskaper (Jääskeläinen, 2022a). För turbinhuset brukar segjärn, ferritisk gjutstål, austenitiska legeringar och aluminium användas.

### Diskussion om turbo

Som tidigare nämnts kan våta miljöer öka absorptionen och diffusionen av väte i aluminiumlegeringar. Aluminiumtillverkade turbinhus och turbinhjul kan därmed ha potential att påverkas negativt av avgaserna som passerar genom det. Avgaserna kan innehålla bland annat både vattenånga, vilket ger den våta miljön, och en del vätgas som inte förbränts i förbränningskammaren.

Det har också tidigare nämnts i kapitlet om metallegeringar att oxidskiktet i titan ger relativt bra skydd mot väteskador under förutsättning att skiktet inte skadas. Studier kunde även fastställa att både duktilitet och brottgräns minskade markant för segjärn. Dock laddades denna med väte katodiskt, vilket inte är relevant i turbon. Därmed är det svårt att dra några slutsatser om hur mycket ett turbohus tillverkat av segjärn eller titanlegeringar påverkas. Ingen data om hur väte påverkar nickelbaserade superlegeringar kunde hittas, därmed kunde inga slutsatser dras om turbohjul tillverkade av detta material heller.

Tryck- och temperaturaspekten kan också vara relevanta i kombination med vätgas i turbon, eftersom avgaserna har en relativ hög temperatur, och avgasflödet kommer in i turbon med en viss hastighet och bromsas lite då en del av rörelseenergin i avgasen går åt till att snurra turbohjulet. Denna inbromsning av avgasflödet bildar ett visst tryck på turbon, särskilt turbohjulet.

## 5.2 Allmän diskussion

Det går inte att förutse exakt hur vissa material kommer att klara kraven i en vätgasmotor. Informationen i det här projektet utgår från materialtester på vissa legeringar kopplade till väte. Testerna utförs i labb där specifika värden på minskning i duktilitet eller livslängd noteras. Det är dock en helt annan sak att bygga en motor som drivs på vätgas och testa den för att se hur väl materialen klarar tryck- och temperaturvariationer samt vätets påverkan på materialen. Från litteraturen kan det eventuellt gå att se vilka material som klarar specifika laster i en förbränningsmotor. Dock är det svårt att förutse livslängden utan att faktiskt testa materialen i själva motorn. Likadant går många andra studier ut på att material elektrolytiskt eller katodiskt laddas med väte. Detta medför en hög koncentration av väte i många fall, som eventuellt inte uppnås i trycksatt gas. Informationen som jämför de olika laddningsmetoderna visar bara på att laddning i vätgas inte ger någon betydande absorption. Dock är temperaturen i förbränningskammaren betydligt högre vilket borde öka graden av väteabsorption.

Eftersom de metall- och legeringsgrupper som har studerats i rapporten består av väldigt många olika specifika material med olika egenskaper, finns det med stor sannolikhet vissa material under samma metall- eller legeringsgrupp som beter sig mer eller mindre önskvärt i en vätemiljö än de material som har studerats. Vissa material kan ha varit irrelevanta för tidigare motortyper med diesel och bensin som bränsle på grund av materialets höga pris eller tillverkningssvårigheter. Sådana ma-

terial kan vara relevanta till vätgasmotorer, då specifika material kan ha egenskaper som gör dem särskilt passande för vätemiljön samtidigt som de fortfarande klarar kraven som ställs på en motor.

I rapporten täcks en rad olika komponenter i förbränningsmotorn. Det finns många andra komponenter som också kommer i kontakt med vätgasen. Det kan förekomma att bränslet läcker ut och exponeras mot komponenter i vevhuset. Dessa komponenter har också en livslängd att betrakta och det kan visa sig att det även är relevant att analysera dem på grund av väteläckage. Exempelvis kan skruvarna som håller fast topplocket komma att bli ett problem då de ofta är tillverkade i höghållfast stål (Jonas Wärnberg, personlig kommunikation, 23 mars, 2023). Även ventilfjädrarna som håller ventilerna stängda tillverkas i martensitiskt stål med hög hållfasthet, över 1.6GPa (Yamagata, 2005). Med tanke på att det här arbetet har avgränsats till förbränningsdelen i motorn har dessa komponenter inte betraktats alls. Med det nämnt är det fortfarande, för utvecklingen av förbränningsmotorer, viktigt att grundligt granska alla komponenter i motorn.

En utmaning med det här projektet har varit att koppla kapitel 4 med kapitel 5 och utifrån dessa dra slutsatser om hur motorns komponenter tillverkade av särskilda legeringar påverkas av väte. Flera faktorer har bidragit till denna utmaning. En faktor är att en vätgasdriven förbränningsmotor troligen ger upphov till andra tryck och temperaturer än konventionella förbränningsmotorer. Dessa kan spela roll i hur mycket och länge olika komponenter kan motstå väteförsprödning och materialbrott. Dessvärre hittades ingen offentlig data om tryck och temperatur kopplat till vätgasmotorer. Det har ändå gjorts kopplingar mellan material och komponenter under varje komponent i detta kapitel. Slutsatserna om vätgasens eventuella påverkan på varje komponent är baserade på källor som har lästs om material och komponenter samt allmän kunskap. Dock är själva slutsatserna om varje komponent något spekulativa. Därför har det dragits försiktiga slutsatser om dessa och förslag har givits om framtida experiment och studier.

Att bygga en vätgasmotor som uppnår kraven på livslängd kommer förmodligen gå att uppnå. Dock är frågan hur dyra och exotiska material som kommer behövas. Det kanske går att använda de material som ofta förekommer i förbränningsmotorer för diesel och bensin. Men för att veta säkert behöver konkreta tester genomföras i de förhållanden som faktiskt råder i en förbränningsmotor för vätgas. Livslängden hos motorn är även en siffra som tillverkaren specifikt vill uppnå på grund av efterfrågan, för vissa material i motorn kan livslängden minska men det är då upp till tillverkaren att bestämma vilka material som passar bäst för att balansera livslängd med material och tillverkningskostnad. I vissa fall är kanske det enda som krävs att dimensionera upp någon komponent så att den bättre klarar påfrestningarna. Dock kan detta leda till att andra komponenter påverkas och i sin tur behöver omdimensioneras för att bibehålla prestandan av motorn.

# 6

## Slutsats

För att höghållfasta stål ska kunna användas i vätgasdrivna förbränningsmotorer behövs noggrannare undersökning. Detta eftersom att olika sammansättningar av höghållfasta stål med olika mekaniska egenskaper kan påverkas olika mycket i vätgasmiljöer samt att exponeringsgraden för väte i olika komponenter i motorn varierar. Litteraturen pekar särskilt ut att martensitiska stållegeringar påverkas negativt av väte. Detta kan leda till att motorutvecklare får undersöka andra material till komponenter som kräver hög hållfasthet. Mycket pekar på att gjutjärn inte heller har bra motstånd mot väteförsprödning. Å andra sidan tenderar aluminium, kopparlegeringar samt austenitiska rostfria stål stå emot väteförsprödning. Gemensamt för dessa material är deras FCC-struktur som inte har lika hög diffusion av väte som BCC-material.

Topplocket, motorblocket samt cylindern som är gjuten ihop med motorblocket har länge tillverkats i gjutjärn men det är allt vanligare att aluminium används istället. För en vätgasdriven motor kan detta utbyte vara intressant då gjutjärn har visat sig vara ogynnsamt när det utsätts för väte medan aluminium har god resistens mot väteförsprödning.

Generellt kan det även konstateras att de komponenter som berör förbränningen såsom cylindern, kolv, topplock och ventiler är kritiska inom avgränsningen för projektet. Högst vätgashalt och temperatur uppnås i förbränningskammaren. Väte diffunderar även snabbare in i metaller vid högre temperaturer vilket kombinerat med att komponenter i denna del utsätts för höga laster medför att materialen kring förbränningskammaren bör studeras vidare. Komponenter såsom avgassystemet är troligen mindre känsliga i en vätgasdriven förbränningsmotor. Enbart en liten del av vätgasen som inte förbänns går till avgassystemet, och avgassystemet utsätts inte för särskilt höga mekaniska laster utan utsätts istället huvudsakligen för termiska laster. Det är därmed rimligt att konstatera att en fungerande vätgasmotor förutsätter att de kritiska komponenterna klarar kraven, och att det är hos dessa komponenter som mest undersökning bör ske när det gäller material.

# Källhänvisning

- Abdo, E. (2011). *Power Equipment Engine Technology (1st Edition)* (E. Abdo, Red.). Cengage. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEETE002/power-equipment-engine/power-equipment-engine>
- Ambat, R., & Dwarakadasa, E. S. (1996). Effect of hydrogen in aluminium and aluminium alloys: A review. *Bulletin of Materials Science*, 19. <https://doi.org/10.1007/BF02744792>
- Aniekan, I., Kelly, O. E., & Abdulsamad, G. (2016). "Engineering material selection for automotvie exhaust systems using CES software". Hämtad 2 mars 2023, från <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/318350>
- Atkins, R. D. (2009). *An Introduction to Engine Testing and Development* (R. D. Atkins, Red.). SAE International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAIETD006/an-introduction-engine/an-introduction-engine>
- Aubert Duval. (u. å). *Injection systems*. Hämtad 7 mars 2023, från <https://www.aubertduval.com/markets/transportation/injection-systems-metals/>
- Augustyn, A. (2022). *stainless steel*. Hämtad 1 maj 2023, från <https://www.britannica.com/technology/stainless-steel>
- Babayev, R., Andersson, A., Serra Dalmau, A., Im, H. G., & Johansson, B. (2022). Computational comparison of the conventional diesel and hydrogen direct-injection compression-ignition combustion engines. *Fuel*, 307, 121909. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121909>
- Barannikova, S. A., Bochkareva, A. V., Li, Lunev, A. G., Shlyakhova, G. V., & Zuev, L. B. (2017). Research of the plastic flow of electrolytically saturated with hydrogen (He) Al-Cu-Mg alloy. *Metallurgija*, 56, 103–106.
- Beaver, W. W., & Trautman, D. W. (2019). *Beryllium metallurgy*. Hämtad 9 maj 2023, från <https://www.accessscience.com/content/article/a080000>
- Bignon, Q., Martin, F., Auzoux, Q., & Wouters, Y. (2018). Hydrogen impact on the mechanical properties of three titanium alloys. *3rd International conference on metals and hydrogen*. <https://hal.science/hal-02416233>
- Cummins. (u. å). *HOW A TURBOCHARGER WORKS*. Hämtad 12 april 2023, från <https://www.cummins.com/components/turbochargers/how-a-turbocharger-works>
- Davis, J. (2001). ASM International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMSHCC3/asm-specialty-handbook/asm-specialty-handbook>
- Depover, T., Laureys, A., Escobar, D. P., den Eeckhout, E. V., Wallaert, E., & Verbeken, K. (2018). Understanding the interaction between a steel microstructure and hydrogen. *Materials*, 11. <https://doi.org/10.3390/ma11050698>

- Dicks, A. L., & Rand, D. A. J. (2018). *Fuel Cell Systems Explained (3rd Edition)*. John Wiley Sons. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011J1SA5/fuel-cell-systems-explained/strategic-considerations>
- Donachie, M. J., Jr. (2000). *Titanium - A Technical Guide (2nd Edition)*. ASM International. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt008HWNJ3/titanium-technical-guide/titanium-titanium-alloy>
- Dong, F., Venezuela, J., Li, H., Shi, Z., Zhou, Q., Chen, L., Chen, J., Du, L., & Atrens, A. (2023). Enhancement of hydrogen embrittlement resistance in a Fe-18Mn-0.6C twinning induced plasticity steel by copper alloying. *Acta Materialia*, 118888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118888>
- EngineeringToolBox. (u. å). *Ammonia - Vapour Pressure at Gas-Liquid Equilibrium*. Hämtad 29 mars 2023, från [https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-pressure-temperature-d\\_361.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-pressure-temperature-d_361.html)
- Folkson, R., & Sapsford, S. (2022). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance - Towards Zero Carbon Transportation (2nd Edition)* (R. Folkson & S. Sapsford, Red.). Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAFAVTIE8/alternative-fuels-advanced/alternative-fuels-advanced>
- Francis, R. (2010). NACE International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCCAAPGE1/corrosion-copper-its/corrosion-copper-its>
- Fuel Cell Technologies Office. (2012). *Polymer and Composite Materials Used in Hydrogen Service*. Hämtad 12 april 2023, från <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/polymer-and-composite-materials-used-hydrogen-service-meeting-proceedings>
- Fukuyama, S., Yokogawa, K., Kudo, K., & Araki, M. (1985). FATIGUE PROPERTIES OF TYPE 304 STAINLESS STEEL IN HIGH PRESSURE HYDROGEN AT ROOM TEMPERATURE. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 26. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.26.325>
- Gangloff, R. P., & Somerday, B. P. (2012). *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies Volume 1*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857093899>
- Grubb, J. F. (2020). *Stainless steel*. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.650600>
- Hardy, M., Huron, E., Glatzel, U., Griffin, B., Lewis, B., Rae, C., Seetharaman, V., & Tin, S. (2016). The Minerals, Metals Materials Society (TMS). <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSPISS003/superalloys-2016-proceedings/superalloys-2016-proceedings>
- Hirth, J. P. (1980). Effects of hydrogen on the properties of iron and steel. *Metalurgical Transactions A*, 11. <https://doi.org/10.1007/BF02654700>
- Hydrogen - A sustainable energy carrier [SI-HYDROGEN STORAGE MATERIALS]. (2017). *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(1), 34–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.014>
- Håkansson, L. (2022). *För framtidens hållbara vätgasekonomi*. Hämtad 31 januari 2023, från <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/m2/nyheter/Sidor/TechForH2---for-framtidens-hallbara-vatgasekonomi-.aspx>
- Jewett, R. P., Walter, R. J., Chandler, W. T., & Frohberg, R. P. (1973). Hydrogen Environment Embrittlement of Metals. *NASA Contractor Report*.

- Johnson, W. H. (1875). On some remarkable changes produced in iron and steel by the action of hydrogen and acids. *Nature*, *11*. <https://doi.org/10.1038/011393a0>
- Jääskeläinen, H. (2022a). "Turbo Durability And Materials". Hämtad 2 mars 2023, från [https://dieselnet.com/tech/air\\_turbo\\_durability.php#tmaterials](https://dieselnet.com/tech/air_turbo_durability.php#tmaterials)
- Jääskeläinen, H. (2022b). *Exhaust System Materials*. Hämtad 3 maj 2023, från [https://dieselnet.com/tech/diesel\\_exh\\_mat.php](https://dieselnet.com/tech/diesel_exh_mat.php)
- Kahraman, E., Cihangir Ozcanli, S., & Ozerdem, B. (2007). An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine [Cited by: 140]. *International Journal of Hydrogen Energy*, *32*(12), 2066–2072. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.08.023>
- Kappes, M., Iannuzzi, M., & Carranza, R. M. (2013). Hydrogen Embrittlement of Magnesium and Magnesium Alloys: A Review. *Journal of The Electrochemical Society*, *160*. <https://doi.org/10.1149/2.023304jes>
- Kasab, J. J., & Strzelec, A. (2020). *Automotive Emissions Regulations and Exhaust Aftertreatment Systems* (J. J. Kasab & A. Strzelec, Red.). SAE International. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt012NQBQF/automotive-emissions/the-two-stroke-cycle>
- Kumar, D. (2022). 3.8 Comparison between Two-Stroke and Four-Stroke Engines. I D. Kumar (Red.), *Mechanical Engineering and Mechatronics Handbook*. Mercury Learning; Information. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt01320H81/mechanical-engineering/comparison-between-two>
- Kågeson, P. (2022). *Här är fördelarna med vätgas för tunga transporter*. Hämtad 12 februari 2023, från <https://www.nyteknik.se/opinion-vatgas/har-ar-fordelarna-med-vatgasfor-tunga-transporter/797267>
- Laureys, A., Depover, T., Petrov, R., & Verbeken, K. (2016). Microstructural characterization of hydrogen induced cracking in TRIP-assisted steel by EBSD. *Materials Characterization*, *112*. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.017>
- Li, W., Cao, R., Xu, L., & Qiao, L. (2021). *The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels - a review*. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005>
- Li, X., Ma, X., Zhang, J., Akiyama, E., Wang, Y., & Song, X. (2020). Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, *33*, 759–773. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01039-7>
- Liu, X., Yin, S., Lan, Q., Xue, J., Le, Q., & Zhang, Z. (2017). Investigation of the hydrogen states in magnesium alloys and their effects on mechanical properties. *Materials and Design*, *134*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.073>
- Louthan, M. R. (2008). *Hydrogen embrittlement of metals: A primer for the failure analyst*. <https://doi.org/10.1007/s11668-008-9133-x>
- Luo, H., Sohn, S. S., Lu, W., Li, L., Li, X., Soundararajan, C. K., Krieger, W., Li, Z., & Raabe, D. (2020). A strong and ductile medium-entropy alloy resists hydrogen embrittlement and corrosion. *Nature Communications*, *11*. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16791-8>

- Lynch, S. (2011). 2 - Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms. I V. Raja & T. Shoji (Red.), *Stress Corrosion Cracking* (s. 90–130). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093769.1.90>
- Lynch, S. (2019). *Discussion of some recent literature on hydrogen-embrittlement mechanisms: Addressing common misunderstandings*. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0017>
- Mang, T., & Wilfried, D. (2017). *Lubricants and Lubrication, 2 Volume Set (3rd Edition)* (T. Mang & D. Wilfried, Red.). John Wiley Sons. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLLVSE003/lubricants-lubrication/lubricants-lubrication>
- Matsunaga, H., Usuda, T., Yanase, K., & Endo, M. (2014). Ductility loss in ductile cast iron with internal hydrogen. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-2109-9>
- Mehlhoff, B. (2007). *Performance Head Gaskets - Pressure Science*. Hämtad 9 maj 2023, från <https://www.motortrend.com/how-to/0608ch-performance-head-gaskets/>
- Miller, B. A., Shipley, R. J., Parrington, R. J., & Dennies, D. P. (2021). Hydrogen Damage and Embrittlement. I B. A. Miller, R. J. Shipley, R. J. Parrington & D. P. Dennies (Red.), *ASM Handbook, Volume 11 - Failure Analysis and Prevention (2021 edition)*. ASM International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVF21/asm-handbook-volume-11/asm-handbook-volume-11>
- Mohammadi, A., Novelli, M., Arita, M., Bae, J. W., Kim, H. S., Grosdidier, T., & Edalati, K. (2022). Gradient-structured high-entropy alloy with improved combination of strength and hydrogen embrittlement resistance. *Corrosion Science*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110253>
- Murakami, Y., & Matsunaga, H. (2006). The effect of hydrogen on fatigue properties of steels used for fuel cell system. *International Journal of Fatigue*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.06.059>
- Nagao, A., Martin, M. L., Dadfarnia, M., Sofronis, P., & Robertson, I. M. (2014). The effect of nanosized (Ti,Mo)C precipitates on hydrogen embrittlement of tempered lath martensitic steel. *Acta Materialia*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.051>
- Nickel Institute. (2000). <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCSSNB003/castings-stainless-steel/castings-stainless-steel>
- Orlenius, J., Diószegi, A., & Diószegi, Z. (2008). Gas absorption in grey cast iron during mould filling. *International Journal of Cast Metals Research*, 21. <https://doi.org/10.1179/136404608X373140>
- PipsIslandHome. (u. å). *What Is A Flex Pipe? (Function, Types Replacement Method)*. Hämtad 12 april 2023, från <https://www.pipsisland.com/what-is-a-flex-pipe/>
- Q-files. (2023). *Internal combustion engine*. Hämtad 9 maj 2023, från <https://www.q-files.com/technology/road-transport/internal-combustion-engine>
- Qi, W., Song, R., Qi, X., Li, H., Wang, Z., Wang, C., & Jin, J. (2015). Hydrogen Embrittlement Susceptibility and Hydrogen-Induced Additive Stress of 7050

- Aluminum Alloy Under Various Aging States. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(9), 3343–3355. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1616-9>
- Raman, A. (2007). Industrial Press. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSAME004/materials-selection-applications/materials-selection-applications>
- Rhodes, R. (2022). *Explosive lessons in Hydrogen safety*. Hämtad 7 februari 2023, från [https://www.nasa.gov/pdf/513855main\\_ASK\\_41s\\_explosive.pdf/](https://www.nasa.gov/pdf/513855main_ASK_41s_explosive.pdf/)
- Rizvi, S. Q. A. (2009). *Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design* (S. Q. A. Rizvi, Red.). ASTM International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCRLCTSD1/comprehensive-review/comprehensive-review>
- Sahiluoma, P., Yagodzinsky, Y., Forsström, A., Hänninen, H., & Bossuyt, S. (2021). Hydrogen embrittlement of nodular cast iron. *Materials and Corrosion*, 72. <https://doi.org/10.1002/maco.202011682>
- Schauer, G., Roetting, J., Hahn, M., Schreijaeg, S., Bacher-Höchst, M., & Weihe, S. (2015). Influence of Gaseous Hydrogen on Fatigue Behavior of Ferritic Stainless Steel – A Fatigue-life Estimation [Fatigue Design 2015, International Conference Proceedings, 6th Edition]. *Procedia Engineering*, 133, 362–378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.669>
- Shine, I. (2022). *The world needs 2 billion electric vehicles to get to net zero. But is there enough lithium to make all the batteries?* Hämtad 2 februari 2023, från <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/electric-vehicles-world-enough-lithium-resources/>
- Smith, E. H. (1998). Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMERBE002/mechanical-engineers/mechanical-engineers>
- Sveriges Geologiska Undersökningar. (2020). *METALLPRISER UNDER 2019*. Hämtad 3 maj 2023, från <https://www.sgu.se/globalassets/om-sgu/nyheter/2020/metallprisbilagor/prisbilaga-januari-2020.pdf>
- Sveriges Geologiska Undersökningar. (2023). *Instabila metallpriser under 2022*. Hämtad 3 maj 2023, från <https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2023/januari/instabila-metallpriser-under-2022/>
- Threewitt, C. (2022). *How Gas Compression-ignition Engines Work*. Hämtad 3 maj 2023, från <https://auto.howstuffworks.com/gas-compression-ignition-engines.htm>
- Tire, R., & Repair, A. (2020). *How Does a Car's Muffler Work?* Hämtad 12 april 2023, från <https://www.ronstireandautorepair.com/About/News/ArticleID/9878>
- Tkachev, V. I., Vytvyts'kyi, V. I., & Hrebenyuk, S. O. (1998). *Multicyclic fatigue of steels in hydrogen under high pressures*. <https://doi.org/10.1007/BF02362622>
- Truschner, M., Trautmann, A., & Mori, G. (2021). The Basics of Hydrogen Uptake in Iron and Steel. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 166. <https://doi.org/10.1007/s00501-021-01142-x>
- Universal Technical Institute. (2021). *WHAT IS A CATALYTIC CONVERTER AND WHAT DOES IT DO?* Hämtad 12 april 2023, från <https://www.uti.edu/blog/automotive/catalytic-converter>

- Usuda, T., Matsuno, K., Matsunaga, H., Yanase, K., & Endo, M. (2013). Hydrogen-induced ductility loss in cast irons. *Materials Science Forum*, 750, 260–263. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.750.260>
- WADA, Y. (2005). 307 Evaluation of metal materials for hydrogen fuel station. *Proceedings of the 1992 Annual Meeting of JSME/MMD, 2005*. [https://doi.org/10.1299/jsmezairiki.2005.0\\_185](https://doi.org/10.1299/jsmezairiki.2005.0_185)
- Walker. (u. å). *WHAT PARTS MAKE UP THE EXHAUST SYSTEM?* Hämtad 12 april 2023, från <https://www.walkerexhaust.com/support/exhaust-101/what-parts-make-up-the-exhaust-system.html>
- Valvoline. (2020). *What is the difference between diesel and petrol engines*. Hämtad 3 maj 2023, från <https://www.valvolineglobal.com/en-eur/difference-between-diesel-and-petrol-engines/>
- van Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2016). *Internal Combustion Engine Handbook - Basics, Components, System, and Perspectives (2nd Edition)* (R. van Basshuysen & F. Schäfer, Red.). SAE International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpICEHBC04/internal-combustion-engine/internal-combustion-engine>
- Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., & Czerwiński, A. (2022). Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review. [160737771]. *Energies (19961073)*, 15, 8937. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=160737771&site=eds-live&scope=site&authtype=guest&custid=s3911979&groupid=main&profile=eds%2010.3390/en15238937>
- VätgasSverige. (u. å). *HUR TILLVERKAS VÄTGAS?* Hämtad 2 februari 2023, från <https://vatgas.se/fakta/hur-tillverkas-vatgas/>
- Yamabe, J., Takagoshi, D., Matsunaga, H., Matsuoka, S., Ishikawa, T., & Ichigi, T. (2016). High-strength copper-based alloy with excellent resistance to hydrogen embrittlement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 15089–15094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.156>
- Yamagata, H. (2005). *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845690854>
- Zumdahl, S. S. (u. å). *Covalent hydrides*. Hämtad 21 februari 2023, från <https://www.britannica.com/science/hydride/Covalent-hydrides>

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP**  
**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**