

NULLFIB

DELRAPPORT 2: BATTERITOG

VEDLEGG B, BATTERITEKNOLOGI

Innledning og sammendrag

“Electric-truck maker Nikola Corp. claims 'game-changing' battery advancements. Large, fully loaded electric trucks powered by Nikola's prototype battery could drive 800 miles between charges. The company plans to unveil the new battery technology in greater detail at its Nikola World 2020 demonstration.” (1)

Toyota har også meddelt noe tilsvarende, ved at biler vil ha den dobbelte kjørelengden i forhold til dagens nivå i 2021.

Utviklingen av batteriteknologi går raskt, og når dette vedlegget til delrapport 2 er ferdig, har det allerede gått ut på dato.

Beskrivelsen av batteriteknologi i dette vedlegget gir en oversikt over nåsituasjonen og fremtidige retning for utviklingen av batterier for kjøretøy. Forskningsartikler, artikler i media og informasjon gjennom samtaler med relevante produsenter som beskriver utviklingen er vurdert og tatt med.

Flere av batteriteknologiene som beskrives vil antagelig aldri bli kommersialisert eller bli tilgjengelig for jernbaneformål. I tillegg vil vi se at nye teknologier stadig utvikles. Det er ingen som med sikkerhet kan si hvordan utviklingen innen batterier vil bli for eksempel om 15 år. En ting er sikkert, og det er at intensiteten innen forskning og utvikling for batterityper for transportsektoren og forøvrig alle andre sektorer er inne i en tidsalder hvor den globale etterspørselen er markant økende. Et passende uttrykk for å forklare markedssituasjonen kan være: «the winner takes it all».

Dagens Litium-ion batterityper som hovedsakelig benyttes innen transport, vil fortsatt bli videreutviklet inntil ny teknologi med bedre og sikrere batterityper overtar. Et eksempel kan være faststoffbatterier, hvor energitetthet og levetiden synes å kunne bli betydelig bedre. Her kan det antas 3-4 dobling av dagens energitetthet, som gir tilsvarende økning i kjørelengde. Forskingen antar at dette inntreffer i perioden 2025-2030. Når vi leser de første kapitlene i denne innledningen, kan det være mulig at «post»-litium-ion inntreffer mye tidligere enn antatt.

Forskingen viser at energitettheten i batterier for transportmarkedet vil dobles i løpet av 5-10 år og at prisen gradvis reduseres med 60% i tidsperioden. Innen 2050 vil rekkevidden for kjøretøy være 4 dobbelt. Et batteritog ser da ut til å kunne kjøre 480 km mellom hver lading. Ved overgang fra væskefylte Litium-ion batterier til faststoff batterier vil også sikkerheten for batterier bli bedre.

Prosjektnummer: 21007122	Saksnummer: 201900404-1	Revisjon: 00
Utarbeidet av: Dag Wilhelm Aarsland	Kontrollert av: Geir Vadseth	Godkjent av: Stephen Oommen

Innhold

1 Batteriteknologi	4
1.1 Viktige batteriegenskaper.....	4
1.1.1 Energitetthet	4
1.1.2 End of Life (EoL).....	4
1.1.3 Syklusliv.....	4
1.1.4 Depth of Discharge (DoD).....	4
1.1.5 State of Charge (SoC)	4
1.1.6 C-rate (og D-rate).....	4
1.2 Batterityper	4
1.2.1 Nikkel-batterier	5
1.2.2 Litiumbatterier	5
1.2.3 Litium Titanat batteri (LTO).....	5
2 Batteriteknologi for bruk innen jernbane	9
2.1 Egnethet for jernbanekjøretøy.....	9
2.2 Produsenter av LTO batterier	11
2.2.1 Litium-ion, LTO batterispesifikasjoner for jernbanekjøretøy.	11
2.3 Systemrisiko og teknologisk utfordring med batteri i lokomotiv.	13
2.4 Utvikling av 'Last-mile' batteridrift.....	13
3 Perspektiv på batteriutvikling	15
3.1 Batteri-keramikk.....	16
3.1.1 Grafenbatterier	16
3.1.2 Aluminium-air	16
3.1.3 Litium-luft	16
3.1.4 Faststoffbatteri Litium-svovel.....	17
3.1.5 Natrium-ion batterier	17
3.1.6 Videreutviklingen av Litium-ion	17
3.1.7 Grafenbatteri.....	18
3.1.8 Aquabatteri.....	19
3.2 Sammenligning av potensialet for noen forskjellige batterikjemier.....	19
3.2.1 Generasjonsinndeling av batteriteknologier	20
3.3 Forventet utvikling av energitetthet og prisnivå	21
4 Referanser	23

1 Batteriteknologi

Det finns flere forskjellige typer batterier, og deres egnethet for mobilitetsløsninger varierer. Dette kapittelet vil derfor beskrive teknologisk utvikling og hvilke(t) batteri som er best egnet for bruk i jernbanekjøretøy. Egnetheten vurderes på grunnlag av seks kjennetegn:

- Kapasitet
- Strøm
- Sikkerhet
- Ytelse
- Livstid
- Kostnader

1.1 Viktige batteriegenskaper

1.1.1 Energitetthet

Energitettheten til et batteri er mengden energi per masseenheter eller volum. Energitettheten angir den maksimale energien som kan lagres i et batteri per kilogram eller per liter. Disse er oppgitt i henholdsvis Wh /kg og Wh /L.

1.1.2 End of Life (EoL)

End-of-Life grensen defineres som det tidspunktet da et batteri har nådd 80% av spesifikasjonen til et nytt batteri. Denne 80% grensen er satt fordi batteriet ikke lenger kan levere den tiltenkte kapasiteten som for et nytt batteri. En lavere prosentandel forårsaker ofte problemer, fordi en lavere kapasitet betyr at det er nødvendig å lade oftere, slik at batteriet slites raskere og levetiden og kapasiteten vil avta enda raskere. Selv ved EoL har batteriet fremdeles mye gjenværende levetid og kan eventuelt overhales/revitaliseres eller benyttes til andre formål.

1.1.3 Syklusliv

Batteriets levetid er gitt i antall sykler. Dette er det antall ganger et batteri kan levere full energi før batteriets kapasitet reduseres til EoL-punktet (80% av den opprinnelige kapasiteten). For batterier gjelder dette uavhengig av hvor ofte lading skjer i mellomtiden. Å bruke 75% av energien en gang, deretter lade opp i kort tid og deretter bruke 25% av energien sammen tilsvarer 100% av energien og derfor en syklus. Det spiller ingen rolle hvor ofte det blir utladet, hvis den totale energimengden som brukes er 100% av batteriets opplading, så teller dette som en syklus.

1.1.4 Depth of Discharge (DoD)

Den utladede tilstanden (DoD) indikerer hvor mye batteriet er utladet i prosent av batteriets maksimale kapasitet. Ofte, jo dypere batteriet er utladet, jo kortere levetid.

1.1.5 State of Charge (SoC)

Batteriets oppladde tilstand (SoC) er det gjeldende energinivået uttrykt i prosent av batteriets maksimale kapasitet.

1.1.6 C-rate (og D-rate)

C- og D-hastigheten er et mål på den maksimale oppladning- (C) og utladingshastigheten (D) for et batteri. Dette er en viktig parameter for muligheten for lading, fordi mye energi kan overføres på kort tid. Ved 1C lades et batteri på 1 time og tømmes på 1 time i 1D. Ved 2C lades det samme batteriet på 30 minutter med en strøm som er dobbelt så stor. Denne parameteren vises vanligvis som 4C / 8D for et batteri.

1.2 Batterityper

Det er 2 hovedtyper av batterikjemi som benyttes innen transport i dag:

- Nikkel-batterier
 - o Nikkelkadmium
 - o Nikkelmetallhydrid

- Litiumbatterier
 - o Karbon grafitt (C) anode med katode av metalloksid (MOX)
 - o Lithium Titanium Oxide (LTO) anode med en metalloksydkatode
 - o Nikkel Magnesium Kobolt (NMC)
 - o Nikkel-kobolt-aluminiumoksyd (NCA)

Det finnes flere typer batterier med forskjellige varianter av materialer på markedet, men de ovennevnte typene er de viktigste. Batteritypene blir forklart nedenfor.

1.2.1 Nikkel-batterier

Nikkel-batterier kommer i form av nikkel-kadmium, nikkel-metallhydrid, nikkel-hydrogen og nikkel-sink-batterier. Disse batteritypene brukes under ekstreme klimaforhold, sykliske forhold eller hurtigladede forhold. Batteriene er egnet for både høye temperaturer og lave temperaturer og kan resirkuleres. Kapasiteten varierer fra 0,5 Ah til 2000 Ah, og energieffektiviteten er mer enn 95%, avhengig av bruken. Ulemper er den relativt høye prisen, begrenset antall lade- og utladningssykluser og "minneeffekten" som kan føre til tap av kapasitet.

1.2.2 Litiumbatterier

Litiumbatterier har vært i bruk siden 1990-tallet og er nå mye brukt innen alle bruksområder. Det er mange typer litiumbatterier som alle har sine spesifikke fordeler og ulemper. De viktigste typene er:

- Litium Nikkel Mangan Kobolt Oksyd (NMC)
- Litium Titan Oksyd, LitiumTitanat (LTO)

Disse typene Litium batterier inngår i gruppen Litium-ion (Li-ion), og brukes i biler, elektriske busser og jernbanekjøretøy. Spesielt NMC batteritypen er kompakt, billig, lett og har en høy energitetthet, mens LTO batteritypen er tyngre og mer kostbar.

1.2.3 Litium Titanat batteri (LTO)

Litium-titanatbatteriet ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, referert til som LTO i batteribransjen) er en type oppladbart batteri basert på avansert nanoteknologi, som har følgende fordeler fremfor andre litiumbatterier.

Fordeler LTO:

- Batteriet har et større driftstemperaturområde (-30-55 °C) og en oppladningseffektivitet som overstiger 98% sammenlignet med andre karbonbaserte batterier.
- Batteriene har et høyt livsløp > 25 000 full-lade sykluser.
- Batteriet har høy sikkerhet og høy stabilitet. Den sikreste batterikjemien på markedet.
- Batteriene er raskere å lade enn andre Li-ion-batterier. Data viser at disse batteriene trygt kan lades med hastigheter høyere enn 10C.
- Batterier er mer miljøvennlig enn andre batterityper.

Ulempe:

Ulempen er at LTO batterier har en lavere ibrørende spenning (2,4 V/celle), noe som fører til en lavere energitetthet enn konvensjonelle Li-ion batteriteknologier. Batteritypen er derfor tung.

Bruksområder:

LTO batterier er ideelle for applikasjoner med høyt effektuttak, hurtig lading og høyt antall sykluser. På grunn av fordelene når det gjelder høy sikkerhet, høy stabilitet, lang levetid og gode klima relaterte funksjoner, kan LTO batterier brukes til mange formål. Noen eksempler er områder som militær, luftfart, elektriske kjøretøy som batteritog, busser og ladestasjoner.

I hovedsak er LTO et oppladbart batteri basert på eller modifisert fra Li-ion batteriteknologi. Li-titanatoksyd erstatter grafitten i anoden i det typiske Li-ion batteriet og danner materialet til en spinell 3D-kristallstruktur. Med en nominell celledspenning på 2,40 V, frigjøres det en høy strømutladningsstrøm som har 10 ganger kapasiteten til de andre typene litiumbatterier. I stedet for å bruke karbonpartikler på overflaten slik andre litiumbatterier gjør, bruker LTO nanokrystaller.

Batterilevetid

Levetiden til litiumbatterier avhenger av forskjellige faktorer. En faktor er hvor dypt batteriet er utladet (DoD). Dette vil påvirke om batteriet varer lenger eller kortere. En annen parameter som er avgjørende for levetiden er antall sykler. Som et eksempel oppgir en batteriprodusent (se Tabell 1) at den sykliske levetiden er 15 000 sykler ved romtemperatur når batteriet utlades 100% (DoD=100%). Vedlegg A presenterer et batteriscenario for Nordlandsbanen og hva som kreves av kapasitet og levetid.

Tabell 1: Tekniske spesifikasjoner for Litium Titanat (LTO), Leclanché

Technical specifications	
Rack specifications	
String format	19" triple rack
Battery modules in series	15
Battery voltage	510 – 810 V DC
Operational current (2C/2C)	180 A
Maximum current per string	300 A
Nominal capacity	63 kWh (C/10)
Specified number of cycles (1C/1C; 23°C; 100% DOD)	up to 15.000
Dimension (HxWxD)	2300 x 1800 x 600 mm
Weight	1800 kg
Temperature range	10°C up to 30°C
Module specifications	
Cells	Leclanché 936C08 Titanate
Architecture	60 cells; 3 parallel 20 serial
Capacity	4.200 Wh (C/10)
Nominal voltage	46 V
Voltage range	34,0 - 54,0 V
Nominal current (1C)	90 A
Maximum current	300 A
Cycles	15.000 (100% DoD at room temperature)
Temperature (operation)	+0°C to +40°C
Humidity	< 95 % (non condensing)
Dimensions (WxHxD)	463 x 356x 550 mm
Weight	99 kg
Protection class	IP20
Certification	CE, UN 38.3, IEC 61010

For batterier av typen LTO og NMC er levetiden som funksjon av DoD (Depth of Discharge) som vist i Figur 1.

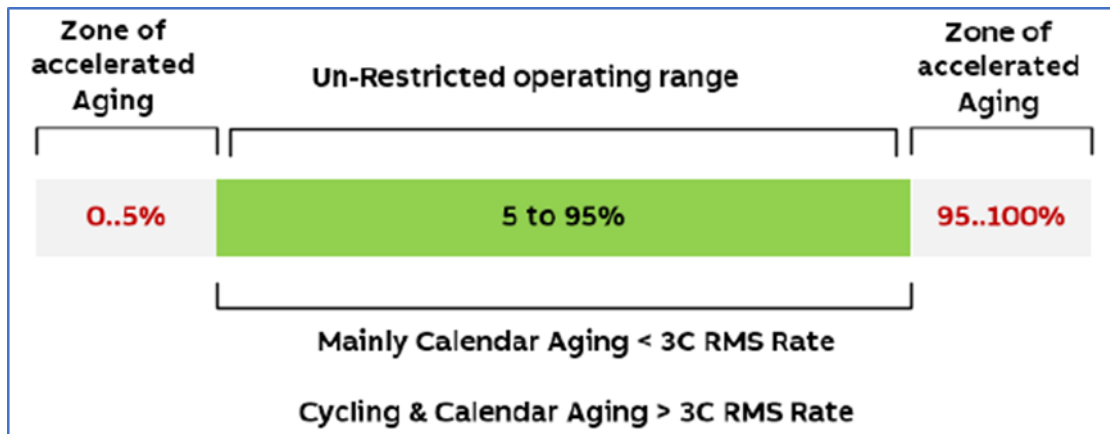
Depth of discharge	Discharge cycles (NMC / LiPO4) @1C	Cycles @1C (LTO) *Xalt	Cycles @4C (LTO) *Leclanche
100% DoD	~300 / 600	60,000	15,000
80% DoD	~400 / 900	90,000	21,000
60% DoD	~600 / 1,500	135,000	29,000
40% DoD	~1,000 / 3,000	?	?
20% DoD	~2,000 / 9,000	?	?
10% DoD	~6,000 / 15,000	?	?

Figur 1: Levetid som funksjon av DoD for LTO og NMC batterier

Det er forskjell på batteri for biler og batteri for jernbanekjøretøy. Bilprodusentene benytter NMC batterier, noe som betyr at ved 500 000 kjørte km og med rekkevidde av batteripakken på 350 km må batteriene anslagsvis klare 1 500 ladesykluser.

Figur 2 viser LTO batterienes gunstigste område for minimum restkapasitet og maks oppladning. En produsent av jernbanekjøretøy benytter området 15%-90% som nedre (State of Discharge) og øvre (State of Charge) grense for at batteriene ikke skal forringes.

En produsent regner et nominelt energibehov i batterier høyere enn det faktiske energibehovet for å kunne kjøre en strekning. Et eksempel kan være et nominelt energibehov på 3,6-4MWh, mens behovet er 2MWh. For å oppnå lang syklisk levetid anbefaler produsenter å bruke 50-55% av total batterikapasitet og at 'State of Charge' bør være mellom 25% og 75% av total kapasitet. Hvis man i et tilfelle for eksempel legger opp til et område 15-85% (State of Discharge=15% og State of Charge=85%) reduseres levetiden. Hvilket område som gir optimal levetid er avhengig av batteriteknologien.



Figur 2: Illustrasjon av LTO batterienes gunstigste område for minimum restkapasitet og maks oppladning.

Ladehastigheten (C-rate) og temperatur påvirker også levetiden. Jo høyere lastehastighet og / eller temperatur, jo kortere levetid. Levetiden kan forlenges ved å bruke batteriene under optimale forhold. Hva som vil være de mest optimale forholdene for ladestrekningenes lengder, intervaller og lokasjoner må analyseres nærmere og sees på i en eventuell detaljprosjektering. Termiske styringssystem er vist å være effektivt i å forlenge batteriets levetid, spesielt for de tyngste/dypeste utladningene og hyppige ladetidssyklusene. God termisk styring reduserer standardavviket for levetiden til et batteri for et gitt driftssyklusområde. Nøyaktig kjøling av battericellene vil bidra til å styre levetiden når battericellene varmes opp, for eksempel ved opp- og utlading.

Antall driftssykluser og hyppigheten av ladescenarier er avgjørende for batterilevetiden. Spesielt for systemer med for små batterier, da et for lite batteriet tømmes ofte. Batteristørrelsen må derfor dimensjoneres i forhold til hva som ønskes av levetid for batteriet. Batteri-styringssystemer bygges derfor for å kunne optimalisere levetiden både med tanke på innkjøp-/investeringskostnader og miljøaspekter knyttet til produksjon og deponering.

Dagens status på batteriteknologi (SINTEF, 2019)

Figur 3 viser en oversikt over kommersielle Litium-ion batterityper. Verdiene er for **enkeltceller** og er hentet fra produktblad fra Altair Nano, Kokam, Leclanché, Panasonic, XALT, Lithium Werks og A123 (2). Sammenligningen er gjort med følgende kriterier: Sykluslevetider ved 25 °C, 100% DoD, 1C og 80% feilrate.

Batteritype	Energitetthet		Ladehastighet	Sykluslevetid sykluser
	Wh/kg	Wh/l		
LTO	75-100	150-175	opp til 6C	>25000
NMC/NCA - grafitt (Høy kapasitet)	200-260	450-500	opp til 2C	>3600
NMC/NCA - grafitt (Høy effekt)	150-200	400-450	opp til 3C	>5000
LFP - grafitt	10-130	235-250	opp til 4C	>7000

Figur 3: Egenskaper til batterityper (2).

Tabellen i Figur 3 viser at LTO batteriet har adskillig høyere sykluslevetid og kan lades adskillig raskere enn de øvrige batteritypene. NMC batteriene har den dobbelte av energitettheten til LTO, som betyr lettere vekt i batteriinstallasjoner.

2 Batteriteknologi for bruk innen jernbane

2.1 Egnethet for jernbanekjøretøy

Batteriet i et batteritog er energilageret som skal sikre kjøretøyets behov for å kunne kjøre en strekning i tillegg til behovet for komfortelementer som lys, oppvarming, ventilasjon og kjøling. I tillegg er det et lager for å oppta energi som gjenvinnes fra kjøretøyets bremsing (e-brems). Et batteritog av typen togsett har normalt flere batteripakker. Dette er gjort for å kunne fordele vekten av den totale batterikapasiteten på flere vogner/vognakslinger. Dette gir også den fordel at dersom det oppstår feil i en batterimodul i en batteripakke, kan denne kobles ut og kjøretøyet vil fremdeles ha mulighet for begrenset kjøring.

Batteriene som egner seg for bruk i tog er ikke nødvendigvis de samme som de som egner seg for bruk i biler. Togets energiforbruk er mindre følsomt ovenfor vekt enn biler som følge av at tog ruller på stålhjul og ikke på luftfylte gummi hjul. Gummi hjul gir en adskillig høyere rullemotstand og som også øker ved økt last. I tillegg er levetiden på tog vesentlig lengere enn for biler, så behovet for levetid i batteriene er dermed mye viktigere for driftsøkonomien.

Batteriets levetid kan deles inn i to kategorier: Øyeblikkelige feil og progressiv degradering/aldring avhengig av antall.

Øyeblikkelig feil av en battericelle skjer vanligvis på grunn av en intern kortslutning. Dette kan skyldes en produksjon eller designfeil, eller feil lading av batteriet. Når en slik kortslutning skjer kan ikke cellen lengre lagre energi og kortslutningen kan føre til en ukontrollert og rask temperaturstigning i batteriet med brann eller eksplosjon som resultat. En annen kilde til øyeblikkelige feil er eksponering mot for høye eller lave temperaturer.

Progressiv degradering (aldring) av for eksempel et Li-ion batteri er i stor grad bestemt av hvordan batteriet blir oppbevart og brukt. Degradering skjer under alle forhold, men med forskjellig hastighet avhengig av bruk og miljø. Tøffe driftsforhold som lave eller høye driftstemperaturer, overladning, dyp utlading og høyt strømtrekk øker degraderingen. Degradering av batterier kan forenklet deles inn i to parallelle, men ikke nødvendigvis additive prosesser: kalender- og syklusaldring.

Kalenderaldring skjer kontinuerlig, selv om batteriet ikke er i bruk og avhenger av eksterne forhold, spesielt temperaturen samt spenningen på batteriet.

Syklusaldring er i tillegg avhengig av hvordan og hvor mye batteriet lades og utlades, og oppleves som tap av kapasitet og effekt.

Foruten sikkerhetsaspekter er batteriets levetid (sykel-levetiden) et viktig fokusområde. Dette beskriver antallet fulle sykler som batteriet kan levere under standard driftsforhold før kapasitet og kraft faller til 80 % sammenlignet med et nytt batteri.

Det er spesielt to typer Li-ion batterier som benyttes innen transport; NMC og LTO. Kjemien i disse batteritypen kan endres og tilpasses spesifikke bruksområder, men de har allikevel vesentlige forskjeller:

Som tidligere nevnt er NMC batterier velkjent og brukt i biler. Denne batteritypen er lett og har en høy spesifikk energitetthet, men har en begrenset syklisk levetid på ca. 1500 ladinger. Dette vil være tilstrekkelig for levetiden for en bil, men ikke tilstrekkelig ved hyppige ladinger som er et behov innen kollektivtrafikk.

Figur 4 viser den store forskjellen i levetid i antall ladesykler og selvutlading for batterityper. Dette viser at LTO batteriet har overlegent antall ladesykler og har lav prosent selvutlading pr. måned.

NiCd vs. NiMH vs. Li-ion vs. Li-polymer vs. LTO [\[edit \]](#)

Types	Cell Voltage	Self-discharge	Memory	Cycles Times	Temperature	Weight
NiCd	1.2V	20%/month	Yes	Up to 800	-20°C To 60°C	Heavy
NiMH	1.2V	30%/month	Mild	Up to 500	-20°C To 70°C	Middle
Low Self Discharge NiMH	1.2V	1%/month - 3%/year ^[58]	No	500 - 2000	-20°C To 70°C	Middle
Li-ion (LCO)	3.6V	5-10%/month	No	500-1000	-40°C To 70°C	Light
LiPo (LCO)	3.7V	5-10%/month	No	500-1000	-40°C To 80°C	Lightest
Li-Ti (LTO)	2.4V	2-5%/month ^[46]	No	6k-20k	-40°C To 55°C	Light

Figur 4: Sammenligning av egenskaper for batterier.

LTO batterier benyttes hovedsakelig i tyngre kjøretøy. Batteriet har lavere spesifikk energitetthet enn NMC, dvs. det er tyngre, men klarer imidlertid et høyere effektuttak og et adskillig høyere antall ladesykler. Denne batteritypen har bedre kuldeegenskaper, har en syklisk levetid på > 25000 ladinger og kan lades hurtig (lynloading). Produsenter hevder ladetider ned mot 7 minutter.

Kostnaden for LTO batteriet er høyere enn for NMC. Typiske bruksområder for LTO er batteritog og busser.

Dimensjoneringen av energilageret (batterikapasiteten) for et batteritog er avhengig banestrekningens lengde, kjørehastighet, stoppmønster, høydeprofiler, behov for lys, oppvarming, kjøling, ventilasjon mm. I tillegg vil det måtte gjøres en beregning av hvor stor effekt det er behov for å kunne mate tilbake til batteriet fra kjøretøyets e-bremse ved drift på den aktuelle banen.

Batteripakker for jernbanekjøretøy må oppfylle følgende betingelser:

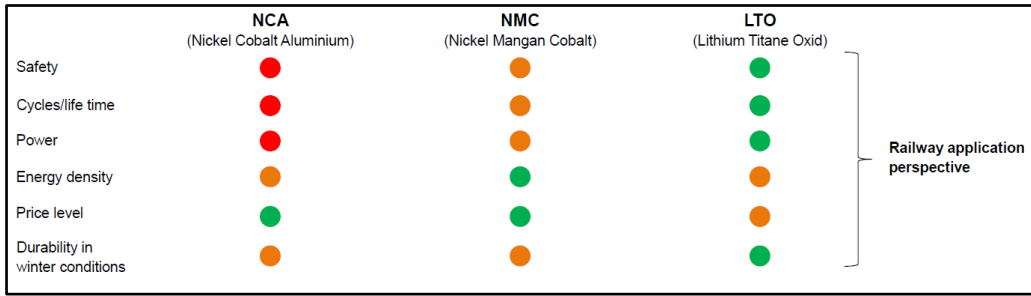
- Det må være mulig å lade mye energi på kort tid, høy C-rate.
- Batteriet må ha en tilstrekkelig høy energitetthet på grunn av begrensninger i tilgjengelig plass og vekt.
- Batteriene må ha et godt pris/ytelsesforhold.
- Batteriet må ha høy syklisk levetid.

Tatt i betraktning disse forholdene, ser LTO-batteriene ut til å være det mest passende valget. LTO-batterier oppfyller nesten alle de oppgitte forholdene. LTO-batterier er dyrere enn NMC-batterier, men det kompenseres med lengre levetid. NMC-batterier (og andre litiumbatterityper) kan heller ikke lades med en C-hastighet på 4C, noe som antas å være nødvendig.

Levetiden på batterier kan forlenges ved drift under optimale forhold. Hva som vil være det mest optimale i forhold til ladestrekningenes lengder, intervaller og lokasjoner må analyseres nærmere og sees på i en eventuell detaljprosjektering.

Siemens illustrerer egnetheten for jernbanekjøretøy for de forskjellige batteritypene som vist i Figur 5. Illustrasjonen viser at LTO-batterier er de mest egnede batteriene for nullutslippstog. NMC har høyere energitetthet, men LTO scorer bedre på levetid (sykluser) og ladekapasitet. LTO-batterier er dyrere enn NMC-batterier, men dette kompenseres av lengre levetid og det faktum at LTO-batterier klarer å lade med en høy C-hastighet (hurtiglading), er sikrere og har bedre kuldeegenskaper.

Forskningen viser imidlertid til at kombinasjonen av batterikapasitet, masse, ladehastighet og pris, gjør at NMC-batteriene vil bli et lovende alternativ.



Figur 5: Sammenligning av egnethet for bruk i batteritog. (Kilde: Siemens Mobility)

2.2 Produsenter av LTO batterier

LTO-batterier er produsert av noen få produsenter. De største er Leclanché, Toshiba, Xalt Energy, Kokam, Altairnano og ABB.

2.2.1 Litium-ion, LTO batterispesifikasjoner for jernbanekjøretøy.

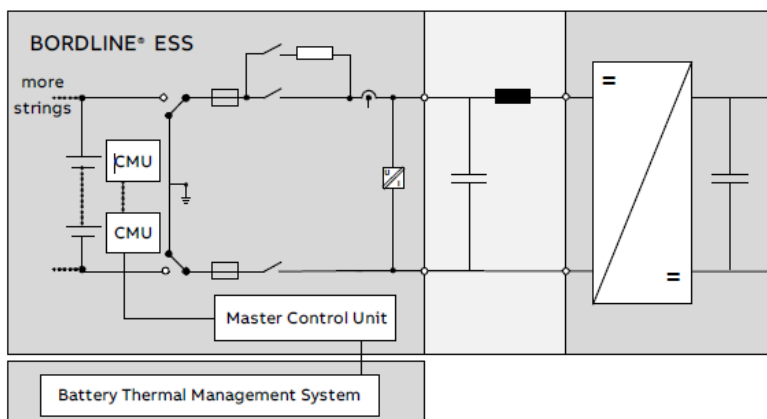
Figur 6 viser en batterimodul med energitett på 79 Wh/kg. Flere batterimoduler kan kobles sammen til ønsket behov, men med en begrensning på totalt 16 stk. Dette vil som et eksempel gi 1,26 MWh. I tillegg til batterimodulene er det blant annet behov for kjølesystem, innfestingsrammer og installasjoner i tilknytning et batteriovervåkningssystem (BMS). Det er litt usikkerhet rundt hva systemets totale energitett vil være når hele batterisystemet er montert i et batteritog. Det er uttalt at den vil være ca. 40 Wh/kg. Dette betyr at den maksimale batterikapasiteten for eksemplet her med 16 stk. moduler gir 0,64 MWh. Sammenkoblede moduler satt i et system betegnes som batteripakke. Batteripakker bygges for plassering på for eksempel batteritogets tak, under i ramme eller i innvendige rom. Et eksempel på en batteripakke er vist i Figur 9.



Figur 6: ABB BORDLINE® Battery Module BPW

Technical data		
Cell technology	Lithium-ion (LTO)	
Cell format	prismatic metal can	
Nominal voltage	55 V	
Configuration	24S2P	
Typical energy	2.6 kWh	
Charging current, 25°C	avg	184 A (4C)
	max	368 A (8C) for 30s
Discharging current, 25°C	avg	184 A (4C)
	max	368 A (8C) for 30s
Cell monitoring and balancing	integrated	
Master BMS	external	
Typical cycle life (80% DoD), 25°C	> 20'000 cycles	
Specific energy	104 Wh/l	
Energy density	79 Wh/kg	
Power interface	BCC-S10	
Test voltage	2.8 kVac / 10s	
Thermal management	liquid cooled	
Operating temperature range	-30°C to +45°C	
Conformity	UN 38.3	
	IEC 62928	
	ISO 12405	

Figur 7: Utklipp av Tekniske data for ABB BORDLINE® Battery Module BPW (3).



Cell Monitoring Unit (CMU)

Figur 8: Illustrasjon av forenklet blokk-diagram for BORDLINE® ESS (3).



Figur 9: Eksempel på batteripakke (3).

2.3 Systemrisiko og teknologisk utfordring med batteri i lokomotiv.

Lokomotiver benyttes i stor utstrekning til godstransport og langdistanse persontrafikk. Dette krever spesielt mye batterikapasitet eller hyppig lading. Utfordringen er å få installert mye batterikapasitet. Det er pr. i dag ingen produsenter som produserer hybride lokomotiver for KL- og batteridrift for langdistansekjøring. Jernbanedirektoratet er heller ikke kjent med at det er utviklet konsept for batteripakke i lokomotiv for langdistansekjøring. Det finnes batteridrevne skiftelokomotiver for begrenset bruk og spesiallokomotiver for gruvedrift, men som ikke er egnet for lange strekninger.

LTO batterier er tunge og har lav energitetthet, noe som gir lavere batterikapasitet for lokomotiv enn for eksempel NMC Litium-ion batterier. Batterisystemet inne i et lokomotiv med høyt effektuttak og kraftig opplading krever stor kjølekapasitet.

Væskekjølt NMC-systemer er ikke tilgjengelig fra erfarne underleverandører til produsenter av jernbanekjøretøy. Det har med bakgrunn i dette vist seg at batteristørrelser over 500 kWh innebærer et område med stor usikkerhet.

Det finnes leverandører for luftkjølte systemer, men spesielt for NMC batterityper innebærer dette en for stor risiko, samt at den mulige kapasiteten vil være lavere grunnet problematikk for plassering av kjøling og batteriene på egnede steder.

En produsent opplever det som problematisk å få leverandører av større batteriinstallasjoner for jernbanekjøretøy til å se sammenheng, ta systemansvaret og risiko for batteridrift, når det gjelder integrasjonen av systemene for kjøling, omformer og batteri. Dette vil være avgjørende for utviklingen av batteritog (lokomotiv) med innebygd stor batteripakke.

2.4 Utvikling av 'Last-mile' batteridrift.

Det er ingen definisjon for hva som er kjørelengden for en 'Last-mile' batteripakke, men det forstås som en kjørestrekning på 5 km.

Shift-2-Rail (S2R) i samarbeid med bransjen utvikler en skalerbar batterielektrisk 'last-mile' fremdriftssystem som kan komplettere eller erstatte eksisterende dieselmotorer for korte kjøreavstander, samt inne på godsterminaler. Spesielt er det viktig å bemerke at det satses på 6 ganger så mye batterikapasitet som dagens løsning.

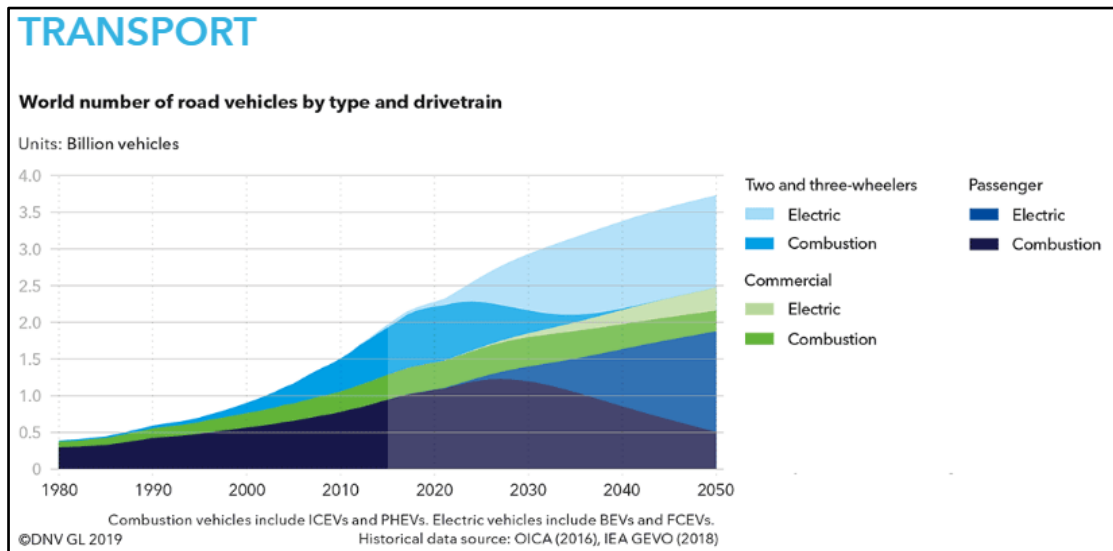
Hovedsakelig er dette rettet mot et marked for godstog som kjører på ikke-elektrifiserte havneområder, godsterminaler, men også for passasjertog som kjører på ikke-elektrifisertlinjer med behov for å komme inn på forurensningssensitive områder, som for eksempel byområder. Batteripakke for 'Last-mile' drift vil også være til hjelp for persontog med å få toget frem til neste stasjon eller ut av tunell dersom det oppstår feil i strømforsyningen. Figur 10 viser utklipp fra S2R-tiltakskataogen med de positive effekter satsningen på utvikling av 'last-mile' batteriløsningen vil gi. Batteriløsningen vil være tilgjengelig for industrialisering i 2022 (4).



Figur 10: Shift2Rail utvikling og effekter ved last-mile batteri.

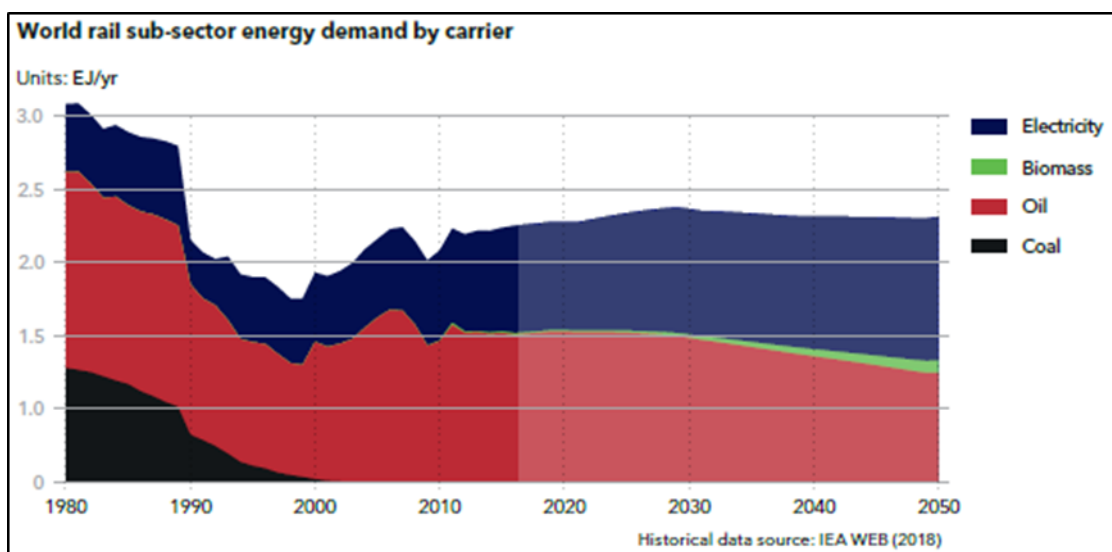
3 Perspektiv på batteriutvikling

I dag drives 97.5% av passasjertransporten på veg av forbrenningsmotorer (eks diesel), mens 2.5% er drevet av en elektrisk løsning. I 2050 vil 73% av kjøretøyflåten for passasjertransport være elektrisk drevet, og 27% fremdeles være drevet av forbrenningsmotorer. Det Norske Veritas GL (2019) konkluderer i sin rapport at det vil være en rask utvikling inne bruk av EV (Electrical Vehicles) (se Figur 11). Videre hevdes det at Kina og Europa vil se en 50/50 salg av elektrisk-drift/forbrenningsmotor i 2030.



Figur 11: Fremtidig utvikling på verdensbasis for antall transportkjøretøy og typer med elektrisk drift sammenlignet med forbrenningsmotor (5).

Figur 12 viser det globale energibehovet innen jernbane i perioden 1980 – 2050. I perioden 2020 til 2050 reduseres behovet for olje, mens behovet for elektrisitet og biomasse øker. Fordelingen er 54% elektrisitet, 41% diesel og 5% biodrivstoff i 2050.



Figur 12: Fremtidsutsikter for globalt forbruk innen jernbane, for forskjellige energiformer (6).

Innen en 10 års periode vil tilgangen til kobolt for produksjon av NMC batterier bli betydelig redusert. Det antas at det vil bli utviklet annen batteri-kjemi hvor kobolt erstattes med annet materiale. Forskning og utvikling vil muliggjøre en teknologjendring mot materialer med lavere Koboltinnhold. Dette vil påvirke katodematerialene først, og på sikt må alternative teknologier utvikles med mer bærekraftig sammensetninger og systemer som kan erstatte litiumbaserte batterier for også å avlaste presset på tilgjengeligheten av litium.

3.1 Batteri-keramikk

I løpet av det siste tiåret har to klasser innen batterikeramikk - LLZO (litium, lantan og zirkoniumoksyd) og LGPS (litium, germanium, fosforsulfid) - vist seg å være like gode ione-ledere i romtemperatur som væsker.

Toyota, i tillegg til Silicon Valley-nyetableringen QuantumScape (som samlet inn 100 millioner dollar i finansiering fra Volkswagen i fjor), jobber begge med å distribuere keramikk i Li-ion-batterier. Inkluderingen av de store aktørene er et tegn på at et gjennombrudd kan være nærmere enn mange tror.

"Vi er ganske nærme å se noe virkelig revolusjonerende (ved hjelp av keramikk) om to eller tre år," forteller Professor Venkat Viswanathan, Carnegie Mellons University (7).

3.1.1 Grafenbatterier

Grafenbatterier har potensialet til å bli en av de mest overlegne tilgjengelige batterityper. Grabat har utviklet grafenbatterier som kan tilby elektriske biler en kjøreevstand på opptil 800 km på en lading.

Graphenano, selskapet som står bak utviklingen, sier at batteriene kan lades for fullt på bare noen få minutter og kan lade og tømme 33 ganger raskere enn Li-ion.

Det er ikke beskrevet om Grabat-batterier for tiden brukes i noen produkter, men selskapet hevder å ha batterier tilgjengelig for biler, droner, sykler og hjem (8).

3.1.2 Aluminium-air

Bilen i Figur 13 har klart å kjøre 1700 km på en enkelt batterilading. Hemmeligheten bak dette superbatteriet er en type batteriteknologi kalt aluminium-luft som bruker oksygen fra luften for å fylle katoden.

Energitettheten til aluminium-luft batterier er 8 000 Wh/kg. Dette gjør det langt lettere enn væskefylte Li-ion batterier, og gir kjøretøy betydelig lengre rekkevidde (8).

Metall-luftbatterier, inkludert sinkluft, litiumluft og magnesiumluft, er også under utvikling. Denne batteritypen vil kunne komme på markedet rundt 2030.



Figur 13: Denne bilen har kjørt 170 mil på en lading

3.1.3 Litium-luft

Litium-luft batteriet har adskillig høyere energitetthet enn det som er mulig med dagens Li-ion-teknologier. Batteriet bruker en katalytisk luftkatode som bruker oksygen fra luften, en elektrolytt og en litiumanode. Den teoretiske spesifikke energien (energitettheten) til litium-luft er 13 000 Wh/kg. Hvis denne energien virkelig kan leveres, vil metall-luft, som batteriet også kalles, være på nivå med bensin på omtrent 13 kWh/kg.

Litium-luft ble foreslått som batteritype 1970-tallet og har nå skapt ny interesse delvis på grunn av fremskritt innen materialvitenskapen og forsøk på å finne et bedre batteri for elektriske traksjonssystemer (9).

3.1.4 Faststoffbatteri Litium-svovel

Forskning og utvikling innen faststoff-litiumbatterier har spesielt fokus på sikkerhet og energitetthet. Energitettheten er i størrelsesorden 550 Wh/kg. Videre utvikling av cellemateriale og celleoptimalisering er nødvendig før markedsføring rundt 2030.

Sammenlignet med Li-ion batterier med flytende elektrolytter, er faststoff-batterier et attraktivt alternativ på grunn av potensialet til forbedret sikkerheten samt høy effekt og høy energitetthet. Til tross for omfattende forskningsinnsats, svarer ikke utviklingen av denne batteritypen foreløpig til forventningene. Dette er hovedsakelig på grunn av mangel på egnede materialer for elektrolytten, som kreves for praktiske anvendelser.

En produsert battericelle basert på en nyutviklet litiumleder har vist seg å ha veldig liten indre motstand, spesielt ved 100 °C. Battericellen har høy spesifikk effekt som er overlegen sammenlignet med konvensjonelle celler med flytende elektrolytter. Det vises også stabil lade-/utladingsykluser med en høy strømtetthet på 18C (der C er C-hastigheten) med lading/utladning på bare tre minutter (10). Batteritypen forventes å være kommersielt tilgjengelig 2020, og brukes i biler i 2025 (9).

3.1.5 Natrium-ion batterier

Forskere i Japan jobber med nye typer batterier som ikke trenger litium som for eksempel smarttelefonbatterier. Disse nye batteriene bruker natrium, et av de vanligste materialene på planeten i stedet for litium som det er en begrenset mengde av. Disse batteriene vil kunne være opptil syv ganger mer effektive enn konvensjonelle batterier.

Forskningen på natrium-ion batterier har pågått siden åttitallet i et forsøk på å finne et billigere alternativ til litium. Ved å bruke natrium det sjette vanligste elementet på jorden, kan batterier produseres mye billigere. Kommersialisering av batteriene forventes å begynne for smarttelefoner, biler m.m. de neste 5 til 10 årene (8).

3.1.6 Videreutviklingen av Litium-ion

Forskere ved Universitetet i Warwick har utviklet en ny teknologi som tillater at eksisterende Li-ion batterier kan lades inntil 5 ganger dagens tillatte ladestrøm. Teknologien innebærer konstant måling av batteriets temperatur mye mer nøyaktig enn dagens metode. Forskerne har funnet ut at batteriene faktisk kan 'pushes' utover anbefalte grenseverdier å påvirke ytelse eller overoppheting (11). Kanskje vi da ikke har behov for alle øvrige batterikjemier?

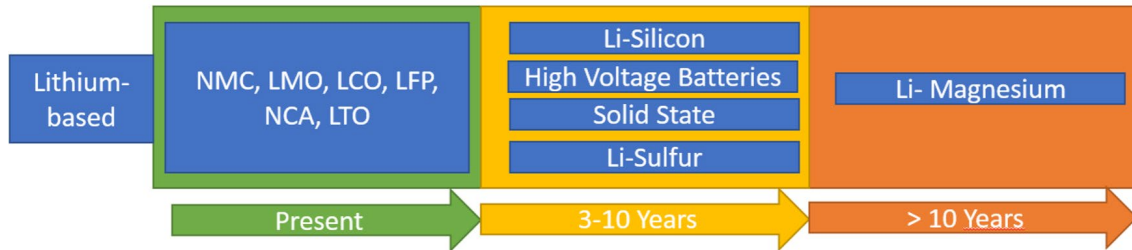
For tiden er LTO-batterier det beste valget for offentlig transportapplikasjoner. Gitt de batteridrevne elektriske kjøretøyenes popularitet, investeres det mye energi i utvikling av batterier. De mest lovende utsiktene er gitt nedenfor.

Nye litiumbatterityper

Dette kapittelet gir en beskrivelse av den fremtidige trenden som kan forventes de kommende ti år. En oversikt er gitt i Figur 14, som er begrenset til Li-ion batterier. Andre typer som Natrium-ion, Sink-luft, Litium-luft er fremdeles i en veldig tidlig fase og er derfor ikke med i oversikten.

Følgende litiumbatterityper ansees som de fremtidige mest lovende: litiumluft, litiummetall, faststoff-litium, litiumsvovel, litiumjern, litiumsilikon og litiummagnesium (12). Energitettheten for disse batteritypene varierer fra 90 Wh/kg til 400 Wh/kg. Antall sykluser er relativt lavt og kan gå opp til 2500. Noen av disse batteritypene har vært under utvikling i flere tiår, og spørsmålet er om de noen gang vil komme på markedet. Disse batteritypene er foreløpig ikke sett på som et alternativ for jernbanekjøretøy.

Figur 14 viser roadmap for dagens batterityper og hvilke som vil være kommersielt tilgjengelig frem til 2030 (12).



Figur 14: Roadmap for Litium-ion frem til 2030 (12).

Tabell 2 gir en oppsummering av forskningen med egenskaper for noen fremtidige batterityper (12). Den viser at det fremdeles er mye gjenstående forskning for å forbedre disse batteritypene før en eventuell kommersialisering. Historisk sett viser det seg at det tar lang tid fra batterikjemi utvikles i et laboratorie til det er gjennomførbart for praktisk bruk.

Tabell 2: Oversikt over tekniske data og status i utviklingen for nye batterityper.

Kjemi	Litium-luft	Litium-metall	Faststoff Litium	Litium-svovel	Natrium-ion
Type	Luft katode med litium anode	Litium anode med grafitt katode	Litium anode, polymer separator	Litium anode med svovel katode	Karbon anode og diverse katodematerialer
Cellespenning	1.7-3,2V	3,6V	3,6V	2,1V	3,6V
Spesifikk energi	13000Wh/kg (teoretisk)	300Wh/kg	300Wh/kg (estimert)	500Wh/kg eller mindre	90Wh/kg
Lading	Ukjent	Hurtiglading	Hurtiglading	0,2C (5timer)	Ukjent
Utlading	Lav effekt	Høy effekt	Dårlig ved kulde	Høy effekt (2500W/kg)	Ukjent
Syklisk levetid	50 sykler i laboratorie	2500	100 (prototype)	50 (omstridt)	50
Sikkerhet	Ukjent	Må forbedres	Må forbedres	Nødvendig med egen beskyttelses-krets	Sikker, kan muligens også sendes med fly
Historie	Påbegynt på 70-tallet	Produsert på 80-tallet	Påbegynt på 70-tallet	Ny teknologi	Ignorert på 80 tallet pga. litium. Nå: Ny interesse

3.1.7 Grafenbatteri

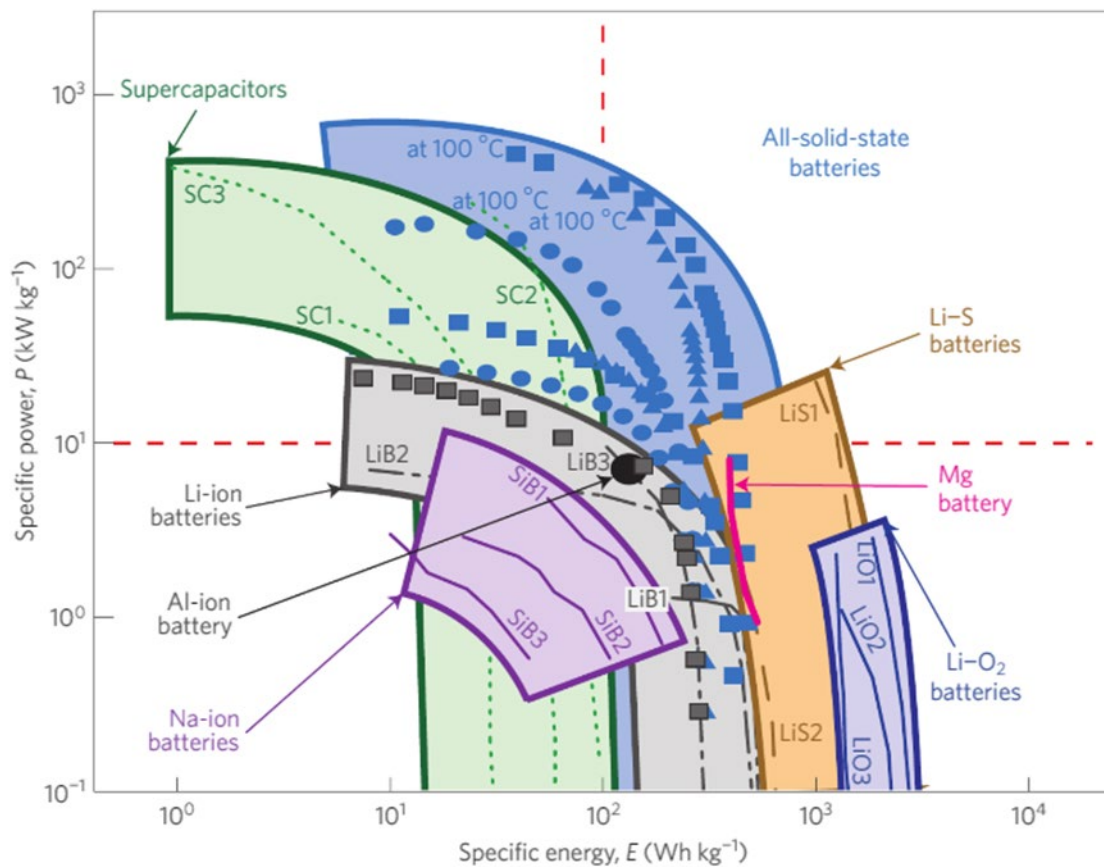
Grafen ball viser en lovende utvikling. Denne batteritypen fungerer med en lading på 5C. Den utvikles av Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT), men er ennå ikke klar for storstilt produksjon. Grafen ball er en nyvinning som, akkurat som LTO, fokuserer på anoden til batteriet. Med denne teknologien er en levetid på 500 sykluser mulig (med en ladehastighet på 5C ved 60 °C) (13) (14).

3.1.8 Aquabatteri

Aquabatteri bruker brakkvann i stedet for kjemikalier og utvikles av et nederlandsk oppstartsfirma i samarbeid med TU Delft. Imidlertid er produktet fremdeles i sin spede begynnelse. Den første piloten derimot er utviklet (15).

3.2 Sammenligning av potensialet for noen forskjellige batterikjemier

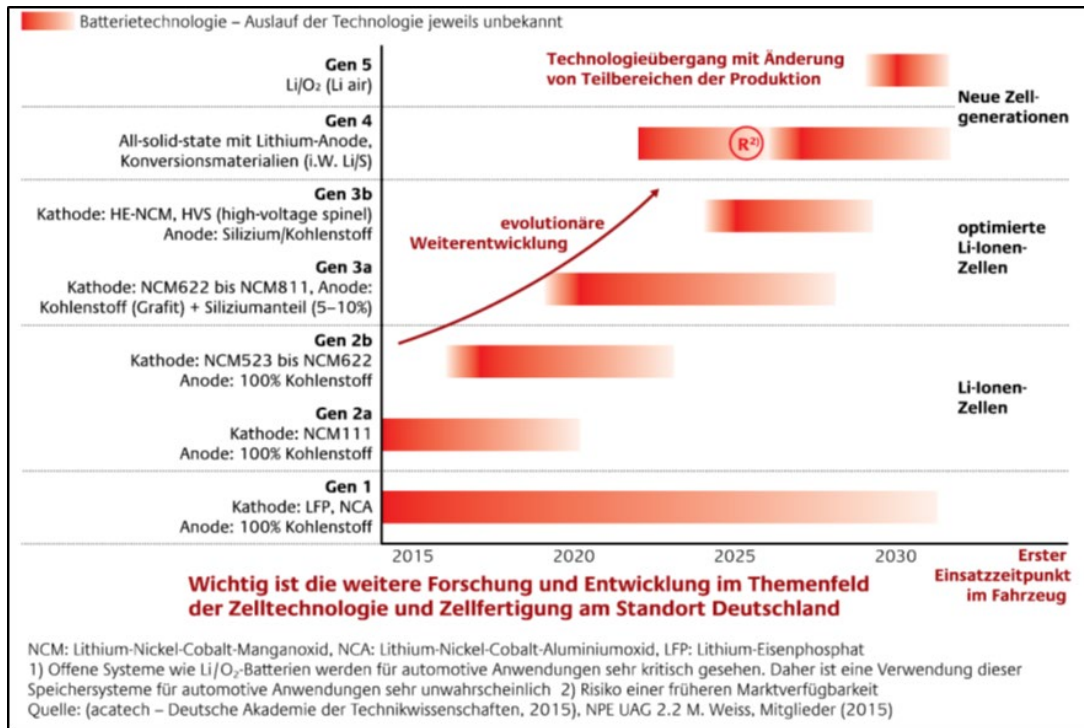
Figur 15 viser spesifikk energitetthet (X-aksen) og spesifikk effekt (Y-aksen) for de forskjellige batteritypene. De rødstiplede linjene markerer hvor den spesifikke energien og effekten er henholdsvis 100 Wh/kg og 10 kW/kg. Her vises det at faststoff battericellene oppnår høy spesifikk energi og effekt (>100 Wh/kg og >10 kW/kg), noe som er vanskelig å oppnå ved andre batterityper som for eksempel Li-ion batterier som ligger betydelig lavere.



Figur 15: Batterityper; spesifikke verdier for energitetthet og effekt (10).

3.2.1 Generasjonsinndeling av batteriteknologier

Figur 16 viser generasjoner innen batteriteknologier. Det er fremdeles i stor grad et åpent spørsmål om den teoretiske beviste fordelene med høyere energitettheten på cellenivå effektivt kan implementeres på et batteripakkenivå. Derfor er spørsmålet for øyeblikket; om og når en overgang til "post" litium-ion teknologi (Generasjon 4) og litium-luft (Generasjon 5) vil kunne skje. Ut ifra dagens perspektiv synes fremgangen med faststoffbatterier (Generasjon 4) å være mer sannsynlig i nær fremtid (16).

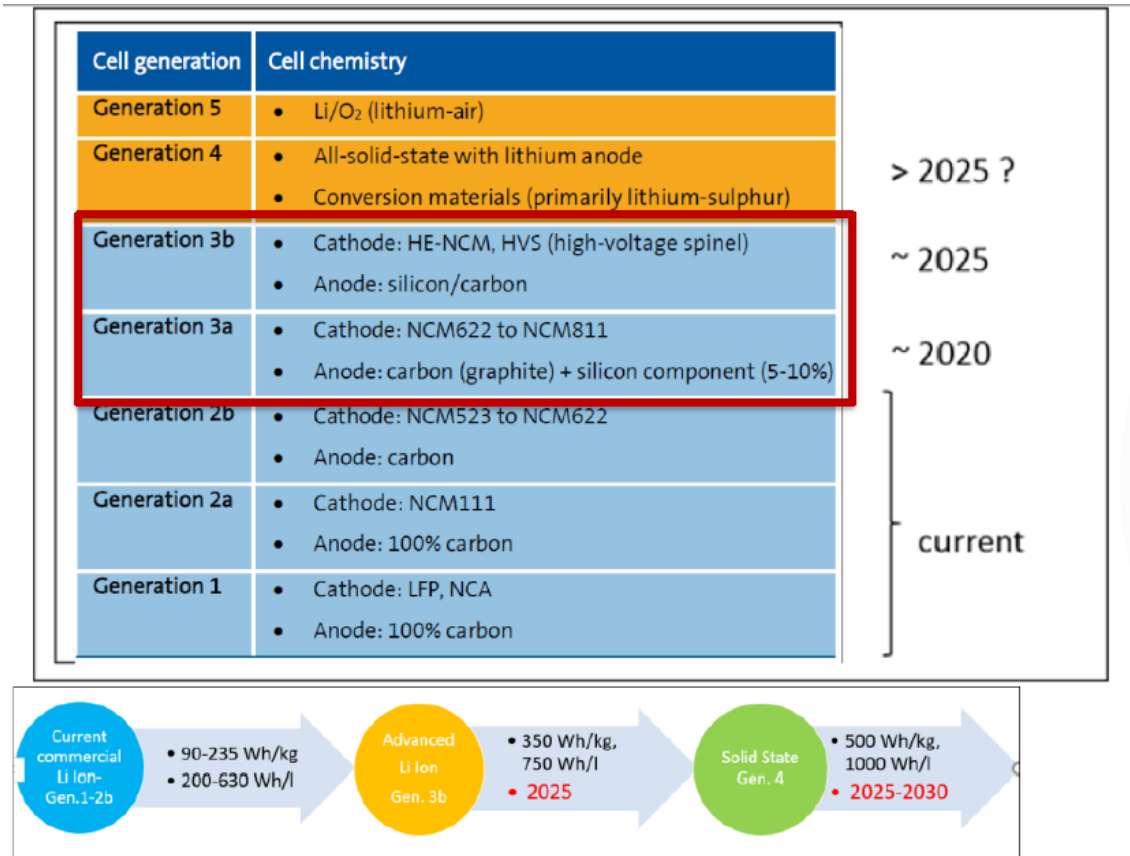


Figur 16: Oversikt over generasjoner innen batteriutvikling (16).

Figur 17 viser forutsett batteriutvikling for generasjon 3b og 4 i perioden 2025-2030, hvor energitettheten på cellenivå vil ligge i et område på 350-600 Wh/kg (2).

År	Type	Energitetthet	
		Wh/kg	Wh/l
2025 (Gen 3b)	High Voltage NMC/NCA/LMO Solid State	350–400	600–850
2030 (Gen 4)	Solid State Li-Sulfur	450–600	N/A

Figur 17: Forutsett batteriutvikling; verdiene er for enkeltceller (2).



Figur 18: Batteriutvikling og generasjoner av batterier (17).

3.3 Forventet utvikling av energitetthet og prisnivå

I 2020 vil energitettheten bli 250 Wh/kg for PHEV-er (Plugin Hybrid Electrical Vehicle) og EV-er, mens batterikostnadene vil bli redusert til 180 USD/kWh eller mindre. For å kunne distribuere EV mer omfattende i fremtiden, må energitettheten og batterikostnadene forbedres ytterligere. Fremtidige mål for energitetthet og batterikostnader er satt til 500 Wh/kg, og mindre enn 90 USD/kWh i 2030 av NEDO. Batterikostnadene forventes å være mindre enn 45 USD/kWh i rundt 2040 (18).

Hvis dette energi-tetthetsmålet oppnås, estimeres rekkevidden til å strekke seg til rundt 500 km i 2030 med dagens EV-effektivitet. For å nå disse målene, er det behov for videre forskning og utvikling. Når det gjelder Li-ion batteriet, vil videre cellematerialutvikling og celledesignoptimalisering forbedre energitettheten og redusere batterikostnadene i 2025. Selv om det produseres EV-er i stor skala, forventes det at nye produksjonsprosesser for masseproduksjon vil føre til reduserte batterikostnader.

Post-Li-ion batterier, som faststoff-litiumbatterier og metall-luftbatterier, forventes å bli tatt i bruk rundt 2030. Forskning og utvikling innen faststoff-litiumbatterier er aktivt i gang med spesielt fokus på sikkerhet og energitetthet. Videre utvikling av cellematerialer og celleoptimalisering er nødvendig før markedsføring rundt 2030.

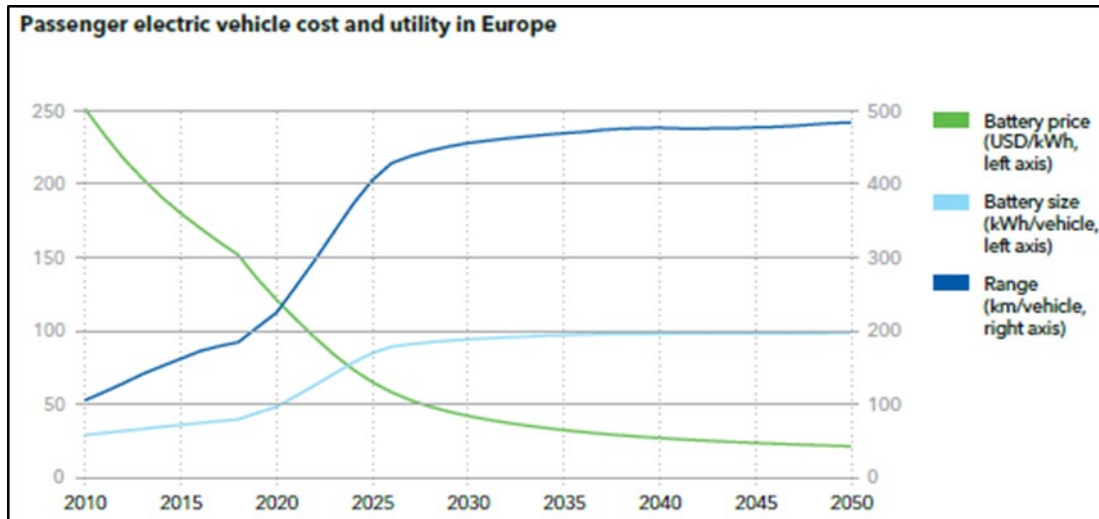
Metall-luftbatterier, inkludert sinkluft, litiumluft og magnesiumluft, er under utvikling. Celleutforming som primære batterier er ganske enkel, og energitettheten er relativt høy, men celleutformingen må endres for oppladbare batterier. Denne batteritypen vil kunne komme på markedet rundt 2030.

DNV GL (2019) beskriver at kostnadsnivået for batterier vil reduseres fra dagens kostnad på 125 USD/kWh til 25 USD/kWh i 2050. Grunnen for dette er det økte opptaket av EVs. Innen en 10 års periode vil tilgangen til Kobolt bli betydelig redusert. Dette betyr at NMC batteri-kjemi som benyttes i

stor grad pr. i dag gradvis vil bli erstattet med annen batteriteknologi hvor Kobolt erstattes med annet materiale.

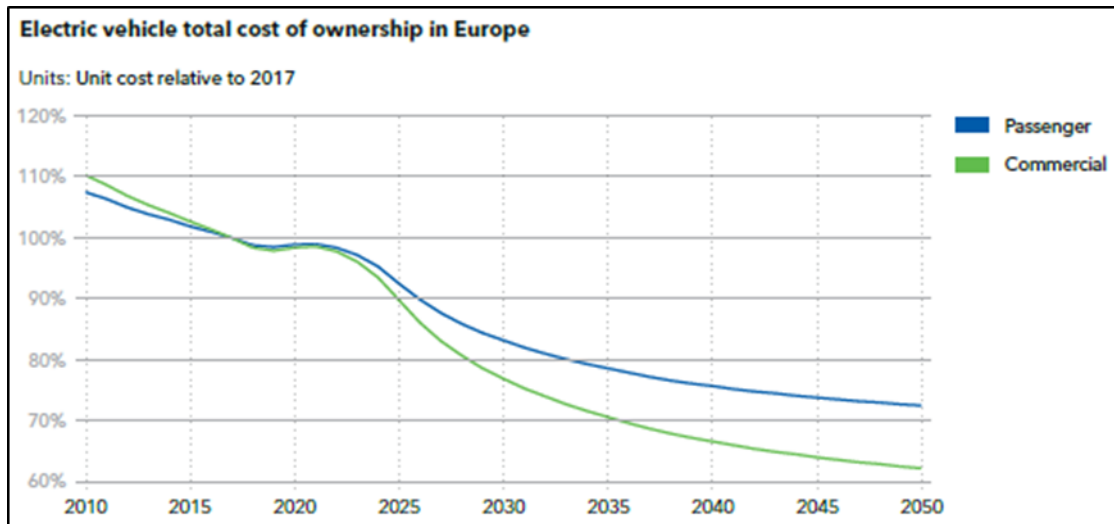
Figur 19 viser hvordan teknologiutviklingen av batterier endres for kjøretøy i perioden 2020 – 2050. Oppsummert viser figuren

- Kostnadsnivå USD/kWh: 125 USD/kWh i 2020, 45 USD/kWh i 2030 og 25 USD/kWh i 2050.
- Batterikapasitet kWh: 50 kWh i 2020 til 200 kWh i 2035. Kapasiteten 4-dobles i perioden.
- Rekkevidde km: 125 km i 2020 til 480 km i 2050. Rekkevidden vil ca. 4-dobles i perioden



Figur 19: Illustrasjon av teknologiutviklingen av batterier for kjøretøy i perioden 2020 – 2050 (6).

Figur 20 viser den relative kostnadsutviklingen fra 2017 ved å eie elektrisk drevet kjøretøy. Kommersielt eide kjøretøy reduseres med ca. 30- 35% i perioden 2020 til 2050.



Figur 20: Illustrasjon av relativ kostnadsutvikling fra 2017 ved å eie elektrisk drevet kjøretøy fram mot 2050 (6).

4 Referanser

1. **USA Today.** USA Today. *Electric-truck maker Nikola Corp. claims 'game-changing' battery advancements.* [Internett] 20 November 2019. [Sisert: 22 November 2019.] <https://eu.usatoday.com/story/money/cars/2019/11/20/electric-truck-company-nikola-corp-battery-technology-advancements/4247030002/>.
2. **SINTEF.** *Alternative driftsformer for ikke elektrifiserte baner.* Trondheim : SINTEF, 2019.
3. **ABB.** BORDLINE® Battery Module - For high performance applications. [Internett] 2019. https://library.e.abb.com/public/b5b429b92a774836884dfbb2bfb751dd/BORDLINE%20Battery%20Module_REV%20A.pdf?x-sign=fnx90WuFMXoNI5cdNyTex+OoGoP1JfAzLiS7xN+tDL2fS2T8H7+pUw1EmIGGSycY.
4. **Shift2Rail.** *Shift2Rail Catalogue of Solutions.* s.l. : Shift2Rail, 2019.
5. **DNV GL.** Electric vehicles. [Internett] 2019. <https://eto.dnvgl.com/2019/electrical-vehicles>.
6. —. *Energy Transition Outlook.* 2019.
7. **Quartz.** How we get to the next big battery breakthrough. [Internett] 08 04 2019. <https://qz.com/1588236/how-we-get-to-the-next-big-battery-breakthrough/>.
8. **Pocket-lint.** Future batteries, coming soon: Charge in seconds, last months and power over the air. [Internett] 15 10 2019. <https://www.pocket-lint.com/gadgets/news/130380-future-batteries-coming-soon-charge-in-seconds-last-months-and-power-over-the-air>.
9. **Battery University.** Battery University. *BU-212.* [Internett] [Sisert: 22 November 2019.] https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/experimental_rechargeable_batteries.
10. **Kato Y., Hori S., Saiti T., Suzuki K., Hirayama M., Mitsui A., Yonemura M., Iba H. og Kanno R.** High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors. *Nature Energy.* 21 mars, 2016, 16030.
11. **WMG.** New sensor tech for commercial Lithium-ion batteries finds they can be charged 5 times faster. [Internett] 18 02 2018. <https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/mediacentre/wmgnews/?newsItem=8a17841a619e0ac201619e706dec0d57>.
12. **Berckmans G., Messagie M., Smekens J., Omar N., Vanhaverbeke L. og Mierlo Van J.** Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies.* MOBI Research Group, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussels, Belgium; , 2017, Vol. Publisert: 1 September 2017.
13. **Financial Times.** Financial Times. *Beyond lithium – the search for a better battery.* [Internett] 8 Januar 2018. [Sisert: 22 November 2019.] <https://www.ft.com/content/46adb98c-d8ef-11e7-9504-59efdb70e12f>.
14. **Samsung.** Samsung Newsroom. *Samsung Develops Battery Material with 5x Faster Charging Speed.* [Internett] Samsung, 28 November 2017. [Sisert: 22 November 2019.] <https://news.samsung.com/global/samsung-develops-battery-material-with-5x-faster-charging-speed>.
15. **Aquabattery.nl.** *Aquabattery.* [Internett] [Sisert: 22 November 2019.] <https://aquabattery.nl/>.

16. European Comission. Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. *EU Science Hub*. [Internett] 2017. [Sisert: 22 November 2019.]
<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/lithium-ion-battery-value-chain-and-related-opportunities-europe>.

17. NTNU. *Presentasjon på Mozees seminar, heavy duty seminar*. 2019.

18. Aiming for a Breakthrough in the Transition to a Low-Carbon Society. Advanced Batteries. NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organisation). NO.69, 2018.