



e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse

En rapport baserad på e-fordons teknik, säkerhetsfunktioner och modern batterikemi

Rapport från FFI-projektet Räddningskedjan



David Sturk, Autoliv Development AB

Lars Hoffmann, SP Electronics





e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse

En rapport baserad på e-fordons teknik,
säkerhetsfunktioner och modern batterikemi



Rapport från FFI-projektet Räddningskedjan

David Sturk, Autoliv Development AB

Lars Hoffmann, SP Electronics

FFI-PROJEKTET RÄDDNINGSKEDJANS LEDNINGSGRUPP



Projektledare: David Sturk, Autoliv Development AB

Director Battery EV Safety Research

david.sturk@autoliv.com



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

Btr. Projektledare: Yvonne Näsman, MSB

Enhetschef MSB verksamhetsställe Sandö



Övriga i Ledningsgruppen

Lars Hoffmann, SP Electronics

SP EL, Ledning, Senior Specialist



Håkan Gustafson, Volvo Cars

1e Forskningsledare / utredare Volvo haverikommission



Lars Östrand, Presto Brandsäkerhet AB

Affärsutveckling, Teknik och Forskning



Ulf Björnstig, UMU Enheten för kirurgi, TSCN

Professor i kirurgi/överläkare

FUNDAMENTAL ANALYSIS FOR RISK ASSESSMENT OF E-VEHICLES INVOLVED IN TRAFFIC ACCIDENTS

Abstract

E-Vehicle Safe Rescue

In the event of an E-Vehicle (electric and hybrid electric vehicles) crash, quick and competent rescue of the vehicle occupants requires new knowledge and training to minimize the time to final treatment for those injured.

By 2020, several millions of E-Vehicles are expected to be rolling on roads throughout the world. At present, however, there is considerable uncertainty among rescue personnel concerning preferable actions and priorities when responding to accidents involving these new types of vehicles. Novel vehicle battery systems not only offer high voltage, electric capacity, power density and energy density, but also carry significant amounts of combustible contents, raising concerns about safety in first response teams. Consequently, a need for new risk analysis in post-crash situations is evident.

The core aim of the E-Vehicle Safe Rescue research project is to develop a training program for Swedish rescue personnel based on a revision of existing recommendations as well as abuse tests and traffic related crash tests on battery systems.

The following report is presenting the results of a market analysis study covering E-Vehicle technical characteristics, and battery chemistry characteristics and related safety considerations. This study has been on-going since project start in May 2012 and this report compiles its outcome.

As a key outcome, this report delivers guidance to the E-Vehicle Safe Rescue project on risk assessments associated with an E-Vehicle accident event. It will thus present the fundamental justifications for the testing strategies developed in the project. Those strategies are presented as conclusions of the market analysis study at the end of this report.

Consequently, the physical abuse testing conducted throughout the project is based on the study presented in this report. Results from physical abuse testing will be presented in separate reports and publications, as it is outside the scope of this report.

Keywords:

E-Vehicle; Safety; Risk Analysis; Failure Consequences; Rescue; Traction Battery; Battery Pack; Fire; Arc; Ventilation; Gases; Failure Event Tree; Fire; Battery Chemistry

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport: 2013:58
ISBN 978-91-87461-44-6

ISSN 0284-5172

Borås

Innehållsförteckning

Abstract	4
Innehållsförteckning	6
Förord	9
Sammanfattning	10
1 Introduktion	11
2 Bakgrund	12
2.1 Några rapporterade e-fordon händelser	13
2.1.1 GM-Volt brand vid krockprov 2011	13
2.1.2 BYD EV påkörd och nedbrunnen	14
2.1.3 Batteriexplosion i laboratorie hos GM	15
2.1.4 Brand i elkonverterad Nissan Qashqai under laddning 2010	15
2.1.5 Brand i elkonverterad Fiat 500 under laddning 2012	16
2.1.6 Tesla Model S – Tre bränder inom sex veckor hösten 2013	16
2.2 Antal E-fordon i Sverige	18
3 Analys baserad på e-fordons teknik/kemi	19
3.1 Batteritekniska grunder	19
3.1.1 Battericellens uppbyggnad	19
3.1.2 Batterisystemet – State of Art lösning	23
3.1.3 Fordonssystemet – elhybridfordon kontra elfordon	24
3.1.3.1 Vanliga placeringar	25
3.1.3.2 Inbyggda säkerhetsfunktioner i batterisystemet	27
3.1.3.3 Elbilens utnyttjande av batteriet	28
3.1.3.4 Hybridbilens utnyttjande av batteriet	29
3.1.3.5 Kraftelektroniken	30
3.2 Batterikemiska grunder	32
3.2.1 Överblick över batterityper	32
3.2.1.1 Bly/syra celler	32
3.2.1.2 Nickel Kadmium (NiCd) celler	33
3.2.1.3 Nickel-Metallhydrid celler (NiMH)	33
3.2.1.4 Litiumjon celler (Li-jon)	33
3.2.1.5 Zebra batterier	33
3.2.1.6 Superkondensatorer	34
3.2.2 Kemiskt innehåll hos Li-jon batteri	34
3.2.2.1 Reaktiva material inuti cellen	34

3.2.2.2	Brandtriangeln då en Li-jon battericell havererar	35
3.2.2.3	Elektrolytens teoretiska brännbarhet och förbränningsvärme	35
3.2.2.4	Gaser som kan frigöras från ett skadat Li-jon batteri	38
4	Hälsofaror	42
4.1	Hälsofaror orsakade mekaniskt	42
4.2	Hälsofaror orsakade elektricitet och spänning	42
4.3	Gaser ventilerade ur Li-jon batteri vid haveri	46
4.3.1	Vätgas	47
4.3.2	Kolmonoxid	48
4.3.3	Koldioxid	49
4.3.4	Metan	50
4.3.5	Vätefluorid	50
4.3.6	Fosforpentafluorid	52
4.3.7	Elektrolytångor från Li-jon battericeller	52
5	Risicanalys och Händelseträäd	54
5.1	Hypotetiskt scenario med kritiskt haveri av battericell	54
5.2	De tre faserna vid kollision	56
5.2.1	In-Crash fasen	57
5.2.2	Post-Crash fasen	57
5.2.3	Rescue fasen	58
6	Lagkrav och Standarder för Säkra e-fordon	60
6.1	Åkandeskydd – Rating Prov	61
6.2	Batteriskydd – Komponentprov	63
6.3	Lagkrav för e-fordon – Elsäkerhet, Krasch och brand	64
6.3.1	UN ECE – Lagkrav för Europa	64
6.3.2	FMVSS – Lagkrav för USA	66
6.4	Standarder för e-fordon och dess komponenter	68
7	Slutsatser	72
8	Utvalda Prov för Batteriskadeforskning	76
8.1	Mekaniskt våld	76
8.2	Elektrisk våld	76
8.3	Termiskt våld	76
8.4	Släckmedelsprov	76
9	References	77
10	Appendix	84

10.1 SIS - Electric and hybrid road vehicles – Related standards and drafts (2011) [SIS/TK 517/PC]

84

Förord

Projektet Räddningskedjan (eng. E-Vehicle Safe Rescue) delfinansieras till drygt hälften av Sveriges innovations myndighet VINNOVA och dess satsning på FoU inom fordonsindustrin genom delprogrammet FFI – Fordonsstrategisk Forskning och Innovation. Övrig finansiering kommer från deltagande parter:

- Autoliv Development AB (Projektägare)
- Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB
- SP Electronics
- Volvo Car Corporation
- Presto Brandsäkerhet AB
- Umeå Universitet – Enheten för Kirurgi, och Traffic Safety Center North

Rapportförfattarna David Sturk (Autoliv Development AB) och Lars Hoffmann (SP Electronics) vill med detta dokument presentera grundläggande kunskap om e-fordons tekniska säkerhetsfunktioner och batterikemiska parametrar och de potentiella riskfaktorer som därav behöver närmare undersökas genom batteriskadeforskning.



David Sturk är FFI-projektet Räddningskedjans projektledare och arbetar på Autoliv Development AB i Vårgårda med ansvar för en forskargrupp med inriktning mot batteriskadeforskning och riskanalys kring batteri- och e-fordons haverikonsekvenser. Mot bakgrund som civilingenjör i kemi och elektrokemi har han fördjupat sig i riskanalys av moderna fordonsbatterier. I Räddningskedjan har David, vid sidan av projektledning, bidragit med expertis gällande batteriers uppbyggnad, materialegenskaper, säkerhetsfunktioner på battericellnivå, gasemissioner vid haveri och deras eventuella skadlighet, samt kollisionsstatistikanalys och sammanställning av trafiksäkerhetsrelaterade lagkrav och standarder som implementeras på e-fordon.



Lars Hoffmann är idag anställd på SP i Borås där han ingår i ledningen för el och elektronik sektionen, Lars har en gedigen bakgrund inom el och elektronik då han började sin bana som instrumenttekniker på ett legeringsverk, där efter har han arbetat för ASEA/ABB, Elingenjör för pappersbruk, anläggningschef för processindustri och projektledare för SAAB Automobile AB/GME hybridutveckling med inriktning på batterier, kablage, kraftelektronik, elmaskin och elsäkerhet. I sin nuvarande roll på SP Electronics hjälper Lars bl.a. fordonsindustrin att förstå framtidens elsystem för att uppnå en god elsäkerhetspraxis genom att hålla utbildningar som tillgodoser framtida krav på E-fordon. I Räddningskedjan och i denna rapport bistår Lars med sin expertkompetens gällande e-fordons tekniska säkerhetsfunktioner och batterisystemets uppbyggnad samt riskanalys kring fordonskomponenter som arbetar med skadlig spänning såsom 400 volts traktionsbatterier i e-fordon. På sin fritid är Lars den enda Svenska besiktningsspersonen inom SFRO, där han besiktigar amatörbyggda E-fordon och bistår där med sina kunskaper för säkra elektriska lösningar även i dessa fordon.

Läsare av denna rapport är välkomna att höra av sig till David och Lars med frågor och kommentarer:

david.sturk@autoliv.com

lars.hoffmann@sp.se

Sammanfattning

En snabb och kompetent räddningsinsats i händelse av en olycka med e-fordon kräver ny kunskap och utbildning för att kunna minimera tiden till slutlig behandling av de drabbade.

År 2020 beräknas flera miljoner e-fordon (el- och elhybridfordon) rulla på vägarna över hela världen. För närvarande finns det dock en stor osäkerhet bland räddningspersonal rörande lämpliga åtgärder och prioriteringar när man ska hantera trafikskadehändelser med dessa nya typer av fordon. Detta har med tydlighet påvisats av de svar som svensk och skandinavisk räddningstjänst gett på en enkät utförd av Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB) år 2011. Resultaten visade att 100% av alla svarande uttryckte oro för obekanta faktorer som de föreställer sig kunna möte om e-fordon varit med om trafikskadehändelse. (1)

Fordonens batterisystem ger inte bara hög spänning, hög elektrisk kapacitet och stor effekt- och energitäthet, utan innehåller också stora mängder brännbara ämnen som ger anledning till otrygghet gällande säkerheten för både personal som först kommer till skadeplats och de drabbade. Följaktligen finns ett uppenbart behov av nya riskanalyser när det gäller att hantera uppkomna krascher som involverar sådana system.

Huvudsyftet med forskningsprojektet ”Räddningskedjan” är att utforska vilka parametrar hos e-fordon i trafikskadehändelse som kan innebära nya frågeställningar för räddningspersonal och vilka befintliga rutiner som även fortsättningsvis är gällande.

Omvärldsanalys har under projektets inledning utförts å ena sidan över e-fordons batteritekniska funktioner och batterikemiska egenskaper, och å andra sidan kring existerande rutiner och taktik hos räddningstjänst i Sverige och omvärlden.

Den tekniska och batterikemiska omvärldsanalysen har i projektet skapat grunden för en omfattande analys av de potentiella risker som kan förväntas medfölja introduktionen av e-fordon i trafiken vilket presenteras i denna rapport. I detta dokument presenteras slutligen den selektion av batteriskadeforskning och haveriprovnings som konkluderas som mest betydelsefull att klargöra i termer av vilka typer av batterihaverier som kan leda till vilka typer av konsekvenser.

Baserat på denna selektion av relevant batteriskadeforskning har projektets industriparter sedan genomfört kontrollerade batterihaverier och kartlagt påföljande konsekvensers skadlighet för människor i ett skadat e-fordon eller dess närhet eller för räddningspersonal som utför räddningsinsats vid sådan trafikskadehändelse.

Denna batteriskadeforskning har under projektets avslutande år framlagts i en serie rapporter vars slutsatser blir publicerade genom det utbildningsmaterial som skapas av MSB för att undervisa svensk räddningspersonal i vilka rutiner för räddningsinsats som är gällande vid arbete med trafikskadat e-fordon.

1 Introduktion

Framtidens transportsystem måste konsumera energi på ett mer effektivt och miljövänligt sätt. Den begynnande bristen på fossila bränslen ökar bränslekostnader, tillsammans med den ökande miljömedvetenheten hos många trafikanter, leder till ökande efterfrågan på alternativa drivmedel. Antalet e-fordon (el- och elhybridfordon) som lanseras av fordonstillverkare blir fler och får mer plats i media. Under de senaste åren har detta även blivit synligt på våra vägar och efter år 2020 uppskattas det finnas mellan 150 000 – 200 000 e-fordon på Sveriges vägar. Av dessa uppskattas mellan 10 000 – 20 000 vara e-fordon som kan laddas från elnätet medan den större delen vara elhybrider som uppladdas under drift med konventionell motor t.ex. Toyota Prius. (2)

e-fordon förväntas leverera samma komfort, prestanda och säkerhet som konventionella bilar men representerar för många en ny teknologi vilket ger upphov till osäkerhet kring bl.a. hur de ska hanteras av de kommunala räddningstjänsterna i händelse av en trafikolycka. Denna osäkerhet har verifierats av MSB genom en enkät till de kommunala räddningstjänsterna där alla svarade att de känner otrygghet inför en sådan situation. (1)

FFI-projektet Räddningskedjan har till uppgift att lägga grunden för ett nytt utbildningsmaterial för svensk räddningstjänst så att tryggheten och effektiviteten under räddningsinsats i händelse av trafikolycka med e-fordon ska befastas. Projektet består av två arbetspaket – ”WP1 Teknik” och ”WP2 Räddningsinsats”. Denna rapport ingår i WP1 där man utforskar vilka typer av trafikolyckor, med skador på batterisystemen, kan resultera i kritiska batterihaverier. Samtidigt kartläggs även vilka omtalade risker och haveriscenarier som kan vara överskattade – så kallade ”*icke risker*” – eller underskattade. Exempel på frågeställningar som kommer undersökas är:

- Finns det risk för livshotande elektrisk stöt vid beröring av kraschat elfordon?
- Kan en elbil i vatten elektrifiera vattnet med risk för personskada?
- Under vilka förutsättningar kan en kortslutning leda till ett kritiskt batterihaveri?
- Vilka faktorer i ett kritiskt batterihaveri kan vara skadliga för personer i bilens närhet?
- Kan man se på en bil efter en krasch om det finns risk för kritiskt batterihaveri?
- Hur kan man använda sina sinnen (syn, lukt, känsel, och hörsel) för att upptäcka ett gryende batterihaveri?

Denna rapport har till uppgift att sammanställa grundläggande teknisk bakgrund för hur framtida e-fordons drivsystem fungerar då det utsätts för kollision eller andra miljöer där kritiskt batterihaveri riskerar att uppkomma. Utifrån tekniska och kemiska förutsättningar hos de mest lovande batterikemierna (framförallt Li-jon) kommer potentiella händelse-scenarier och risker presenteras tillsammans med illustration av ”*Händelse-träd*”. Lagkrav och standarder som hanterar krocksäkerhet sammanställs mot slutet av rapporten. Slutligen framläggs förslag på provmetoder för att bemöta de frågeställningar som lyfts fram genom denna rapport.

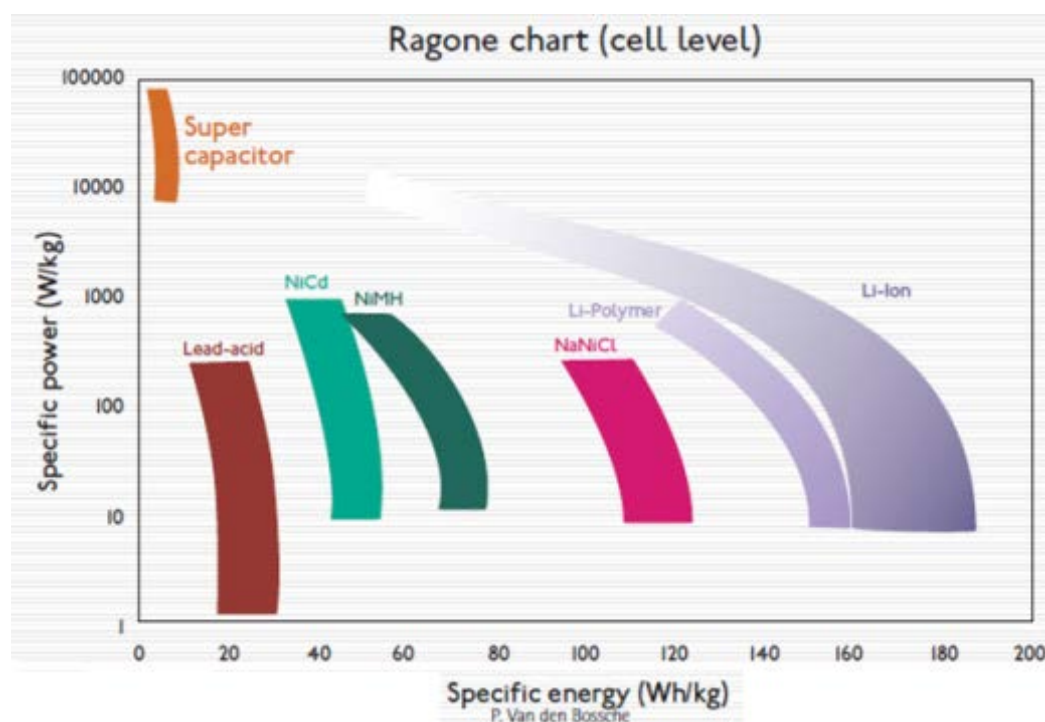
2 Bakgrund

Innan Henry Fords genombrott med massproduktion av fordon med förbränningsmotor, typ Ford Model T, var elbilen ofta ett mer attraktivt alternativ. (3) Bensin och dieselfordon tog sedan över gatorna, bland annat till följd av fordonets långa räckvidd och goda prestanda. Fortfarande är energi- och effekttäthet hos batterier långt lägre än hos fossildrivna fordon men de senaste årtiondenas oro för miljön och världens tillgångar på fossila bränslen har skapat ett nytt sug efter fordon med drivlinor som helt eller delvis använder batterisystem för sin framdrift.

Forskning på olika batterimaterial har genererat en bredd av batterikemier som fyller olika funktioner, men för ett trafikfordon är, förutom säkerheten, drivningskällans vikt av så central betydelse att batteriers effekt- och energitäthet bidrar till avgörandet när framtidens fordonsbatterier ska utses.

Vanliga startbatterier i olika typer av fordon använder den välbekanta batterikemin bly/syra. Ett annat batterialternativ var Nickel Cadmium (NiCd) batterier som fram till 90-talet var vanliga i hemelektronik. Från senare delen av 90-talet kom en ny och mer miljövänlig batterikemi vilken fortfarande används idag, Nickel Metal Hydrid (NiMH) för bärbara elverktyg och i hybridbilar (t.ex. Toyota Prius).

I början av 90-talet lanserades det första kommersiella Litiumjon (Li-jon) batteriet av Sony (4) för användning i bärbara datorer mobiltelefoner där den stora efterfrågan på sådana batterier lade grunden för det genomslag av Li-jon batteriet som man idag kan se på batterimarknaden. Den uppvisade egenskaper och nivåer av effekt- och energitäthet som markant översteg andra kommersiella batterikemier. Detta kan tydliggöras i ett så kallat Ragone Chart såsom i Figur 1.



Figur 1 Detta Ragone Chart illustrerar hur olika batterikemiers energi- och effekttäthet förhåller sig till varandra vid jämförelse. Kondensatorer har mycket låg energitäthet men högst effekttäthet, medan li-jon batterier har högst energitäthet och förhållandevis bra effekttäthet. Den billigaste och vanligaste batterikemin blybatterier har lägst energi- och effekttäthet. (5)

Som följd av det förhållande som presenteras i Figur 1 har fordonsbatteribranschen under de senaste åren starkt präglats av dessa positiva egenskaper hos familjen Li-jon

batterikemier. Andra funktionalitetskrav är kostnadseffektivitet, livslängd, laddnings- och urladdningseffektivitet, kvalitet och säkerhet.

Forskning pågår löpande för att förbättra fordonsbatterier inom alla dessa kravområden och en hel del arbete återstår såsom att nå tillräckligt låg kostnad per kWh och enhet, öka livslängden, förhöja laddnings- och urladdningseffekten, stabilare kvalitet och stärkt batterisäkerhet. Såsom tydliggjorts i Introduktionen ovan så kommer denna rapport liksom projektet i sin helhet att fokusera på batterisäkerhet och riskanalys utifrån de batterityper som existerar i allmänhet och Li-jon batterier i synnerhet (eftersom de väntas ha störst marknadspenetration inom de närmaste tio åren) men eftersom andra batterikemier också används bland fordon kommer de också att behandlas om än i korthet (se 3.2.1 Överblick över batterityper).

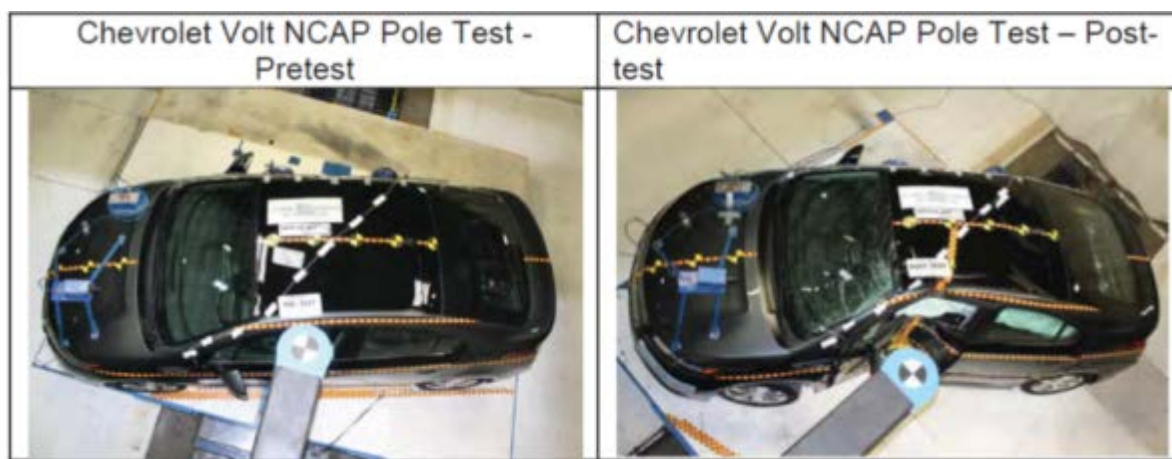
Genom styckena med grunder inom områdena batteriteknik, batterikemi och hälsorisker är ambitionen att bereda en grundläggande förståelse hos läsaren för hur befintliga säkerhetsfunktioner hos fordonsbatterisystems fungerar, hur valen av batteriets ingående komponenter påverkar dess egenskaper såsom säkerhet, och hur en människa potentiellt kan drabbas då denne exponeras för risker med havererande batterier.

2.1 Några rapporterade e-fordon händelser

I följande avsnitt kommer fem incidenter med e-fordon presenteras – två som relaterar till kollisionsscenarioer, en som beskriver ett scenario där batterisystemet skadas av att styrsystemet tillät en olämplig körcykel, och två avslutande exempel där brand uppkom medan bilen stod på laddning.

2.1.1 GM-Volt brand vid krockprov 2011

I maj 2011 utfördes ett säkerhetsprov av US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) i Wisconsin USA, där en GM-Volt plug-in hybrid utsattes för ett standardmässigt krockprov. Bilen rammade en rigid påle med vänster sida så att pålen trängde in tvärs över förarsätet med en hastighet av 29 km/h (Figur 2).



Figur 2 US NCAP Rating krockprov med sidopåle inträngande vid förarsätet (6)

Inspektionen efter provet påvisade inga allvarliga fel på personskyddet i bilen och bilen placerades därefter för förvar på en plats utomhus inom provningsanläggningens område.

På helgen, tre veckor senare tog bilen eld. Enligt NHTSA's haverirapport var en följd av att batteriets elektriska energi (58 % SOC) tilläts ligga kvar i batteriet efter prov vilket i samband med batteriskadans art och väderförhållanden ledde till kortslutning som antände bilen.



Figur 3 GM-Volt bilen, som visas i mitten av bilden, tog eld tre veckor efter krockprovet (6) (7)

Efter att detta skedde i maj 2011 har aktuell fordonstillverkare implementerat en rad åtgärder för att händelsen inte ska upprepas. Därtill har lagstiftande- och standardstiftande-organ inlett arbeten kring möjligheterna att upprätta standardmässiga förfaranden för att dränera ett batteri på dess elektriska energi efter batterihändelse antingen genom manuellt eller automatiskt genomförande. Utfallet av dessa diskussioner kommer att implementeras i form av Lagkrav och Standarder för e-fordonssäkerhet.

I och med de åtgärder som vidtagits mot denna typ av händelse (design av fordonets och batteriets struktur samt nya riktlinjer för dränage av batteriets elektriska energi), tillsammans med det faktum att sådant batterihaveri aldrig skett i verklig trafikolycka så betraktas denna försenade haveripåföljd som ytterst osannorlik.

2.1.2 BYD EV påkörd och nedbrunnen

Den 26 maj 2012 blev en kinesisk elbil av märket BYD påkörd av en Nissan GT-R bakifrån. BYD bilen färdades i ca 80 km/h medan sportbilen körde ca 180 km/h. Efter påkörningen roterade BYD bilen horisontellt 180 grader och kastades in i ett träd baklänges. Trädet trängde in 1 m och skadade batterisystemet så allvarligt att kortslutningar och ljusbågar uppstod vilket orsakade en kraftigbrand.

Händelsen fick stort medialt utrymme och motståndare till e-fordon tog tillfället i akt att peka på riskerna som denna olycka belyste. Det som dock inte framkom i de flesta artiklar om olyckan var att det våld som de förolyckade passagerarna i BYD bilen utsattes för under krocken var i sig så kraftfullt att även en konventionell bil skulle riskera att övertändas då dess bensintank hade demolerats av det inträngande trädet, och att våldet mot passagerarna redan var av dödande kraft innan bilens batterisystem antändes.



Figur 4 Kollision mellan BYD EV (80 km/h) och sportbil Nissan GT-R (180km/h) (8) (9) (10)

En olycka av denna art är oerhört sällsynt i Europeisk, Amerikansk och Kinesisk trafikolycksstatistik. Biltillverkare kan tala om "50-års krock" då denna typ av olycka kommer på tal. Med det uttrycket syftar man på att våldet är så kraftfullt och händelsen så ovanlig att bilar utrustade för sådan olycka kommer få orimliga dimensioner, strukturer och pris, och därför inte kan säljas på dagens fordonsmarknader.

2.1.3 Batteriexplosion i laboratorie hos GM

I april 2012 utfördes "környkel-provning" hos GM i deras provningslaboratorium i Warren, Michigan US. Ett nytt prototypbatteri utsattes för den környkel som var designad för GM-Volt bilen. Dock hade batteriets kemi ändrats och den gamla környkeln var inte kompatibel med det nya batterisystemet. Detta resulterade i att något gick fel och batteriet exploderade.

Testlokalen var stor och öppen, och upp till fem personer som befann sig där inne fick lättare skador men endast en av dessa behövde besöka sjukvården. Smällen var så kraftfull att de 20 cm tjocka ståldörrarna mot parkeringen utanför slogs upp av tryckvågen.



Figur 5 Laboratorieolyckan med ett prototypbatteri som exploderade (11) (12) (13) (14)

2.1.4 Brand i elkonverterad Nissan Qashqai under laddning 2010

November 2010 transporterades en elbil från Oslo till Köpenhamn av rederiet DFDS Seaways. Bilen var en Nissan Qashqai SUV som konverterats från bensinbil till eldrivlina av en firma i Nederländerna och var på väg hem efter en misslyckad försäljning i Oslo.

Under färden stod elbilen på laddning på bildäck och tog eld. Enligt utredningar och artiklar fann man inga tecken på att branden skulle ha startat i batteriet.



Figur 6 Konverterad Nissan elbil tog eld under laddning på bildäck i en färja (15) (16)

2.1.5 Brand i elkonverterad Fiat 500 under laddning 2012

Inne på inhägnat område hos Nynäshamns Energi i Ösmo stod den 11 augusti 2012 en elbil på laddning. Bilen hade konverterats från vanlig drivlina till eldrift av företaget EV Adapt i Ale. Förbipasserande larmade att bilen brann och räddningstjänsten lyckades släcka den inom en timme efter larmet kommit.

En utredning kring branden utfördes av MSB Sandö och SP Elektronik. I rapporten presenterades slutsatsen att branden antagligen startat i motorrummet. En potentiell brandkälla antogs vara en kupévärmare som torrkokat medan bilen stod på laddning. Skadorna på batterisystemen indikerade att dessa inte varit orsak till eller bidragit nämnvärt till branden. (17)



Figur 7 Den utbrunna elbilen sedd snett bakifrån och motorrummet som drabbats värst (17)



Figur 8 Batteripacket under chassit och batteripacket i bagageutrymmet var inte orsak till branden (17)

2.1.6 Tesla Model S – Tre bränder inom sex veckor hösten 2013

I och med den framträdande rollen som tillverkare av världens mest producerade rena elbil kan det betraktas som en tidsfråga innan även Tesla skulle drabbas av trafikolycka med brand. Med sin tydliga mediala profil blev rubrikerna stora då deras första e-fordon brann vid månadsskiftet september/oktober 2013. Branden skedde på avfarten från en motorväg nära Seattle i delstaten Washington (USA), efter att bilen, en Tesla Model S, kört in i ett föremål under färd på motorvägen. Det hårda föremålet trängde in i den

främre delen av batteripacket, vilket ligger under golvet och sträcker sig från framaxeln till bakaxeln, och orsakade elfel med påföljande brand.



Figur 9 Brand i en Tesla Model S i början av oktober 2013 på avfart från motorväg nära Seattle, Washington. Under färd på motorvägen kolliderade bilen med hårt föremål som trängde in under bilen och orsakade sådan skada på batteripack att brand uppkom. (18) (19)

Brand nummer två skedde i den Mexikanska staden Yucatán, Mérida, då en alkoholpåverkad förare körde i alltför hög hastighet in i en rondell, kraschade in i två betongmurar för att slutligen avsluta färden med en krock mot träd. Till vittnens förvåning var föraren tillräckligt oskadd för att fly från platsen. Därefter tog bilen eld.

Detta var en spektakulär olycka som förutom branden även belyste att denna bil ger ett kraftfullt krockskydd för sin förare och passagerare.



Figur 10 Andra branden i en Tesla Model S skedde i mitten av oktober 2013 efter att berusad förare hållit för hög hastighet genom en rondell och därefter krockat med två betongmurar och slutligen med ett träd. (20)

Den tredje branden orsakades återigen av att ett hårt föremål som på motorväg penetrerat det främre delen av batteriet underifrån. Olyckan skedde i Smyrna, Tennessee USA.



Figur 11 Tredje branden orsakades ännu en gång av att föremål på motorväg trängt in underifrån i e-fordonets främre batteripack och orsakat elfel. (21) (22) (23)

2.2 Antal E-fordon i Sverige

De senaste två åren har antalet registrerade laddningsbara e-fordon ökat kraftigt i takt med att allt fler massproducerade e-fordon finns på marknaden. Enligt statistikdatabasen ELIS – Elbilen i Sverige (24) som drivs av Power Circle, elkraftbranschens intresseorganisation, uppgick det totala antalet laddbara e-fordon (allt från lätta till tunga fordon) till 3 589 stycken (vilket innebär en ökning på 125% sedan årsskiftet 2012/2013 då antalet var 1 594). Av dessa 3 589 är antalet personbilar 2 897 varav 1 100 batteriefordon (BEV) och 1 797 pluginhybrider (PHEV). Bara under februari månad ökade antalet med 227 e-fordon eller 7%. En svårighet för ökningen av den svenska e-fordonflottan är tempot på utbyggnaden av laddningsinfrastrukturen. Denna beskrivs med termen CPEV som beskriver bruttokvoten av antalet laddningsstationer per antalet laddbara e-fordon som ligger på låga 0,15. (25)

Tabell 1 ELIS statistik över registrerade e-fordon i Sverige den 28 februari 2014 (26)

Elbilen i Sverige (ELIS) 2014-02-28	
Totalt laddbara e-fordon	3 589
Personbilar	2 897
BEV	1 100
PHEV	1 797
Lätta Lastbilar BEV	603
Fyrhjulingar MC BEV	89
E-fordons andel av samtliga fordon	0,06 %
Ökning sedan föregående månad	227
i procent	7 %
Ökning sedan årsskiftet	367
i procent	11 %
CPEV (brutto)	0,15
Samlad energilagring	~52,7 MWh

e-fordonsförsäljningen vinner alltså mark i ökande takt men siffran på ett par tusen registrerade i Sverige under 2014 kan jämföras med BIL Swedens prognos för nybilsförsäljningen i Sverige samma år på 290 000 personbilar och 42 000 lätta lastbilar (högst 3,5 ton). (27)

3 Analys baserad på e-fordons teknik/kemi

3.1 Batteritekniska grunder

De två huvudtyperna av e-fordon – elhybridfordon och elfordon – kan sägas erbjuda olika körupplevelser där elfordon med fördel används i stadsmiljö till följd av sin tydligt begränsade räckvidd och behov av tidskrävande laddningstid, medan elhybridfordonet är mer flexibelt och kan tankas med konventionella bränslen vid sidan om elektrisk uppladdning.

Just räckviddsoron är en av de mest påtagliga utmaningarna för de e-fordon som bara har elektrisk drift. Laddningsstationer installeras löpande runt om i Sverige men det kommer dröja en tid innan sådana finns placerade utanför stadsmiljö. Därtill finns begränsningar i hur snabbt en elbil kan laddas. Med existerande snabbbladdning (2013) kan processen påskyndas till bara någon timme för full laddning och ett tiotal minuter för något mer än halv laddning, medan den laddning som sker då man laddar bilen över natten är betydligt långsammare. En påtaglig skillnad mellan dessa två ytterlighetstyper av laddning är dess påverkan på batteriets hälsa och livslängd. Den långsammare laddningen är mer skonsam än snabbbladdning och med dagens batterier så kan snabbbladdning stegvis orsaka inre skador hos batteriets celler vilket med tiden riskerar att sänka dess prestanda. Li-jon batterier som är speciellt utformade för högre effekt genom laddningen ligger i startgroparna men behöver komma ner i pris för att representera gångbara alternativ till de Li-jon batterityper och kemier som säljs idag.

Följande avsnitt presenterar de tekniska grunderna för hur ett batterisystem fungera med början på nivån för battericeller för att sedan vidga systemgränsen och tala om det som finns utanför cellen och även hur konventionella säkerhetssystem ska kunna garantera att ingen människa utsätts för högspänning från e-fordonet.

3.1.1 Battericellens uppbyggnad

Efter 2010 har allt fler fordonstillverkare annonserat att deras nya e-fordon ska använda sig av Li-jon batterikemi till följd av dess enastående batteriprestanda. Dessa fordonsbatterier är uppbyggda av celler som kan indelas i tre huvudgrupper:

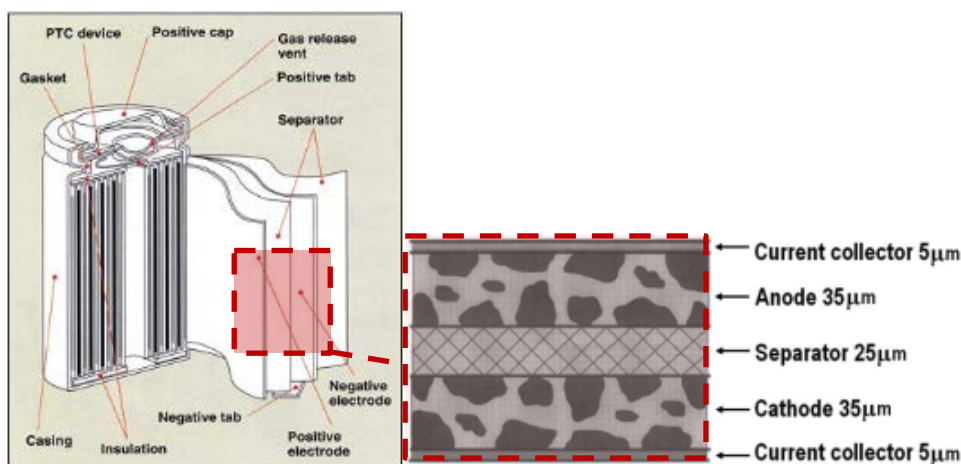
1. Prismatiska celler – kassettliknande battericeller, ofta med behållare av hårdplast.
2. Cylindriska celler – traditionella battericylindrar av olika storlek med aluminiumskal
3. Pås-celler (Pouch celler) – platta och mjuka battericeller omgivet med folie av aluminium och plast. Dessa benämns även ibland som laminerade celler



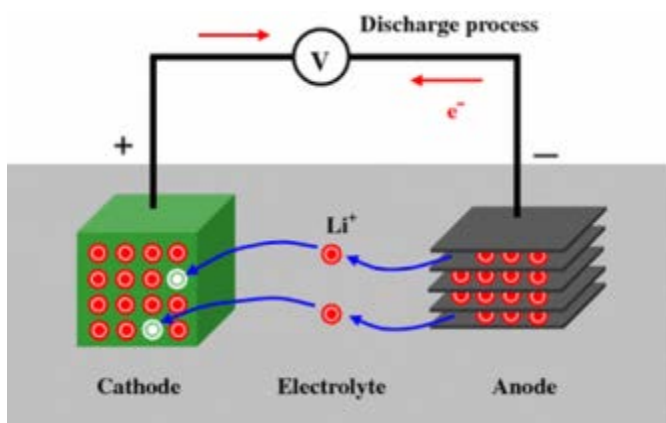
Figur 12 De tre huvudgrupper av battericell design är Prismatiska celler, Cylindriska celler, och Pås-celler (eller på engelska pouch cells). (28)

Den ström som uppkommer då ett batteri kopplas till en strömkrets genereras då positivt laddade litiumjoner förflyttar sig mellan batteriets två elektroder – från batteriets Anod genom Separatorn (även kallat Membran) till batteriets Katod samtidigt – som strömledare (engelska Current Collectors) skickar motsvarande mängd negativt laddade elektroner till en strömkrets utanför batteriet.

Figur 13 presenterar hur ett cylindriskt batteri är uppbyggt likt en sandwich av aktivt material som rullats ihop och placerats i en behållare med yttre plus- och minuspol, samt uppbyggnaden av det aktiva materials skikt. Figur 14 visar en schematisk bild över hur de positivt laddade litiumjonerna rör sig vid urladdning respektive uppladdning.

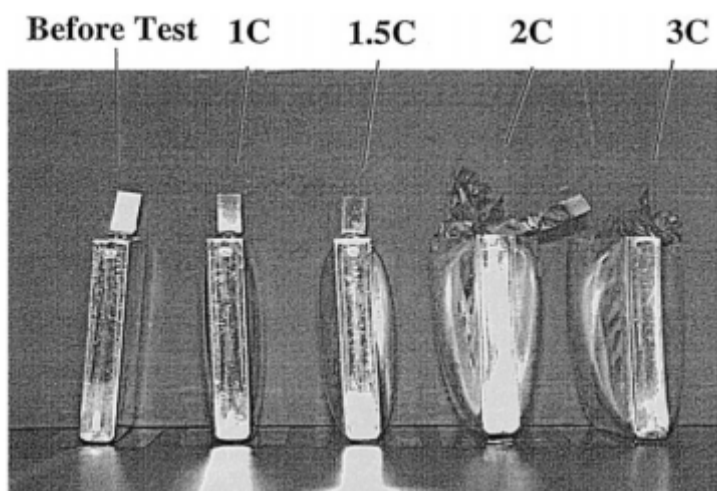


Figur 13 Tvärsnitt av en cylindrisk Li-jon battericell (29) och schematisk tvärsnitt genom ett skick av de aktiva materialen. Det kompletta skiktet av aktiva material är ca 0,1 mm tjockt (30)



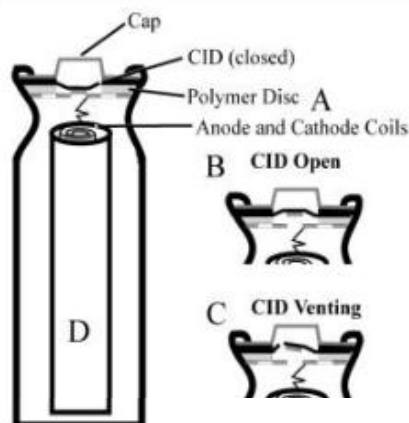
Figur 14 Schematisk bild över hur en ström alstras då litiumjoner (Li^+) rör sig mellan anoden (-) och katoden (+) (31)

I battericeller finns ofta säkerhetsfunktioner som ska kunna aktiveras ifall cellen utsätts för en miljö som kan skada batteriet eller till och med orsaka att batteriet drabbas av ett kritiskt haveri såsom brand eller explosion. De tre typerna av batteridesign (se Figur 12) har liknande men även olika möjligheter för detta. Gemensamt är att alla typer av Li-jon celler kan ventileras ut gas ifall det skulle uppkomma en tryckstegring inuti cellen (Figur 15). Detta är en säkerhetsåtgärd för att utvika att cellen exploderar vid ett högre tryck och då kan orsaka större skada på omgivande strukturer. Ytterligare en säkerhetsfunktion är att separatorn ofta är utav ett plastmaterial som då det utsätts för allt för hög temperatur delvis smälter och därigenom inte tillåter litiumjoner att vandra från den ena elektroden till den andra.



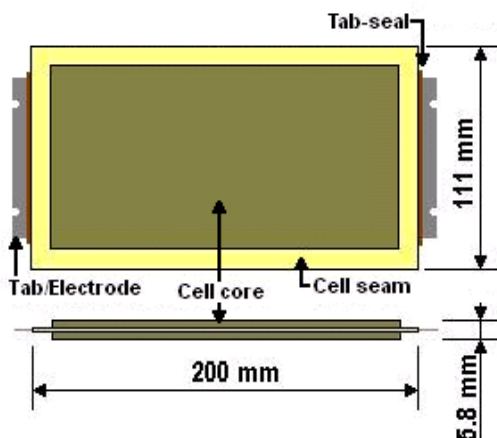
Figur 15 Exempel på hur en prismatisk cell med behållare av aluminiumfolie sväller och spricker under ett haveriprov med överladdning. Högre ström (1C -> 3C) påverkar förloppet. (32)

I framförallt cylindriska celler (men ibland också hos prismatiska celler) kan finnas CID (Current Interrupt Device) och PTC (Positive Temperature Coefficient). CID är ett tryckkänsligt membran som brister ifall gastrycket i cellen blir för högt och då bryts strömkretsen inuti cellen. PTC är en polymer placerad vid ena batteripolen. Den påverkas av förhöjd temperatur så att strömgenomgången stryps.



Figur 16 Cylindrisk Li-jon cell med installerade säkerhetsfunktioner. A: Polymerbaserad membran som vid förhöjd temperatur stryker strömmen genom batteriet; B: CID (Current Interrupt Device) bryter strömmen inuti battericellen ifall trycket inuti cellen når över en gränsvärde; C: Mekanisk i cellväggen som tillåter ett cell-internt övertryck att släppas ut, d.v.s en typ av tryckreglering; D: Separatorn har egenskapen att smälta vid förhöjd temperatur så att strömmen bryts. (33)

Liksom för prismatiska och cylindriska celler finns en stor variation av storlekar bland pås-celler. Ett exempel på dimensioner presenteras i Figur 17. Pås-celler består av två folier som svetsats ihop runt en kärna av aktivt material. Foliet består av en "sandwich" med aluminium folie i mitten och två polymerfolier på vardera sida om metallfoliet (Figur 18). Denna lösning påminner om materialet i kaffepåsar och pås-celler kallas därför ibland för Coffee-bag cell.



Figur 17 Exempel på dimensioner hos en kommersiell pås-cell för e-fordon (34)

En pås-cell har ingen CID, PTC eller mekanisk ventil för ventilering eftersom inte utrymme finns för sådant. Däremot kan den ventileras då värme och förhöjt inre tryck försvagar svetsen runt battericellens kärna. Figur 18 visar både hur foliet är uppbyggt och de olika komponenternas smältpunkter. Den lägsta smältpunkten återfinns i platsmaterialet vid svetsen kring batteriets tabbar, och det är också på denna plats som en pås-cell ventilerar.

PA / Outward side	27 μm	PA / Outside	166 $^{\circ}\text{C}$
Aluminium	47 μm	PP / Inside	226 $^{\circ}\text{C}$
PP / Inward side	87 μm	Tab-seal	105 $^{\circ}\text{C}$
		"	144 $^{\circ}\text{C}$
		"	272 $^{\circ}\text{C}$

Figur 18 Tvärsnitt av folie som omger pås-cellen, samt en tabell över smältpunkter hos svetsen (35)

3.1.2 Batterisystemet – State of Art lösning

Kommersiellt tillverkade e-fordon har sedan de första hybridfordonen ifrån Toyota modell Prius, hanterat elsäkerhet i produkten på största allvar.

En lansering av en produkt som innehåller ny teknik ställer alltid produktsäkerhet i första rummet om det rör sig om en seriös producent vilket vi kan säga när det gäller Toyota som företag.

Toyota införde ett antal ”tänk” som idag betecknas som ”State of Art” lösningar.

Följande konstruktionslösningar har idag blivit state of art:

- Ljusblått eller grått kablage för kabel med högre spänning än 30 Volt DC upp till 60 Volt DC.
- Orange kablage med koncentrisk ledare (skärm strumpa runt huvudledare) normalt uppbyggd med en eller flera individuellt driftisolerade ledare med skärm och utanpå denna ytterligare en isolering för att klara miljö i form av kemikalier. Denna yttre isolering är normalt utförd av polyuretan eller PUR isolerad som denna benämns. Orange kablage används till spänningsnivåer ifrån 60 Volt och uppåt.
De hybridfordon som idag finns på marknaden har ett batteri på ca:200 – 300 Volt DC men i installerad kraftelektronik kan det finnas s.k. spännings booster som kan höja spänningen upp till 650 Volt DC för att tillgodose ett bredare varvtalsområde för elmaskin så att denna anpassas till förbränningsmotorn varvtalsområde. Denna spänningshöjning sker lokalt i kraftelektroniken och kan inte drivas ut till batteriet.
- Hazardous Voltage Interlock (HVIL) eller på svenska inter lock slinga är ett slags ”död mans grepp” för traktionssystemet, om denna slinga bryts faller huvudkontaktorerna i batteriet och bryter strömmen. HVIL slingan matas av fordonets 14 Volts system vilket innebär att om man tar bort 12 Volts batteriet så brytes även traktionsspänningen!
Exempel på apparater som är kopplade till HVIL slingan kan vara:
 - lock på kraftelektronik som styr ut traktionsspänning till elmaskiner eller andra laster.
 - Lock på batteriet kan bryta denna HVIL slinga.
 - Manövrering av service säkringen kan bryta HVIL slinga.
 - Isärtagning av kontakter för traktionsspänning kan bryta HVIL slingan

Den uppmärksamme ser att ordvalet ”kan” dyker upp vilket innebär att om fordonstillverkaren valt annan metod för att fästa ett lock än med skruvförband t.ex. genom att limma fast locket permanent så behövs ingen HVIL funktion.

- Isolations fel i systemet t.ex. om någon av polerna i eller utanför batteriet konduktivt (med metalliskt ledande del/delar) kommit i kontakt med fordonets chassi så faller huvudkontaktorerna och strömmen bryts. Eftersom allt kablage har en koncentrisk ledare ansluten till fordonets chassi så kommer strömmen att brytas om en kabel penetreras av ett konduktivt ledande föremål som t.ex. en vass plåtkant.
- Utlöst krocksensor leder även den till att huvudkontakter faller och därmed bryter strömmen.
- Genom att stänga av fordonets ”tändning” genom att ta ur startnyckel eller stänga av systemet med ”Start/Stop” knapp så faller huvudkontakter och strömmen bryts.

3.1.3 Fordonssystemet – elhybridfordon kontra elfordon

Ordet hybrid i fordonssammanhang innebär att drivlinan består av två typer av traktionssystem, vanligen en förbränningsmotor och en elmaskin. Ett elfordon har däremot endast ett traktionssystem, nämligen en elmaskin.

Bränslecellsfordon är också ett elfordon där bränslecellen som omvandlar vätgas till el som dessutom har ett batteri som levererar tillskottsenergi när bränslecellen inte klarar effekt behovet.

Hybridfordon har, som namnet påvisar, fler än ett drivsystem. Vanligast är att en förbränningsmotor kombineras ihop med en elmaskin som kan leverera ett drivande moment för framdrift av fordonet. Idag finns fyra huvud alternativ:

Seriehybrid – t.ex. GM Volt eller Opel Ampera, kan laddas ifrån ett vägguttag.

Parallellhybrid – t.ex. Honda Civic

Power split hybrid – t.ex. Toyota Prius

Plug in hybrid – t.ex. Volvo V60 PHEV denna lösning liknar seriehybriden, kan laddas ifrån ett vägguttag.

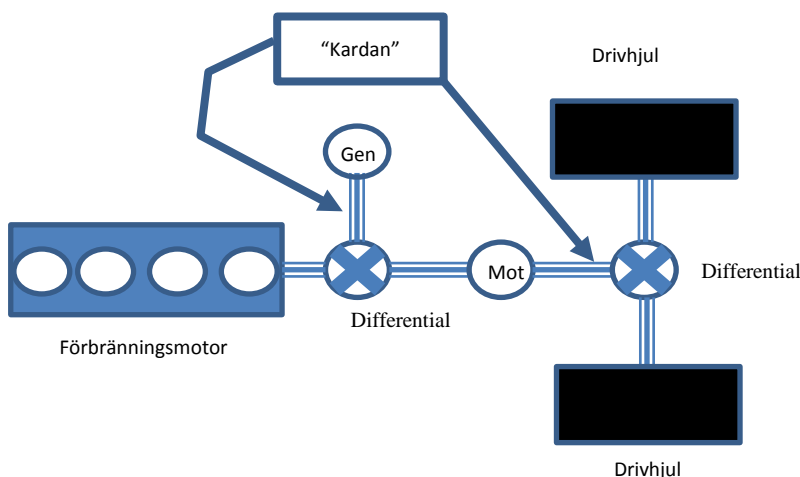
En seriehybrid har ett drivsystem där förbränningsmotorn driver en generator elenergin ifrån generatormotorn driver i sin tur en elmaskin, kablaget mellan dessa kan ses som en elektrisk ”kardan”

Elfordon t.ex. Nissan leaf och Mitsubishi IMEV har endast eldrift och dess energilagring, laddas ifrån ett vägguttag eller via speciellt avsett snabbladdnings utrustning som normalt finns på publik plats.

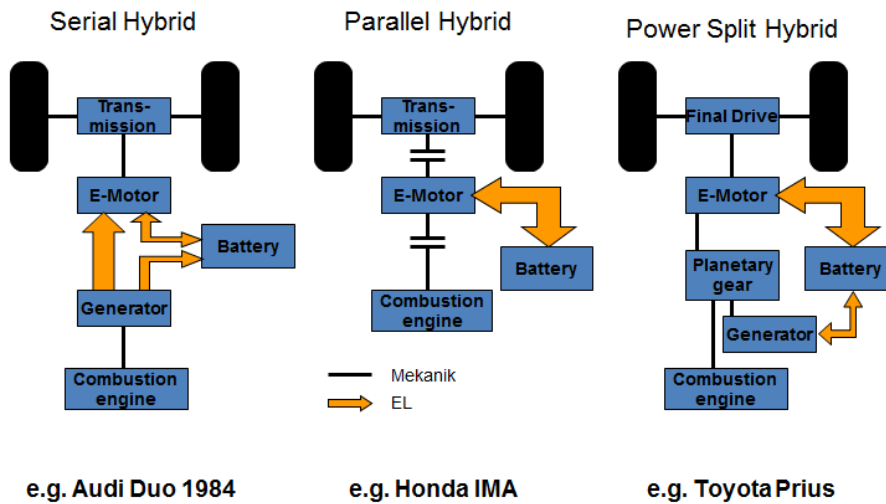
En parallellhybrid har ett drivsystem där man använder förbränningsmotorn parallellt med en elmaskin, elmaskinen har till uppgift att ge momenttillskott vid de tillfällen då förbränningsmotorn inte ger eller har svårt att ge moment, t.ex. vid låga varv. Elmaskinen kan gå i såväl motordrift (acceleration) som generatordrift (inbromsning).

En power split hybrid, Figur 19, har en förbränningsmotor som samarbetar med två elmaskiner. Dessa två elmaskiner är sammankopplade på ett sinnrikt sätt, tänk dig en differential där man har inkommande kardan, vänster utgående axel och höger utgående axel. Låt nu förbränningsmotorn vara kopplad till vänster axel, en elmaskin (i generatordrift) kopplad till kardanen samt höger utgående axel parallellt med ytterligare en elmaskin (i motordrift) som leder till fordonets drivhjul, se figur 16 nedan.

Samlingsnamnet för alla dessa fordon är e-Fordon och denna nomenklatur används fortsatt i detta kompendium.



Figur 19 Exempel på power split hybrid © Lars Hoffmann

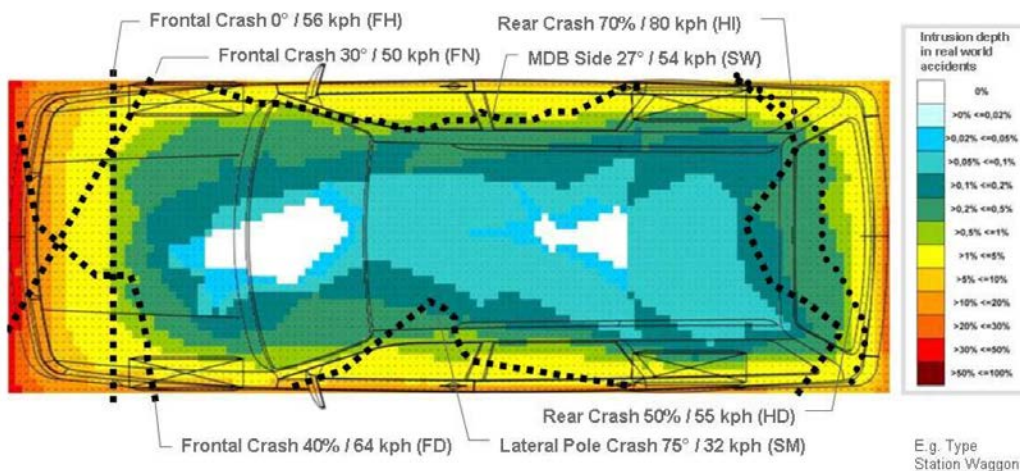


Figur 20 Systemöversikt på de tre huvudtyperna av elhybrid drivlinor (36) (37)

3.1.3.1 Vanliga placeringar

I de e-fordon som lanserats fram till 2013 placeras vanligen batterisystemet i den s.k. "Säkra Zonen" där inträngning av föremål vid kollision bedöms som minst sannolikt. Därtill skyddas batterisystemen ofta av kraftfulla skyddande strukturer kring batteripacket men också i själva fordonsstrukturen. Den Säkra Zonen ligger i bilens mitt och mellan bakaxlarna varför biltillverkares batterisystem ofta är formade antingen som ett 'T' (se Figur 23 och Figur 24) i bilens mittentunnel eller som en låda mellan bakaxlarna (se Figur 22). Batteriet kan även placeras mellan stötdämpartornen i bagageutrymmet vilket är förekommande i hybrider som t.ex. Toyota Prius och Volvo V60 Plugin. När det kommer till de fordon som endast har elektrisk traktion/drivning blir batteriet så stort att det måste packas in i fordonet på flera ställen och utnyttja de traditionella packningsvolymerna som ett fordon drivet av förbränningsmotor.

Endast de e-fordon som konstruerats för elektrisk traktion ifrån början har friheten att placera batteriet på platser i fordonet där man traditionellt inte tidigare haft möjlighet, dock rör det sig ändå om så kallade säkra områden som tidigare nämnts här ovan.



Figur 21 Olycksstatistik från databasen GIDAS har sammanställts för att illustrera de zoner i en bil som drabbas mest och drabbas minst av inträngande våld i samband med kollisioner. Vanligen betraktas området i bilens mittparti och mellan bakaxlarna (där ljusblått och vita områden syns) som "Den säkra zonen". (38)

På-s-celler från LG Chem används bland annat av Volvo V60 Plug-in Hybrid och GM Volt:

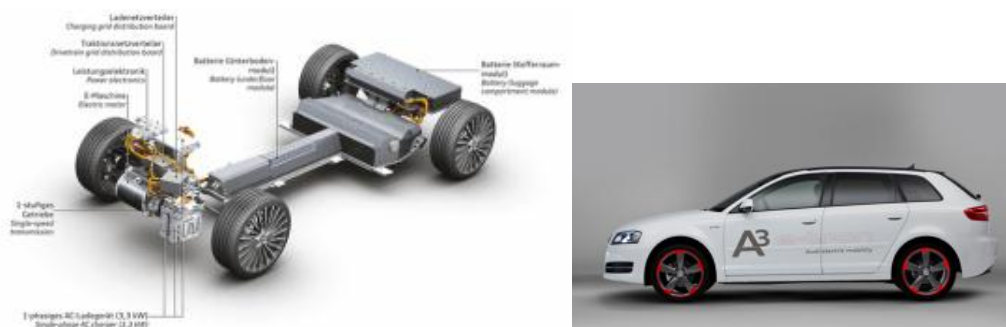


Figur 22 Volvo V60 Plug-in Hybrid med batterisystemet ovanför bakaxeln (39) (40)



Figur 23 GM Volt har sitt batterisystem monterat golvtunneln och framför bakaxeln (41) (42)

Prismatiska celler återfinns bland annat hos Audis program för modellerna e-tron (43):



Figur 24 Audi A3 Sportback e-tron 2011 med batterisystem monterat i tunneln samt framför och ovanför bakaxeln (44)

Tesla Model S var kanske den mest omtalade storsäljaren bland rena elbilar under 2013. Den har sitt batteripack placerat under golvet mellan axlarna. (45)



Figur 25 Tesla Model S är en ren elbil med sitt traktionsbatteri under golvet mellan axlarna

Tesla använder sig av cylindriska battericeller av samma typ som återfinns i Laptops och går under benämningen 18650 (18mm i diameter och 65 mm i höjd). Leverantör till Tesla är japanska Panasonic.

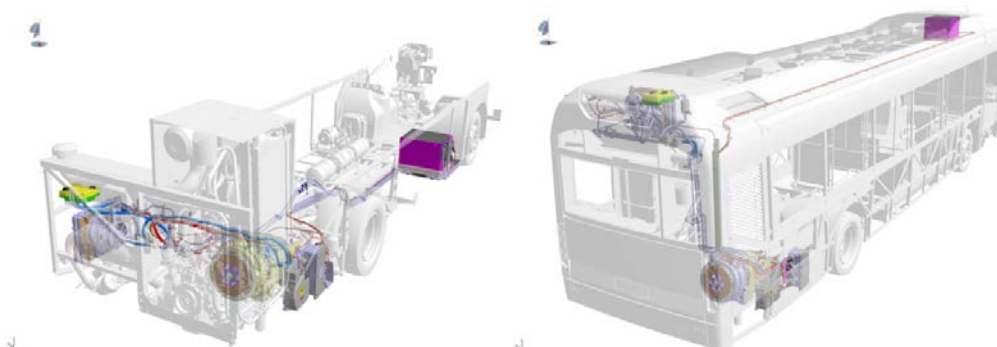


Figur 26 Teslas traktionsbatteri består av moduler med **Panasonics cylindriska 18650 celler.** (46)

Exempel på placeringar av traktionsbatterier hos tunga fordon såsom lastbilar och bussar är bakom vänster eller höger framhjul samt hos låga bussar även uppe på främre delen av taket (se Figur 27 och Figur 28).



Figur 27 Lastbil med traktionsbatteriet placerat bakom vänster framhjul. (47)

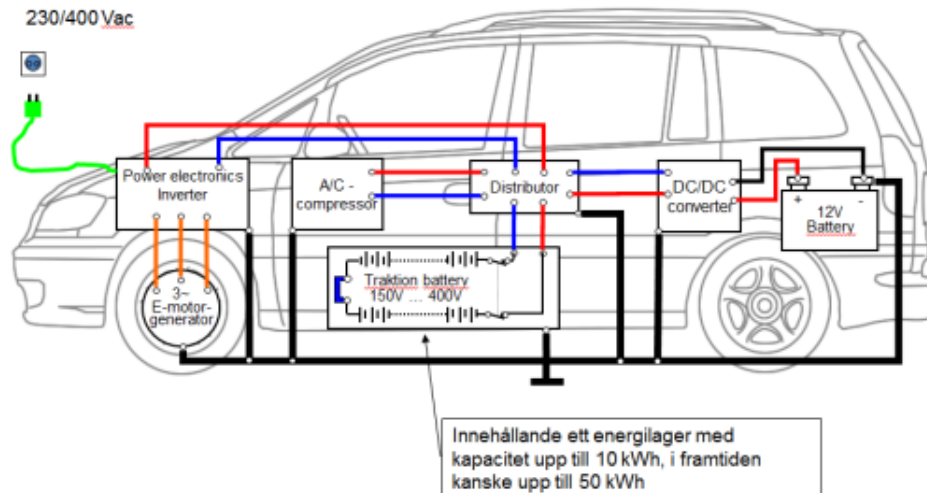


Figur 28 På bussar är kan traktionsbatteriet vara placerat bakom framhjul eller hos låga bussar på dess främre tak. (47)

3.1.3.2 Inbyggda säkerhetsfunktioner i batterisystemet

Ett el eller hybridsystem är friflytande, d.v.s. att varken dess positiva eller negativa pol är ansluten till fordonets chassi. Detta motverkar uppkomst av en sluten krets om någon av traktionbatteriets poler kommer i kontakt med fordonets chassi, dock har dessa system alltid en kapacitiv koppling mellan godtycklig pol och chassi. Denna kapacitans kan vara

mellan 50 till 200 nF mellan godtycklig pol och chassi, varför en beröring mellan godtycklig pol och chassi kan upplevas som en elektrisk stöt.



Figur 29 Överblick på e-fordons elsystem © Lars Hoffmann

Traktionssystemets elektromekaniska komponenter t.ex. kontaktorer och reläer som distribuerar batteriets elenergi styrs alltid via fordonets 12 eller 24 volts system, därmed kan inte traktionssystemet spänning sättas om fordonets 12 eller 24 batteri kopplas bort.

Traktionssystem till personbilar kan ha ett spänningsintervall mellan 48 Vdc till dryga 600 Vdc beroende på systemets art. Hos tunga fordon kan spänningen variera mellan 300 till 600 Vdc.

Batterisystemets energiinnehåll varierar också det, för personbilar kan det variera mellan några hundra Wh till några tiotals kWh. För tunga fordon startar normalt energiinnehållet ifrån några kWh upp till 100 kWh.

Detta spann beror på vilken typ av system som fordonet ska utnyttja, om det är ett hybridsystem (blandning av förbränningsmotor och elmotor) eller ett fordon som endast drivs med en elmotor.

Fordons producenter och batteri leverantörer programmerar sina styr och kontrollsystem för traktions batterierna så att systemen inte ska kunna cykla hela batteriet, de pratar om ett laddningsfönster eller på engelska "State Of Charge" (SOC) fönster.

Ett batteri med NiMH kemi för hybrid fordon utnyttjar normalt inte till mer än 15 till 20 % av sitt SOC-fönster men det finns NiMH batterier som utnyttjar upp till 80 % av sitt SOC-fönster för traktions drifter.

Då ett NiMH batteri utnyttjar 15 till 20 % innebär det i praktiken att ett NiMH-batteri på 1,1 kWh bara använder 165 till 220 Wh av dess totala energiinnehåll. Den främsta anledningen till denna till synes snäva användning är för att spara på batteriet och därigenom säkra batteriets livslängd.

Ett batteri av litiumtyp kan däremot cyklas i ett betydligt större SOC-fönster, det är inte ovanligt att dessa har ett SOC-fönster mellan 30 till 65 %, t.o.m. upp till 90 % finns i extremfall.

3.1.3.3 Elbilens utnyttjande av batteriet

Ett elfordon som ska klara av att köra 100 km kräver ca: 20 kWh elektrisk energi men, ett litiumbatteri tål inte att laddas upp och ur noll till hundra procent gång efter annan. Så för att öka driftslivslängden bestyckar man ett fordon med ett batterisystem som är något

större bara för att klara varugarantier och teknisk tillgänglighet. Då kommer det ovan nämnda batteripaketet att bli något större, låt oss anta storleken 25 kWh.

3.1.3.4 Hybridbilens utnyttjande av batteriet

Även om fordonstillverkaren installerat ett batteri på 300 Vdc och 2,4 kWh innebär det inte att du som förare kan utnyttja mer än kanske 55 % av batteriets kapacitet.

Vad talar dessa siffror om för betraktaren?

$2400 \text{ [Wh]} * 0,55 = 1320 \text{ [Wh]}$, fordonsproducenten använder inte mer än 1,3 kWh av batteriets totala energiinnehåll på 2,4 kWh för att klara livslängd över garantitiden.

Cellkapaciteten kan också den beräknas genom att dividera energi med spänning, $2400 \text{ [Wh]} / 300 \text{ [Vdc]} = 8 \text{ Ah}$

En cell beskrivs inte bara genom spänning och energi, man beskriver dessutom dess kapacitet i Ah samt dess "C-rate"¹ ett slags mått på hur mycket max ström cellen kan avge under 30 sekunder.

Ett hybridbatteri bör utrustas med celler för höga strömmar, man säger att batteriet är "effekt optimerat" medan ett elbilsbatteri är "energi optimerat". Ett effekt optimerat batteri kan ha en C-rate på 30 medan ett energi optimerat batteri ligger på ca: 10 i C-rate.

Nu säger vi att ovan batteri har ett C-rate värde på 30 detta ger en maxström på $8 \text{ [Ah]} * 30 = 240 \text{ A}$ under 30 sekunder. Naturligtvis kan cellerna och därmed hela batteriet leverera högre ström under någon sekund.

Dessa s.k. kortslutningsströmmar brukar vara fem till tio gånger dess max C-rate, alltså runt 10000 A för ett batteri av denna klass.

Det kan låta hisnande med så höga strömmar men betraktaren ska vara väl medveten om att det krävs tillgång till höga strömmar för att klara brandskyddet och därmed smältsäkringens utlösningvillkor. Hög ström innebär snabb bryt tid för installerad smältsäkring i traktionssystemet.

Ett traktionsbatteri för fordon har internt en hel mängd kriterier som måste uppfyllas för att inte dess övervakningssystem ska stänga av batteriet med dess huvudkontakter. Det som intern påverkar en sådan avstängning kan ses nedan.

Följande fel fall ska per automatik koppla ner ett batteri system:

- Över temperatur
- Underspänning
- Överspänning
- Överström
- Fel på batteriets kylsystem
- Påverkad krocksensor
- Detektering av påbörjad "voltning" av hela fordonet
- Isolationsfel, till viss del och i vissa fall vid direkt detektering
- I förekommande fall detektering av fel ström som t.ex. ljusbågsström.

¹ $C - rate \left[\frac{1}{h} \right] = \frac{\text{Ström under urladdning eller uppladdning [A]}}{\text{Elektrisk kapacitet hos batteriet [Ah]}}$

3.1.3.5 Kraftelektroniken

I ett elektriskt drivsystem finns dessutom ett snabbt energilager, själva kraftelektroniken innehåller ett kondensatorbatteri som har till sin primära uppgift att säkerställa att krafttransistorerna kommuterar (byter kraftriktningar) mellan sig. Därför kallas denna kapacitans just kommuteringskapacitans och består normalt av en kondensator med storlek upp till ca:1500 uF. Då batteriets huvudkontakter brutit på grund av något av de nämnda felfallen ska denna kapacitans laddas ur passivt snabbare än fem minuter eller aktivt snabbare än två sekunder. Detta är viktigt att veta då ett traktionssystem kan vara laddad med skadlig spänning trots att batteriet är bortkopplat. Detta är en av anledningarna till att ingen ska klippa i någon av de orangea kablarna, det kan finnas spänning kvar i systemet.

Under en krock kommer följande att ske:

- När krockpulsen löser ut krocksensorn och airbags kommer batteriets huvudkontakter att bryta strömmen

Kraftelektronikens kommuteringskapacitans kommer efter att strömmen brutits att laddas ur passivt eller aktivt beroende på hur fordonstillverkaren konstruerat sitt system eller hur illa systemet skadats vid skadetillfället. Som långsammast sker passiv urladdning i båda fallen snabbare än fem minuter varvid kondensatorbatteriets spänning hamnar på en nivå lägre.

Detta innebär åtminstone fem minuter efter huvudkontaktorn brutit strömmen så har denna kapacitans urladdats till nivåer under 60 V, vilket klassas som lågspänning enligt den globala standarden SAE J1128. Orsaken till detta berörs i sektion 4.2 *Hälsofaror orsakade elektricitet och spänning*.

Ett batterisystem innehåller mer än bara själva batteriet, det är mycket kontrollelektronik som ska övervaka hela systemet och samverka med övriga fordonet.

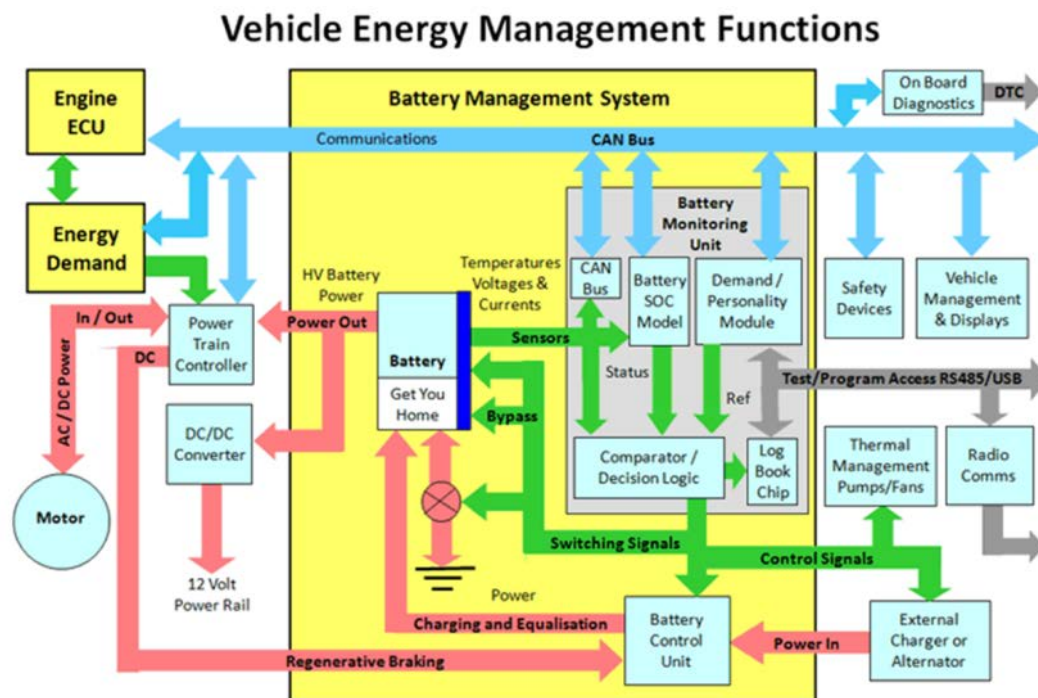
Detta styrsystem övervakar spänning, ström, temperatur och eventuell felström.

Felström kan delas upp i överström eller ström som uppstår vid isolationsfel, att någon av batteriets enskilda poler kommer i kontakt med fordonets chassi.

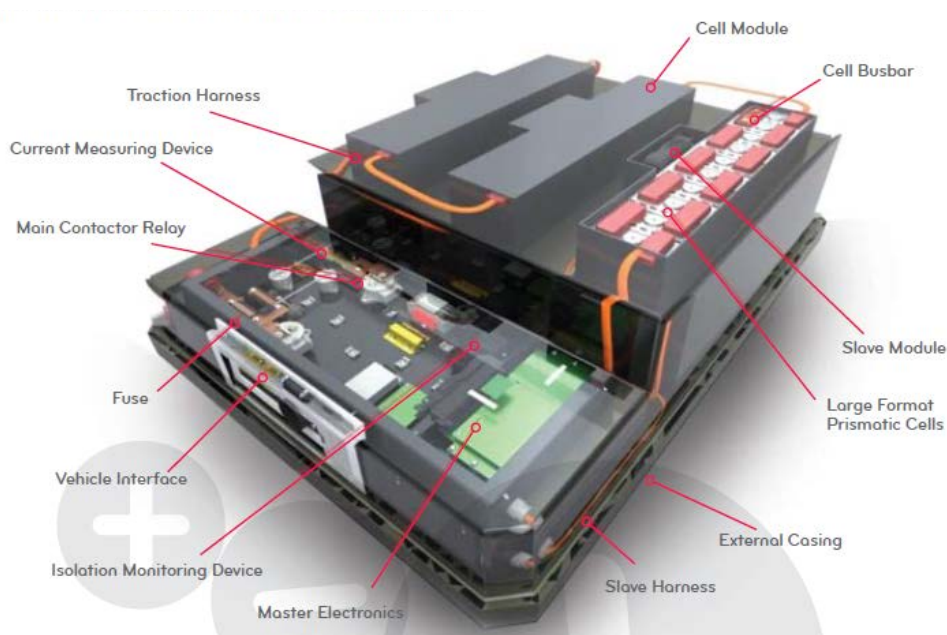
Detta system namnges normalt som "Battery Management System" eller BMS (Figur 30).

BMS:ens uppgift är att samverka med övriga fordonet och att övervaka det elektrokemiska energilager som används för traktion.

Om batteriets celler kommer utanför dess normala temperaturområde, spänningsområde eller om stora kapacitets skillnader uppstår mellan cellerna ska BMS:en först varna och där efter att stänga av batteriet.



Figur 30 Komplettraktionssystem och dess flödesschema för styrning (48)



Figur 31 Exempel på batterisystem och elektronisk styrutrustning (28)

Ett system som utsetts för t.ex. kraftig krock har inbyggda system som ska lösa ut det elektrokemiska energilagret och oskadliggöra elsystemet inom ett ögonblick. Detta gäller naturligtvis kommersiellt konstruerade fordon som konstruerats enligt gällande:

- Lagar
- Standarder
- Normer
- ”State of Art”
- Egen industri standard

3.2 Batterikemiska grunder

3.2.1 Överblick över batterityper

I sektion 3.1.1 presenterades battericellens hos Li-jon batterier. Uppbyggnaden av skikten av aktiva material (Figur 13 och Figur 14) är i huvudsak identisk med alla battericeller – strömledare/elektrod (+)/elektrolyt (med eller utan separator)/elektrod (-)/strömledare.

Spänningen hos en battericell beror av vilka material som finns vid den positiva elektroden och den negativa elektroden och den potentialskillnad som finns mellan dessa två material. Den största möjliga potentialskillnad som kan uppnås av dagens batterier ligger på dryga 4 volt dc och representeras av litium-jon batterier då de är fulladdade. För att skapa batterisystem med högre spänning måste celler kopplas samman i serie. Då batterier kopplas samman i parallella strängar ökar man batteripackets elektriska kapacitet. Den effekt och den urladdningstid som ett batteripack kan erbjuda beror av hur ett batterisystem sammansatts av battericeller kopplade i serie tillsammans med battericeller kopplade i parallella block.

Tabell 2 presenterar en översyn över huvudgrupperna av batterityper som används idag. Dessa är här indelade i icke-uppladdningsbara (primära) och uppladdningsbara batterier (sekundära). Då vi studerar fordonsbatterier så är det de sekundära, d.v.s. uppladdningsbara batterierna som är intressanta. I texten här nedan har förutom de fyra sekundära batterityper som omnämns i Tabell 2 även Nickel Kadmium batterier och superkondensatorer presenterats. Kadmium batterier återfinns idag endast inom exklusiva användningsområden såsom medicinska (t.ex. pace maker) medan Superkondensatorer (elektrokemiska celler men ej batterier) inte ännu fått genomslag.

Tabell 2 Tabell över huvudgrupper av batterityper och förhållandet mellan deras elektriska kapacitet eller energi i förhållande till massa eller volym (ju högre desto bättre) (49)

Batterityp	Anod	Katod	Elektrolyt	Cellreaktion	V	Teoretiskt		Verkligt batteri	
						Ah /kg	Wh /kg	Wh /kg	Wh /L
<i>Primära batterier</i>									
Alkalisk MnO ₂	Zn	MnO ₂	Alkalisk vattenlösning	$\text{Li} + 2\text{MnO}_2 \rightarrow \text{ZnO} + \text{Mn}_2\text{O}_3$	1.5	224	358	145	400
Li/MnO ₂	Li	MnO ₂	Vattenfri saltlösning	$\text{Li} + \text{MnO}_2 \rightarrow \text{MnO}_2(\text{Li}^+)$	3.5	286	1000	230	535
<i>Sekundära batterier</i>									
Bly/ syra	Pb	PbO ₂	Sur vattenlösning	$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.1	120	252	35	70
Nickel-metallhydrid	MH	Ni-oxid	Alkalisk vattenlösning	$\text{MH} + \text{NiOO} \rightarrow \text{M} + \text{Ni}(\text{OH})_2$	1.35	178	240	75	240
Lithium-jon	Li ₃ C ₆	Li _(1-x) MO ₂	Vattenfri saltlösning	$\text{Li}_3\text{C}_6 + \text{Li}_{(1-x)}\text{MO}_2 \rightarrow \text{LiMO}_2 + \text{C}_6$	4.0	100	400	140	400
ZEBRA	Na	NiCl ₂	Saltsmälta & ledande keram	$2\text{Na} + \text{NiCl}_2 \rightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ni}$	2.58	305	787	115	190

3.2.1.1 Bly/syra celler

Startbatterier hos bilar är nästan uteslutande blybatterier. Dessa har en cellspänning i vila på 2 volt dc och därmed har ett 12 volts batteri sex celler.

Det finns en rad olika designutföranden vara de vanligaste är:

- Flytande syra med öppet kärl
- Flytande syra med slutet kärl s.k. VRLA batteri

- Flytande syra men bunden i en glasfibermatta mellan cellerna, s.k. AGM batteri (Absorbent glass mat)
- Syra bunden i geléform (s.k. gelé batteri)

Bly/syra batterier har en vattenbaserad elektrolyt vilken inte är brandfarlig. Däremot kan vätgas bildas i samband med kraftfull urladdning och uppladdning till följd av elektrolytiska processer mellan elektroderna och denna vattenblandning. Detta är orsaken till risken att knallgas bildas hos dessa batterier.

Eftersom blybatterier har förhållandevis låg energidensitet (se Figur 1) används de inte som traktionsbatterier i e-fordon men är fortfarande vanliga som startbatterier.

3.2.1.2 Nickel Kadmium (NiCd) celler

Dessa celler har en cellspänning på 1.2 volt dc och mycket goda urladdningsegenskaper. Denna typ av batterier har använts flitigt fram till 90-talet varefter de fasats ut eftersom kadmium är miljöovänligt. 2006 förbjöds dessa batterier i EU under "Battery Directive" (2006/66/EC) för all användning förutom inom sjukvården (t.ex. pacemaker) (50). Av den anledningen finns idag inga nyttillverkade e-fordon med denna kemi.

3.2.1.3 Nickel-Metallhydrid celler (NiMH)

Denna typ av celler har funnits sedan mitten av 1970-talet, denna kemi har med framgång använts i Ford Escape, Toyota Prius, Lexus hybrider och Honda Civic. Dessa celler har en nominell spänning av 1,2 Volt per cell. Den vattenbaserade elektrolyten som används i dessa celler består av Kaliumhydroxid vilken har en extremt frätande egenskap på vävnad som hud och slemhinnor.

Liksom hos blybatterier är NiMH batteriets elektrolyt inte brandfarlig men kan generera vätgas.

3.2.1.4 Litiumjon celler (Li-jon)

De första fordonen i serieproduktion där Li-jon celler används är Tesla, GM Volt/Opel Ampera, BMW 7-serie samt Mercedes S-klass med hybridsystem. Alla dessa innehåller celler med sådana mekaniska säkerhetssystem som presenterades i sektion 3.1.1 "Battericellens uppbyggnad" i den utsträckning som de använder cylindriska celler, prismatiska celler, respektive påsceller. Alla serietillverkade e-Fordon har celler som kan tryckutjämna ett inre övertryck genom en dedikerad försvagning i cellstrukturen eller mekanisk ventil.

Det finns en stor familj av varianter av Li-jon batterier där de olika "kemierna" ofta benämns med valet av materialet i katoden. Anledningen till detta är att variationerna av aktiva material på den elektroden är betydligt större än materialvalet på anod elektroden. Som påpekades ovan beror ett batteris cellspänning på vilka aktiva material som används vid respektive elektrod. Li-jon batterier kan leverera från 2,5 Vdc till närmare 4 Vdc som medelvärde (eller "nominell") spänning.

Sammankopplade i batteripack förekommer system på allt från kring 200 till kring 600 Vdc. Många Japanska biltillverkare är intresserade av 200 Vdc medan Europeiska och Amerikanska tenderar att inrikta sig mot dryga 400 Vdc, och system för tunga fordon såsom lastbilar kan använda dryga 600 Vdc med Li-jon batterier.

3.2.1.5 Zebra batterier

Zebra batterier har en arbetstemperatur mellan 270 °C till 350 °C för att dess elektrolyt av natriumaluminiumklorid (NaAlCl_4) ska vara flytande. Detta är nödvändigt för att batteriet ska kunna överföra jonladdningar mellan elektroderna under urladdning och uppladdning. Elektrolytens smältpunkt ligger vid 157 °C men laddningstransporten är mer fördelaktig vid de högre temperaturerna. Denna elektrolyt är inte brännbar. (51)

Ett fordon som använder Zebra batterier är elbilen Think. Detta företag startade i Norge där produktion startade 2008. Företaget gick genom en serie av omkonstruktioner där tillverkningen flyttades till Finland och Valmet Automotive fabriken, för att slutligen hamna i Indiana, USA. Efter den sista konkursen upphörde produktionen i augusti 2012. (52)

Zebra batteriets utbredning är mycket begränsad och ser inte ut att komma bli vanlig i Sverige inom det närmaste årtiondet.

3.2.1.6 Superkondensatorer

Superkondensatorer eller Ultrakondensatorer är inte batterier men likväl genererar ström då de ansluts till en sluten krets. Som visas i Figur 1 erbjuder kondensatorer mycket hög effekttäthet men sämst energitäthet.

Kondensatorer kan inte lagra stora mängder elektrisk energi under längre tid men däremot har de möjlighet att laddas upp och urladdas snabbare än något batteri. Detta gör dem intressanta för e-fordon med extrem hybriddrift där effektbehovet går före energibehovet. Exempel på dessa finner man bland framförallt tyngre fordon såsom lastbilar, bussar och anläggningsfordon. Dock finns denna teknologi ännu så länge inte i seriemässigt utförande.

Inom formel 1 används s.k. KERS (Kinetic Energy recovery System), i dessa system används kondensatorer för att accelerera dessa fordon med mycket effekt under en kort tid en gång per banvarv.

Superkondensatorer använder liksom Li-jon batterier en organisk elektrolyt vilket medför att de inte genererar vätgas såsom vattenbaserade batterier men däremot bär på brandfarligt material.

3.2.2 Kemiskt innehåll hos Li-jon batteri

I stycket 2.1.6 nämndes att Sony var först med att leverera ett kommersiellt Li-jon batteri. Detta blev snabbt vanligt i bärbara datorer och mobiltelefoner under 90-talet. Detta pionjär-batteri använde grafit som anod och Litiumkoltioxid (LiCoO_2) som katod, och erbjöd den högsta cellspänningen hos något laddningsbart batteri dittills. Fortfarande ligger denna Li-jon kemin i toppskiktet av kemier med hög energidensitet. Dock, i och med att Sonys batteri erövrade marknaden och spreds uppkom allt fler batterihaverier då denna batterityp användes i laptops och mobiltelefoner. Det visade sig att katod materialet var mindre stabilt än väntat.

Det kunde hända då ett sådant batteri stressades med höga urladdningsströmmar eller felaktig uppladdning att batteriet kastades in i s.k. Thermal Runaway. Detta kritiska haveriscenario sker då detta katodmaterial med koboltoxid utsätts för förhöjd temperatur ($150\text{-}170^\circ\text{C}$) varvid materialet började brytas ner och förbrännas tillsammans med den organiska elektrolyten, vilket ledde till att värme genererades och situationen förvärrades. Slutligen kan denna typ av battericell rusa i hetta och ta eld och/eller sprängas om gaserna inuti inte ventileras.

3.2.2.1 Reaktiva material inuti cellen

Detta problem har initierat en gedigen forskningsansats som pågår fortfarande med ambition att ta fram allt stabilare katodmaterial utan att sänka Li-jon batteriets excellenta energidensitet. I huvudsak finns tre grupper av katodmaterial:

- litium-transitionsmetalloxid (t.ex. LiCoO , NCA och NMC)
- litium-manganspinell (t.ex. LiMn_2O_4)
- litiumföreningar med fosfat (t.ex. LiFePO_4 , och LiMgFePO_4)

För att moderera och öka li-jon cellens termiska stabilitet dopas katoden ofta med ytterligare transitionsmetaller såsom Ni, Al, och Mn. Forskning på sådana katodmaterial har höjt starttemperaturen för Thermal Runaway så att dagens främsta material tål uppemot 200-250 °C. (53)

Då batteriernas elektrodmaterial numera blivit betydligt stabilare så riktas allt mer forskning mot elektrolyten hos Li-jon batterier och de komponenter som där används.

I enkelhet består en elektrolyt av en vätska/lösningsmedel och ett salt som ger möjlighet för laddningstransport inuti batteriet med hjälp av joner. I Li-jon batterier används organiska lösningsmedel tillsammans med ett salt. Det finns flera typer av lämpliga salt på forskningsstadiet men i kommersiella Li-jon batterier används nästan uteslutande saltet LiPF₆ eftersom det erbjuder bäst cocktail av egenskaper såsom stabilitet, förmåga att leda jonladdningar och livslängd.

För att ytterligare förstärka elektrolytens stabilitet, säkerhet och livslängd finns en variation av additiva ämnen såsom brandskyddsämnen samt ”tillsats-molekyler” som kan förhindra att vissa oönskade kemiska reaktioner uppkommer och sänker batteriets livslängd. (54)

Mycket forskning har alltså utförts för att förbättra både elektrodmaterialens och elektrolytens stabilitet. Men, vad skulle kunna hända ifall, trots alla dessa åtgärder, ett Li-jon batteri provoceras till bristningsgränsen – provoceras till termisk rusning?

3.2.2.2 Brandtriangeln då en Li-jon battericell havererar

Utifrån den klassiska brandtriangeln kan man säga att då battericellen är strukturellt intakt så kan brandtriangelns tre beståndsdelar återfinnas inuti cellen enligt:

- Syre - Syret frigörs från överhettad katod (pluspol) – katodmaterialet avgörande
- Bränsle - Den organiska elektrolyten
- Värme - Värme kan skapas av cellen själv eller tillföras utifrån, från annan källa

Efter att battericellen brustit öppen kan elektrolyt ångor och andra brandfarliga gaser blandas med luft och brand uppstå, varvid brandtriangelns tre delar närvara enligt:

- Syre - Syret finns i rikligt mängd i omgivande luft
- Bränsle - Den organiska elektrolytens ångor och andra brännbara gaser
- Värme - Värme kan skapas av cellen själv eller tillföras utifrån, från annan källa

3.2.2.3 Elektrolytens teoretiska brännbarhet och förbränningsvärme

Om ett Li-jon batteri öppnar kan de lösningsmedel som finns i batteriets elektrolyt frigöras som brandfarliga ångor. De bär en lukt av t.ex. nagellack, eter eller Plastic Padding beroende av vilka alkydkarbonater som är mest förekommande i blandningen. Förkortningarna i Tabell 3 står för Ethyl Carbonate (EC), Propyl Carbonate (PC), Di-Methyl Carbonate (DMC), Ethyl-Methyl Carbonate (EMC), och Di-Ethyl Carbonate (DEC).

EC och PC är cykliska med starkare bindningar inuti molekylen än de mer linjära molekylerna DMC, EMC och DEC. Detta beror på att det dubbelbundna syret i mitten är mer tillgängligt i de linjära molekylerna än i de cykliska för en attack av någon typ av

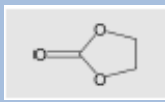
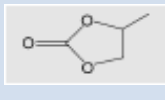
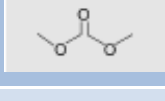
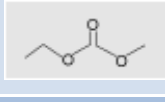
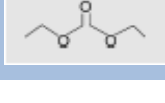
reaktant². De är alltså mer reaktiva än de cykliska molekylerna. Detta är en bidragande faktor till den låga flampunkten hos dessa tre, vilket presenteras i

Tabell 3.

Man kan lägga märke till att de har omkring 500 gånger så höga ångtryck än de cykliska molekylerna vilket tyder på att de är mycket mer flyktiga. De cykliska alkydkarbonaterna har också betydligt högre kokpunkt vilket liksom den höga flampunkten indikerar att de är stabilare än DMC, EMC och DEC.

Trots att skillnaden i ämnenas flampunkt påvisar att det verkar vara lättare att antända de mer linjära kolvätena så skiljer sig förbränningsenergin hos dessa kolvätekedjor inte mycket mellan de olika lösningsmedlen [-13 till -22 kJ/g] då brand väl har uppstått. Deras förbränningsenergi kan sättas i jämförelse med att diesel har en förbränningsenergi på ca. -42 kJ/g. (55) Minustecknet signalerar att värme frigörs under förbränning.

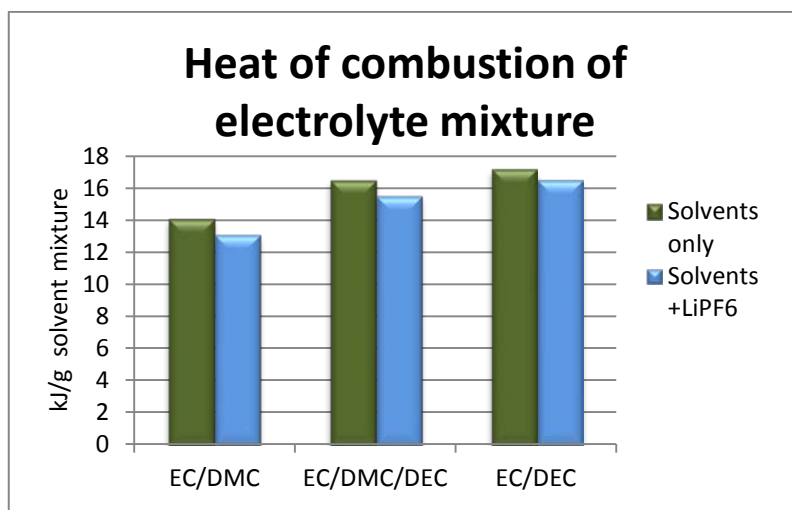
Tabell 3 Sammanställning av de vanligaste lösningsmedlen i elektrolyten (56) (57) (58) (59) (60) (61) © David Sturk

Lösningsmedel	Molekyl Struktur	CAS num.	Kok punkt (1atm) (°C)	Start temp. i Luft (°C)	Start temp. Argon (°C)	Flam-punkt (1atm) (°C)	Auto tänd punkt (°C)	Ång-tryck (STP)** (mmHg)	Explosion gränser (↓/↑) (%)	Förbrännings energi (kJ/g)
EC		96-49-1	238	170	140	160	465	0.02	3.6/16.1	-13.24
PC		108-32-7	242	100	100*	132	435	0.03	1.8/14.3	-14.21
DMC		616-38-6	90	177	223	18	458	18.33	4.22/12.87	-15.86
EMC		623-53-0	109		160	27				
DEC		105-58-8	126	138	243	31	445	9.998	1.4/11	-22.76

Notera: *Endotermisk start temperatur **Standard Temperature and Pressure (20°C och 1 atmosfär)

I en elektrolytblandning ingår alkydkarbonaterna i en stor variation av koncentrationer. I Figur 32 visas hur olika elektrolytblandningars koncentrationer påverkar elektrolytens förbränningsenergi. Dock ligger den kvar inom samma områden som de enskilda lösningsmedlen. Däremot har saltet en reducerande effekt på förbränningsenergin eftersom dess sönderdelning kostar värme – dvs. den är ”endoterm” istället för motsatsen ”exoterm”.

² Reaktanter är de molekyler eller atomer som reagerar i en kemisk reaktion



Figur 32 Förbränningsenergi för tre elektrolytblandningar med koncentrationerna 1:1 eller 1:1:1 samt med elektrolytsaltet inkluderat. (62) © David Sturk

Fenomenet att de enskilda lösningsmedlens reaktivitet minskar då de blandas samman i en elektrolytblandning illustreras i Tabell 4. Här ser man att start temperaturen för nedbrytning av elektrolytblandningen ligger inom spannet 140°C till 190°C, till skillnad från motsvarande starttemperaturer som presenteras i Tabell 3 för de enskilda lösningsmedlen där spannet sträcker sig från 100°C till 250°C.

En elektrolytblandning är alltså mindre reaktiv än de mest reaktiva enskilda lösningsmedlen. Blandningens förbränningsenergi ligger däremot kvar på samma nivåer som för lösningsmedlen.

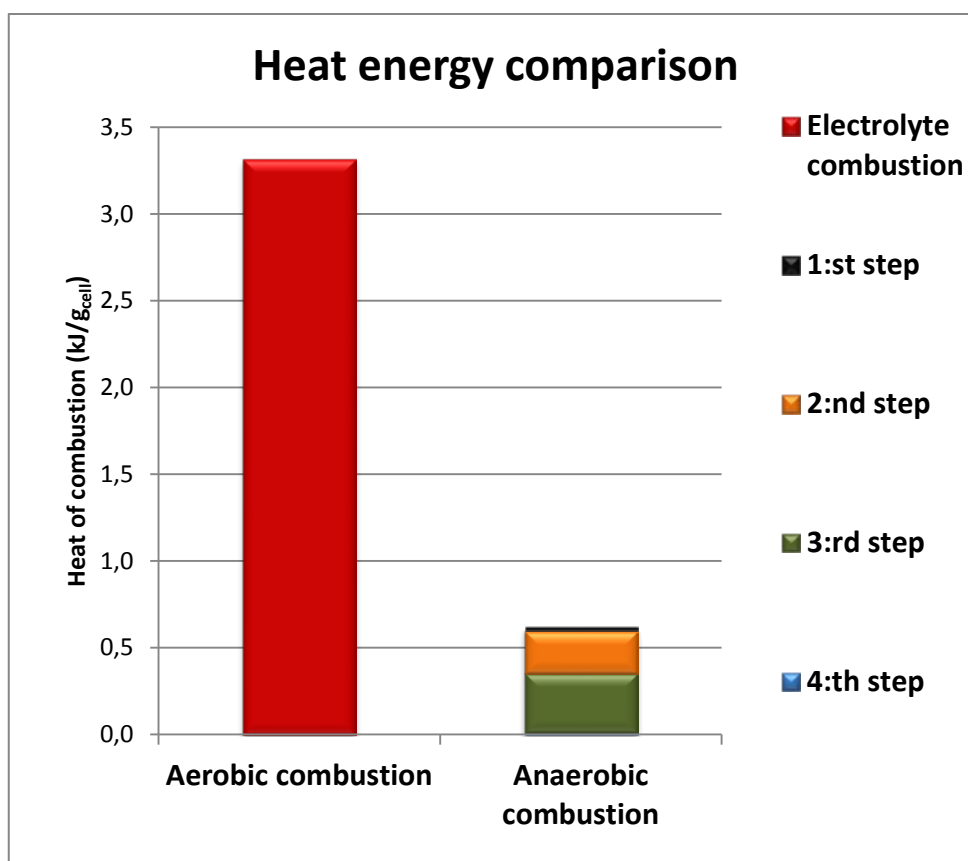
Tabell 4 Sammanställning av kemiska egenskaper hos vanliga elektrolytblandningar (63) (58) (64) © David Sturk

Elektrolyte blandning 1:1 och 1:1:1	Start temp. i luft (°C)	Start temp. i argon (°C)	Reaktionsvärme (ΔH) i luft (J/g)	Reaktionsvärme (ΔH) i argon (J/g)	Aktiveringsenergi i luft (kJ/mol)	Aktiveringsenergi i argon (kJ/mol)	Förbränningsenergi (kJ/g)
1.0 M LiPF ₆ / EC:DEC	177	183	-163.5	-160.0	1015.3	1015.3	-16.5
1.0 M LiPF ₆ / EC:DMC	174	183	-231.2	-227.9	374.2	621.9	-12.5
1.0 M LiPF ₆ / PC:DEC	170	177	-315.4	-312.8	633.3	924.8	
1.0 M LiPF ₆ / PC: DMC	155	170	-320.9	-311.3	188.26	276.4	
1.0 M LiPF ₆ / EC:DMC:DEC		140		-(200-250)			-15.5

Som tidigare nämnt i sektion 3.2.2.1 finns tre huvudtyper av Li-jon batterikemier. Den mest energitäta men också den mest reaktiva har ett katodmaterial (transitionsmetalloxid) som vid upphettning kan frigöra syre inuti cellen vilket då reagerar med cellens elektrolyt medan värme frigörs, d.v.s. termisk rusning (engelska Thermal Runaway).

Figur 33 visar hur mycket värme som kan genereras under termisk rusning inuti en Li-jon cell med katodmaterial utav transitionsmetalloxid, respektive värmen som kan genereras ifall detta batteris elektrolyt får brinna med tillgång till luft.

Denna teoretiskt beräknade jämförelse visar hur mycket mer värmeenergi som kan frigöras av att elektrolyten brinner med tillgång till luft, än då termisk rusning sker inuti en battericell med obruten behållare. Detta påvisar hur viktigt det är att undvika att batteriets elektrolyt får god tillgång till luftens syre.

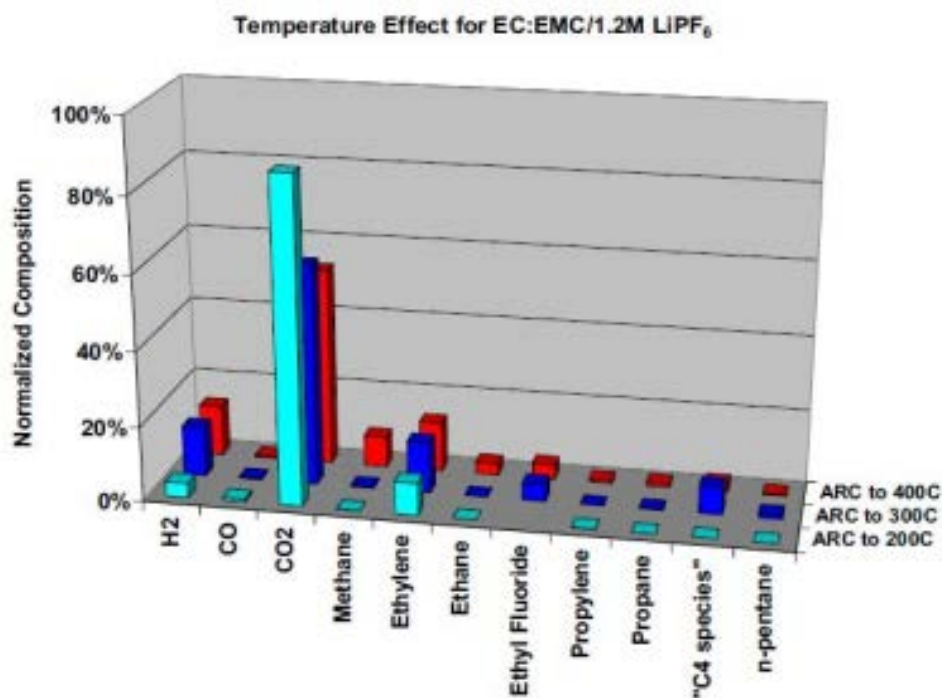


Figur 33 Studie av ett batteri med katodmaterial utav transitionsmetalloxid. Jämförelse mellan mängden värme energi (kJ/g_{cell}) som kan frigöras teoretiskt från en fullständig termisk rusning och en fullständig förbränning av batteriets elektrolyt baserat på innehållet i 1g battericell. (65), (62) © David Sturk

3.2.2.4 Gaser som kan frigöras från ett skadat Li-jon batteri

I en forskningsstudie från 2006 där en typisk elektrolytblandning utsattes för gradvis ökande temperatur för att slutligen antändas frigjordes de gaser som presenteras i Figur 34. Eftersom blandningen till största delen består av de kolväten som presenterades i

Tabell 3 så var det gasen koldioxid som nådde högst koncentrationer. Även vätgas, etylen och kolmonoxid är exempel på välkända gaser som kunde påvisas i denna studie.



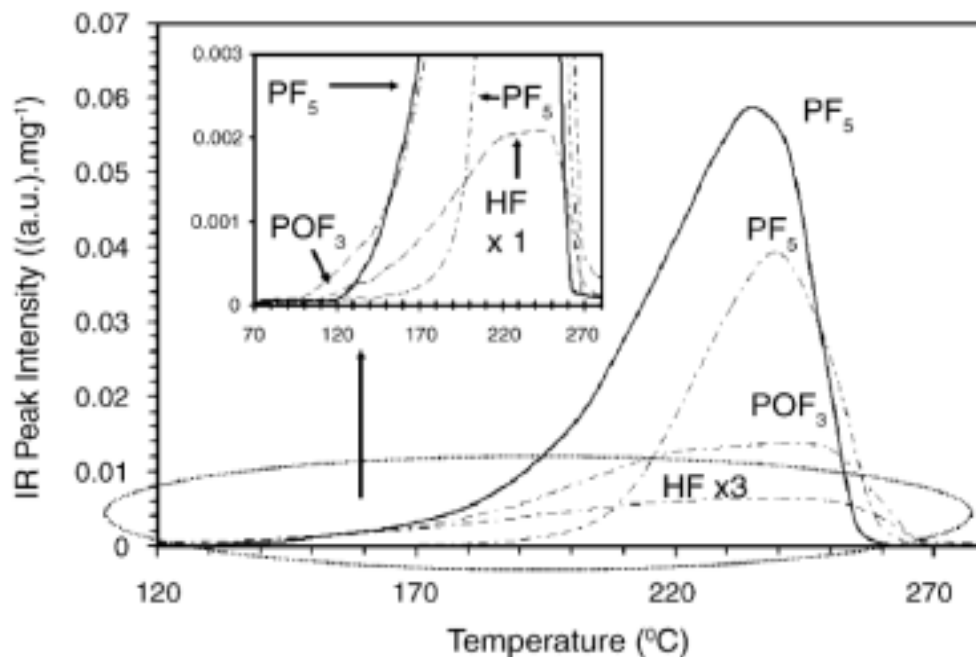
Figur 34 Gaser producerade vid extrem upphettning och förbränning av en typisk elektrolytblandning (53)

Hälsoriskerna med de gaser som frigörs behandlas i stycket 4.3 *Gaser ventilerade ur Li-jon batteri vid haveri*, men redan här kan påpekas att vid ett batterihaveri med brand så är det framförallt förbränningsgaser som bildas såsom kolmonoxid, koldioxid och kortare kolkedjor likt metan och etan då elektrolyten brinner upp. Förekomsten av främmande gaser, såsom det mycket giftiga vätefluorid, förekommer på betydligt lägre nivåer men har å andra sidan betydligt lägre toleransgränser för hälsoeffekter.

Lite om vätefluorid är att det bildas då elektrolytsaltet (LiPF₆) bryts ner vid upphettning. Starttemperaturen för detta varierar något beroende av framförallt fukthalten i dess omgivning. För enkelhetens skull kan vi betrakta två miljöer och de start temperaturer som där finns:

1. Fuktfri miljö – Inuti en försluten Li-jon battericellsbehållare är starttemperaturen 107°C
2. Normalfuktig miljö – Med en öppen behållare och tillgång till luft är temperaturen 87°C

Det är dock inte förrän elektrolyten utsätts för temperaturer mellan 170°C och 250°C som genereringen av vätefluorid (HF) och fosfor pentafluorid (PF₅) är som mest driven.



Figur 35 Generering av gaser från nedbrytningsprocessen av elektrolytsaltet (LiPF_6). Den heldragna linjen visar produktionsprofilen för PF_5 då saltet bryts ner i en fuktfri miljö. I sådan miljö kan PF_5 inte fortsätta processen och brytas ner till HF varför ingen heldragen linje för HF presenteras. De streckade linjerna är produktionsprofilerna från alla de tre ämnena som kan förekomma under nedbrytningsprocessen av saltet. (63)

En ingående studie av det aktuella elektrolytsaltets reaktionsmekanismer under nedbrytningsprocessen har identifierat följande flerstegsprocess:

1. **$\text{LiPF}_6 \rightarrow \text{LiF (solid)} + \text{PF}_5 \text{ (gas)}$**
Denna reaktion startar vid temperaturen $\sim 107^\circ\text{C}$ i närmast fuktfri ($< 10\text{ppm}$ water) inert atmosfär.
2. **$\text{LiPF}_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiF (solid)} + \text{PF}_5 \text{ (gas)} + \text{HF (gas)}$**
Denna reaktion startar vid temperaturen $\sim 87^\circ\text{C}$ i normalfuktig eller torr miljö (300ppm)
3. **$\text{PF}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{POF}_3 \text{ (gas)} + 2\text{HF (gas)}$**
Ifuktig eller torr (men ej fuktfri) miljö finns tillräckligt med vatten för att den extremt reaktiva gasen PF_5 ska reagera med vatten för att bilda POF_3 och vätefluorid. Denna reaktion sker troligen samtidigt som reaktion 2 och konsumerar denne reaktions produkt PF_5 . (63), (66)

Enligt dessa reaktionssteg genereras 3 molekyler HF för varje salt molekyl som bryts ner.

Utöver dessa tre grundläggande reaktionsmekanismer så finns också förslag på ett fjärde och avslutande reaktionssteg som tillför ytterligare två vätefluoride molekyler:

4. **$\text{POF}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{POF}_2 \text{ (OH)} \text{ (gas)} + 2\text{HF (gas)}$; (67)**

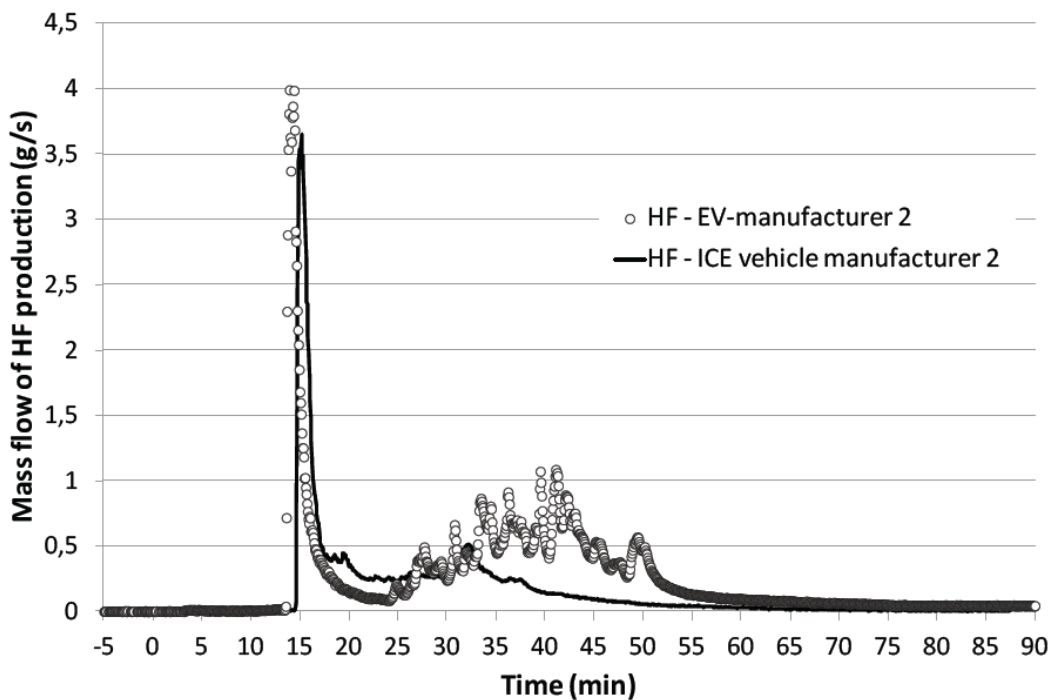
Dessa kemiska reaktionsformler (1-4) tydliggör hur intimt kopplad förekomsten av vätefluorid är till det salt (LiPF_6) som vanligtvis finns i elektrolyten i kommersiella Li-jon batterier idag.

Det är extremt viktigt att Li-jon celler tillverkas i extraordinärt ren miljö. Forskning på celler förvarade vid 85°C i mellan 30 min och 72 timmar visar att även små mängder orenheter såsom vattenmolekyler inuti cell påskyndar nedbrytning av elektrolytsaltet. Som motåtgärd föreslås att vid tillverkning av celler tillsätts till elektrolyten additiva medel som eliminerar eventuell förekomst av vattenmolekyler. (68)

Då dessa gaser frigörs från skadade Li-jon battericeller utsätts omgivningen för mycket hälsofarliga och reaktiva gaser. Hur stora är då riskerna för att dessa gaser frigörs från brinnande batteri i e-fordon i jämförelse mot brand i vanligt fordon som drivs på konventionellt bränsle?

Sådan jämförelse har utförts av en fransk forskargrupp och deras resultat presenterades under FIVE (Fire In Vehicle) konferensen i Chicago, 2012 – ett forskarlag från franska INERIS (National Institute of Industrial Environmental and Risks)

Rapporten från INERIS beskriver hur de genomfört fullskaliga brandprover på fordon från två franska fordonstillverkare (dvs. franska OEM). Från vardera OEM användes en fullt laddad elbil och en fulltankad bil med förbränningsmotor. Under provet analyserades de frigjorda gasernas komposition och den värme som fordonet genererade i branden. Rapportförfattarna visar att vid omkring 25-30 minuter brand tar batteriet eld och börjar bidra till generering av värme och gaser. De presenterar en slutsats om att den värme som frigörs från de e-fordon som de brandtestat är i samma storleksordning som de konventionella fordonen som testades. En tydlig skillnad menar de syns i jämförelsen av mängd HF som frigjorts från de båda fordonstyperna där e-fordonen genererar totalt 1 470 respektive 1 540 gram HF medan det konventionella fordonen genererar 621 respektive 813 gram. I graferna kan utläsas att tillskottet HF ökar tydligt efter 25 minuter då batteriet förmodas brinna av egen kraft (se Figur 36 Jämförelse av HF produktion vs. tid för EV och jämförbart ICE fordon Figur 36). (69)



Figur 36 Jämförelse av HF produktion vs. tid för EV och jämförbart ICE fordon (69)

Rapporten från INERIS ger ingen information om vilken typ av Li-jon batterikemi som brunnit. Som presenteras i stycket 3.2.2.1 *Reaktiva material inuti cellen* och 3.2.2.3 *Elektrolytens teoretiska brännbarhet och förbränningsvärme* finns flertal val av aktiva material (t.ex. katodmaterial och elektrolytlösningsmedel) samt möjliga additiva tillsatssämnen som kan stärka stabiliteten hos aktiva material och därmed minska generering av värmeeffekt och -energi samt även mängderna toxiska gaser. (54)

4 Hälsoror

4.1 Hälsoror orsakade mekaniskt

Rädsla hos räddningstjänst är att fordonet "löper amok" och börjar rulla själv under själva insatsen. Se först till att "tändningsnyckel" är borttagen och "tändningsläget" avstängd därefter ska bilen säkras och när så är möjligt se till att 12 V batteriet blir bortkopplat. Vid bortkoppling av detta 12 volts batteri förhindras att traktionsbatteriets kontakter kan distribuera elenergi till drivsystemet och därmed förhindras att systemet kan "löpa amok" självt.

I dagens fordon kan 12 Volts startbatteriet vara placerat på olika ställen, vanligen finns ett startbatteri i motorrummet men det har blivit vanligare att fordonstillverkarna placerar bly/syra batteriet i bagage utrymmet under en täckskena. Toyota Prius modell två som kom 2003 har sitt batteri placerat i höger "hjulhus balja" bak i kofferten.

4.2 Hälsoror orsakade elektricitet och spänning

Redan vid en ström strax över 10 mA genom kroppen uppträder kramp och det kan vara svårt att släppa taget om man har greppat ett strömförande föremål.

För att detta ska ske krävs en sluten krets där en kroppsdel är i kontakt med konduktiv del kopplad till kretsen samt att en annan kroppsdel berör en högre spänningspotential till den första konduktiva delen med andra ord ett annat spänningsförande föremål med t.ex. sin hand.

e-fordon har ett friflytande traktionssystem varför denna situation ej kan förekomma eftersom det med svårighet går att uppfylla en sluten krets med e-fordons traktionssystem.

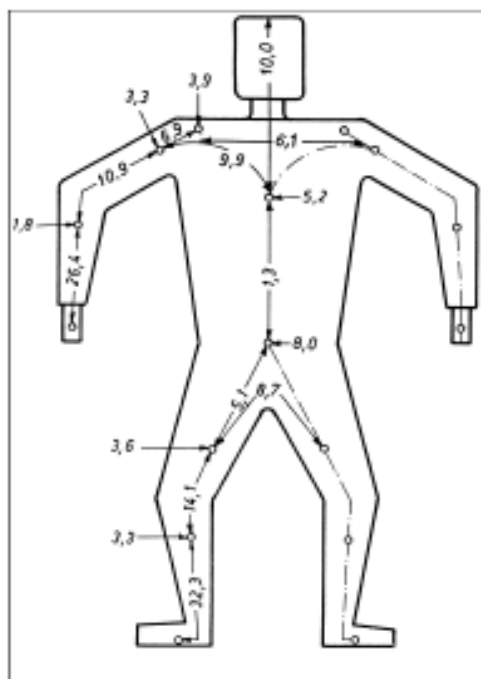
Dock ska försiktighet vidtagas då ett e-fordon står ansluten till ett vägguttag för laddning, då är risken som störst eftersom vårt kraftnät inte är flytande utan har systemets nollpunkt anslutet till jord.

Därför bör alltid en laddningskabel mellan nät och e-fordon kopplas bort från nätuttaget innan insats utförs.

För att säkerställa att ingen blir spänningssatt i en elektrisk krets ska inga orange färgade kablar över huvudet taget klippas.

I sektionen 3.1.3.5 *Kraftelektroniken* beskrivs fenomenet kommuteringskapacitans vilket är en riskfaktor upp till 5 minuter efter krock. Som nämnts uppkommer detta fenomen av att kondensatorbatterier som förser kraftelektronik i batteripaket med energi successivt urladdas under 5 minuter eller mindre. Dess spänning ligger därefter vanligen under 60 Volt. Som tidigare nämnt är att en spänning under 60 V likström (dc) klassas som lågspänning³. Även en spänning kring 60 Vdc kan ge en kraftig stöt vid strömgenomgång men hos dess kondensatorbatterier är energiinnehållet lågt och spänningen faller normalt inom någon sekund till nivå under 60 Vdc vid sådan beröring.

³ Spänning under 25 V växelström (ac) klassas som lågspänning.



The numbers indicate the percentage of the internal impedance of the human body for the part of the body concerned, in relation to the path hand to foot.

NOTE - In order to calculate the total body impedance Z , for a given current path, the internal partial impedances Z_p for all parts of the body of the current path have to be added as well as the impedances of the skin of the surface areas of contact.

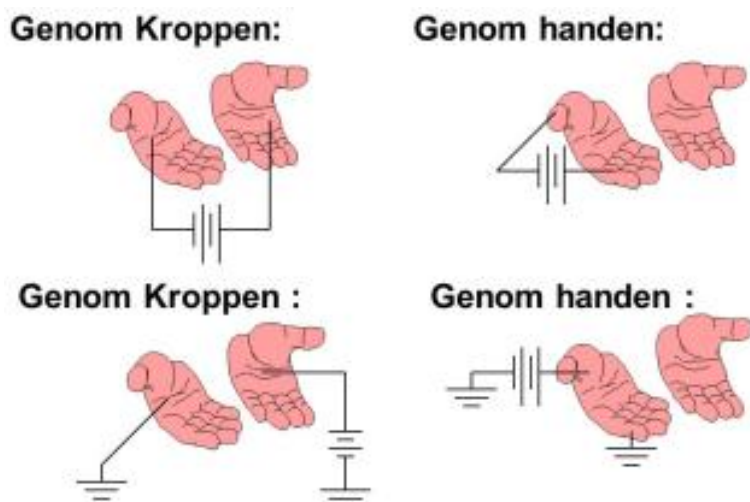
Figur 37 Strömmens väg genom kroppen (70)

Kroppsimpedansen är vårt skydd mot elchock

Beror bl.a. på:

- Strömmens väg
- Beröringsspänning
- Strömmens varaktighet
- Frekvens
- Hudens fuktighetsgrad
- Kontaktytans area
- Pålagt tryck
- Temperatur

Strömmens väg genom kroppen avgör vilken skada den åsamkar i hög grad, att driva en ström som passerar hjärtraktén, t.ex. ifrån vänster till höger hand är betydligt farligare än en strömgenomgång mellan höger hand till höger ben. Omständigheterna kring påverkar högst avsevärt som t.ex. kontaktytans area, svettning, temperatur, salthalt o.s.v.



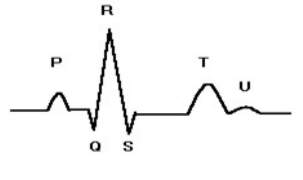
Figur 38 Förutsättningarna för strömgenomgång genom händerna (37)

Generellt är vi mer tåligare mot DC strömmar med tanke på hjärtkammerflimmer men DC-strömmar har en förrädisk effekt som AC-strömmar (Tabell 5 Tabell 5 Strömrisker och dess effekter och konsekvens (70) inte påverkar på samma sätt.

DC-strömmar skapar värme som kan leda till kallbrand, det viktiga är att en patient som är utsatt för strömgenomgång alltid bör uppsöka läkarvård p.g.a. dels EKG mätning på hjärtfrekvensen och ev. blodförtunnande för att motverka kallbrand.

En kraftig uppvärmning av kroppsdelar kan koagulera blodet i små ytliga kärl samt bränna nervbanor och dess synapser (nervernas kopplingsdon).

Tabell 5 Strömrisker och dess effekter och konsekvens (70)

Risk	Ström (AC)	Effekt
Normalt ofarligt	< 0,5 mA 1-8 mA	Under känseltröskeln Kännbar stöt, det går att släppa taget
Farligt 	8-15 mA	Smärtsam stöt, det går att släppa taget.
	15-20 mA	Smärtsam stöt, det går inte att släppa taget. Hjärtkammerflimmer kan inträffa, kvävningsrisk.
	50-100 mA	Hjärtkammerflimmer inträffar.
	100-200 mA	Brännskador, svåra kramper – bröstmusklerna stoppar hjärtat.
	> 200 mA	

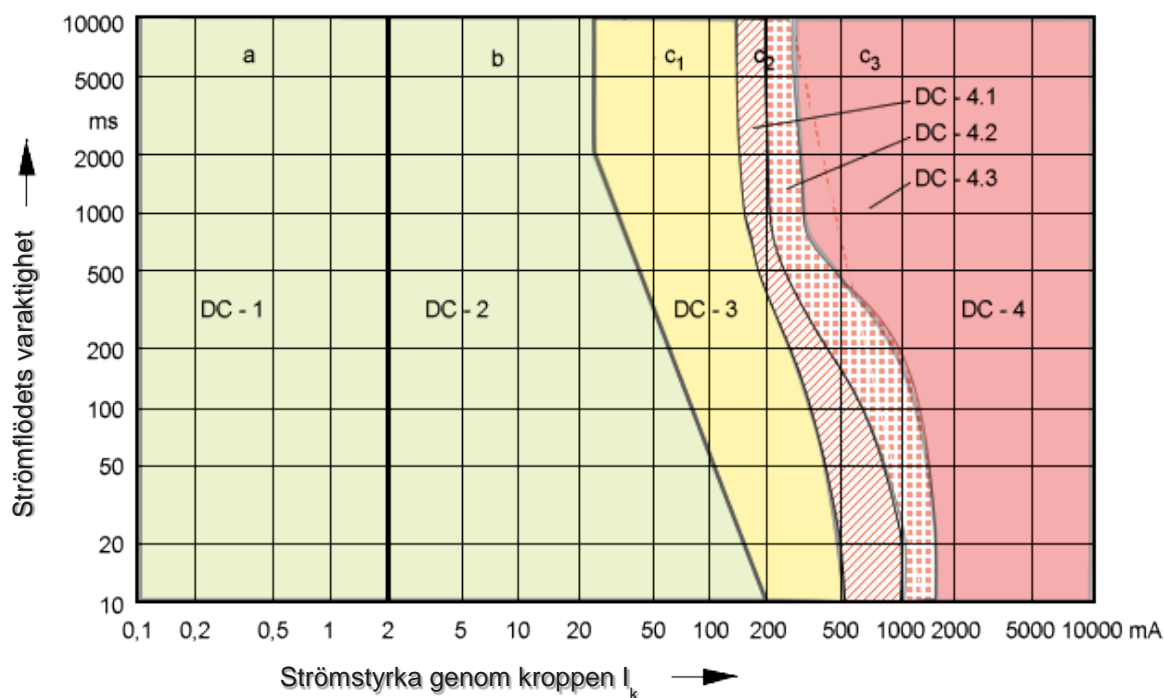
Elens påverkan på kroppens funktion styrs av två faktorer, strömmens storlek och tiden då strömmen leds genom kroppen.

Strömmens storlek avgörs av den pålagda spänningen storlek, eftersom vår kropp inte har konstant resistans utan vår inre resistans minskar påtagligt med ansluten spänningsnivå.

Dessutom skiljer det högst avsevärt mellan individer vilken inre resistans som vi har och vi ska helst hålla oss under 10 mA växelström och under 25 mA likström för att säkerställa att inte ohälsa ska uppstå.

Figur 39 beskriver förhållandet mellan strömflödets varaktighet och storleken på den ström som passerar genom kroppen. Konsekvenserna av strömgenomgång beskrivs i figuren med fyra typer av riskområden:

- DC-1 Innebär att en organisk kropp kan utsättas för given ström och tid utan att känna något.
- DC-2 Här börjar känseltröskeln och det kan vara farligt att befinna sig inom detta område.
- DC-3 Risk för kramper och svårt att släppa taget, kan leda till död.
- DC-4 Stor risk för hjärtkammarrflimmer och omedelbar död.



Figur 39 Strömflödets varaktighet vs. Strömstyrka genom kropp – Riskzoner kategoriserade från DC-1 till DC-4 (70)

Många frågor kring elektricitet och spänning hos e-fordon har utkristalliserat sig efter samtal med några av landets räddningstjänster. MSB tillhandahåller en lista på frekvent ställda frågor eller FAQ (Frequently Asked Questions) dokument. Denna återfinns på <https://www.msb.se/raddningskedjan>

4.3 Gaser ventilerade ur Li-jon batteri vid haveri

En batterileverantör behöver tillhandahålla sina kunder så kallade ”Material Safety Data Sheet” (MSDS). I ett sådant har en europeisk batteripacksleverantör lyft fram de kemikalier och gaser som presenteras i Tabell 6.

Tabell 6 Lista över gaser och ångor som enligt en europeisk batteripacksleverantör kan genereras ifall batterier ventilerar och/eller brinner (71)

Kemikalier	Kemisk formel	CAS#	DOT Hazard class	Lukt/Färg	Risk gradering	Toxicitet	Smält/Kokpunkt (°C)	Brand klass	Själv-antändningspunkt (°C)
Vätgas	H ₂	1333-74-0	2.1	Luktlös/färglös	Mycket brandfarligt	Ej giftigt	-259 / -253	C	560
Kolmonoxid	CO	630-08-0	2.1	Luktlös/färglös	Mycket brandfarligt	Kraftfullt blodgift	-205 / -191	C	605
Koldioxid	CO ₂	124-38-9	2.2	Luktlös/färglös	Risk för kvävning ifall höga koncentrationer	Ej giftigt	-79 / -59	n/a	n/a
Metan	CH ₄	74-82-8	2.1	Luktlös/färglös	Mycket brandfarligt	Ej giftigt	-182 / -161	C	595
Vätefluorid	HF	7664-39-3	8	Stickande/färglös	Ej brandfarligt	Mycket giftigt; frätande	-83 / 19	n/a	n/a
Fosfor pentafluorid	PF ₅	7647-19-0	2.3	Stickande/färglös	Ej brandfarligt	Mycket giftigt; frätande	-93.8 / -84.6	n/a	n/a
Alkyd karbonater (Elektrolyt ångor)	LiPF ₆ / EC / EMC	21324-40-3 / 623-53-0 / 96-49-1	3	Liknande nagellack och/eller eter/färglös	Mycket brandfarligt		n/a	BC	>300

4.3.1 Vätgas

Vätgas är en lukt- och färglös gas som inte är giftig men dock mycket brandfarlig. Denna kan genereras i samband med batterihaveri ifall strömladdning sker genom vatten på så sätt att vattnet spjälkas upp i rent syre och ren vätgas genom en process som kallas elektrolys. Kopplingen mellan batterier, vatten, elektrolys och vätgas är framförallt tydlig för batterier med vattenbaserad elektrolyt, t.ex. blybatterier vilka detta kan resultera i fenomenet knallgas.

Vätgas kan också genereras som biprodukt från sönderfall av kol-väte kedjor såsom de lösningsmedel som elektrolyten är uppbyggd av. Hettan från en angränsande brand kan frigöra vätgas. Under förutsättning att denna gas inte också antänds av den angränsande branden så finns risk att den ackumuleras eller möjlighet att den ventileras ut i fria luften.

Om god ventilation ombesörjs är det svårt att i öppen miljö (t.ex. en vid en trafikskadehändelse) uppnå sådan vätgas koncentrationer (över 4% för brännbarhetsområde, över 18,3% för explosion) och som i Tabell 7 presenteras i jämförelse med bensinångor och naturgas.

Tabell 7 Vätgas brännbarhetsområde (i luft), explosions gräns (i luft), nödvändig energi för åstadkomma antändning (mJ), flamtemperatur i luft, och stökiometrisk blandning. En jämförelse mot motsvarande egenskaper hos bensinångor och naturgas. (72)

	Hydrogen	Gasoline Vapor	Natural Gas
Flammability Limits (in air)	4-74%	1,4-7,6%	5,3-15%
Explosion Limits (in air)	18,3-59,0%	1,1-3,3%	5,7-14%
Ignition Energy (mJ)	0,02	0,20	0,29
Flame Temp. in air (°C)	2045	2197	1875
Stoichiometric Mixture (most easily ignited in air)	29%	2%	9%

4.3.2 Kolmonoxid

Kolmonoxid genereras av ofullständig förbränning av organiska material och kan nå hälsofarliga nivåer om god ventilation inte ombesörjes. Gasen är lukt och färglös varför kännedom om förgiftningssymptom och rimliga omständigheter kring dess förekomst är viktigt.

För att få grepp om vilka koncentrationsnivåer som man kan möta i vardagen visar Tabell 8 ett mindre urval av nivåer med relaterade källor. Lägg märke till att brandrök from en öppen eldstad är mycket ohälsosamma och nödvändigtvis placeras där god ventilation finns.

Tabell 8 Tabell över CO koncentrationsnivåer och exempel på källor till dessa (73)

Koncentration	Källa
0,1 ppm	Naturlig nivå i atmosfären (MOPITT ⁴) (74) (75)
0,5 till 5 ppm	Medelnivå inomhus (76)
5 till 15 ppm	I närhet till korrekt installerad gasspis (76)
100 till 200 ppm	CO nivåer i Mexico City orsakade av fordonsavgaser (73)
5 000 ppm	Brandrök från öppen eldstad (77)
7 000 ppm	Outspädda varma fordonsavgaser utan katalysator (77)

Dess takgränsvärde⁵, enligt AFS (Svenska Arbetsmiljöverkets Författningssamling) ”Hygieniska gränsvärden”, är 100 ppm. (78) I

Tabell 9 presenterar en översyn över koncentrations nivåer och motsvarande hälsosymptom.

Tabell 9 Tabell över CO koncentrationsnivåer och motsvarande hälsosymptom (73) (79) (80)

Koncentration	Symptom
35 ppm (0,0035%)	Lätt huvudvärk och yrsel inom sex till åtta timmar under kontinuerlig exponering
100 ppm (0,01%)	Mild huvudvärk inom två till tre timmar
200 ppm (0,02%)	Mild huvudvärk inom två till tre timmar; försämrad klarhet och omdöme
400 ppm (0,04%)	Huvudvärk i främre huvudet inom en till två timmar
800 ppm (0,08%)	Kraftig yrsel, kräkillamående och krampanfall inom 45 min; känslöbortfall inom 2 tim
1 600 ppm (0,16%)	Huvudvärk, tachycardia (förhöjd hjärt puls) och kräkillamående inom 20 min; livsfarligt vid exponering kring 2 timmar

⁴ Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT)

⁵ Hygieniskt gränsvärde för exponering under en referensperiod av 15 minuter beräknat som medelnivån ppm över tidsperioden. För ammoniak, monoisocyanater och diisocyanater gäller referensperioden 5 minuter.

3 200 ppm (0,32%)	Huvudvärk, yrsel och kräkillamående inom fem till tio minuter; livsfarligt kring 30 min
6 400 ppm (0,64%)	Huvudvärk och yrsel vid en till två minuter; Krampanfall, andningssvårighet och dödligt inom mindre än 20 minuter
12 800 ppm (1,28%)	Medvetslöshet efter 2-3 inandningar; dödligt inom mindre än tre minuter

Såsom presenterades med hjälp av Figur 34 så är kolmonoxid den gas som frigörs i högst koncentrationer i händelse av en brand i ett Li-jon batteri. Ur perspektivet ”mängd” så kan kolmonoxid betraktas som den källa till giftighet som mest troligt uppkommer i farliga mängder.

4.3.3 Koldioxid

Jordens atmosfär innehåller mellan 350 och 450 ppm koldioxid och den vanliga källan för koldioxid i naturen är utandningsluft från djur. Därtill genereras koldioxid vid syrerik förbränning av organiska material till skillnad från kolmonoxid, men dock är en viktig likhet att gasen är lukt och färglös.

Koldioxid är betydligt mindre giftig än kolmonoxid och har ett takgränsvärde (enligt AFS) på 10 000 ppm för 15 minuters exponering. Förekomsten av koldioxid i olika miljöer beskrivs i Tabell 10 där högsta referenskoncentrationen är den för mänskligt utandningsluft, 38 000 ppm. Med insikt om att utandningsluften har så hög koldioxidhalt är det enkelt att förstå hur hyperventilering kan upplevas som obehagligt.

Koldioxid är inte giftigt men kan användas som tydlig och tidig indikator på brand.

Tabell 10 Tabell över CO₂ koncentrationsnivåer och exempel på situationer där nivåerna kan gälla (78) (81)

Koncentration	Förekomst
350 till 450 ppm	Vanlig utomhuskoncentration
400 till 1 200 ppm	Variationsspann av koldioxidhalt inomhus
800 ppm	Ett gränsvärde som det svenska företaget Ericsson föreslår som maxnivå för sina lokaler. Tungt industrialiserade eller förorenade områden kan periodvis ha en halt på upp till 800 ppm.
1 000 ppm	Enligt den amerikanska standarden ASHRAE 62-1989 är denna koldioxidnivå den maximalt rekommenderade i ett rum. Den motsvarar ett luftflöde (ett behov av friskluft) på ca 7 liter per sekund och person.
2 000 ppm	Enligt många undersökningar medför denna koldioxidnivå en anmärkningsvärd ökning i känslan av trötthet, dåsigheit, huvudvärk och allmän obehämlighet
5 000 ppm	Nivågränsvärde ⁶ enligt Arbetsmiljöverket
10 000 ppm	Takgränsvärde enligt Arbetsmiljöverket
38 000 ppm	Koldioxidnivå i utandningsluft

⁶ Hygieniskt gränsvärde för exponering under en arbetsdag, normalt 8 timmar (77)

Tabell 11 Tabell över CO₂ koncentrationnivåer och symptom vid exponering för dessa nivåer (81)

Koncentration	Symptom
350 till 450 ppm	Vanlig utomhuskoncentration – ingen hälsorisk
1 000 ppm	Rekommenderad maximalnivå inomhus – mindre hälsoeffekter
5 000 ppm	Nivågränsvärde enligt Arbetsmiljöverket – risk hälsoeffekter såsom yrsel och huvudvärk
15 000 ppm	Andningssvårigheter och ökad hjärtverksamhet
30 000 ppm	Muskelsmärta, medvetslöshet, kramper och dödsrisk
80 000 ppm	Kramper, omedelbar förlamning och död

4.3.4 Metan

Metan är en brännbar gas som är lättare än luft vid förhållanden av atmosfärstryck och utomhustemperaturer vanliga för människor och däröver. Metan har ett brännbarhetsområde som ligger mellan 5-15% koncentration i luft. (82) Metan utvinns ur naturgas men saknar både färg och lukt till skillnad från naturgas. Sådan lukt som associeras till t.ex. gasol och naturgas kan tillsättas luktlösa gaser såsom metan av säkerhetsskäl men man ska vara medveten om att ren metan är lukt- och färglös.

Metan är inte giftigt (har inte något OSHA PEL Standard) men kan orsaka andningssvårigheter ifall dess förekomst orsakar att syrehalten i luften minskar.

Dess explosionsområde ligger mellan 5% och 15% blandning i luft. Enligt rapporter kan blandningar kring 9% orsaka de mest våldsamma explosionerna. (83)

Med god ventilation på en trafikskadeplats där risk finns för metanutsläpp motverkas risken för att gasen ackumulerar till vådliga nivåer.

4.3.5 Vätefluorid

I Tabell 6 anges en rad gaser som är aktuella vid händelse av gasventilering från ett Li-jon batteri. Vätefluorid har angivits DOT Hazard class 8 vilket betyder att anger att det är en korrosiv substans som kan upplösa organisk vävnad och även kraftfullt korrodera vissa metaller.

Vätefluorid kan orsaka omedelbar eller fördröjd lungödem ifall hos en person som utsätts för kring en timmes exponering. (84) Därtill kan exponering för höga koncentrationer av ångor av vätefluoridsyra resultera i typiska drag av Ulcerative Tracheobronchitis⁷ (även kallat Kennel Cough) och Hemorrhagic Pulmonary Edema⁸. (85)

Baserat på data från olycksfall, yrkesmässig och frivillig exponering mot vätefluorid har forskare uppskattat den lägsta dödliga koncentrationen vid 5 minuters exponering mot människa till att ligga inom spannet 50 till 250 ppm. Gasens takgränsvärde är 2 ppm (78) och Amerikanska National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) anger att ”upper limit exposure” ligger på 3 ppm (2,6 mg/m³) i medeltal under 15 minuters exponering. (86)

⁷ Sårig inflammation i de övre luftvägarna

⁸ Akut blödning i lungan plus svullnad i luftvägarna

Positivt är att vätefluorid har en tydlig, kraftfullt irriterande och stickande lukt som är påtaglig redan vid 0,042 ppm koncentration i luft. Man bör därför vara vaksam på sådana lukter om man uppehåller sig på en plats där vätefluorid kan förekomma.

Svenska Apoteket AB har publicerat ett dokument med titeln ”Förgiftningar Behandlingsanvisningar och antidotlista” som är ett särtryck ur Läkemedelsboken 2009-2010. (87) I listan på antidoter anges:

- Kalciumglubionat, (”Calcium-Sandoz”, injektionsvätska från Sandoz) för behandling mot fluorider, fluorvätesyra, oxalsyra och oxalater
- Kalciumglukonat (”H-F Antidote Gel”, gel från Ellem Läkemedel) för utvärdes bruk. Licens erfordras.
- Kalciumglukonat, -laktat, (”Calcium-Sandoz”, brustabletter från Sandoz) för behandling av fluorider, fluorvätesyra, oxalsyra och oxalater.

Den amerikanska myndigheten Centers for Disease Control and Prevention (CDC) presenteras dokument som ger guidelines för riskhantering vid exponering av giftiga substanser. (88) På deras hemsida kan man ladda ner dokument om bland annat vätefluorid. (89) Tabell 12 presenterar rekommenderad andningskyddsutrustning vid olika nivåer av HF koncentration:

Tabell 12 Rekommendationer från amerikanska myndigheten U.S. Department of Health and Human Services vid exponering för vätefluorid (HF). Aktuell rapport daterad till September 1978. (89)

Condition	Minium Respiratory Protection ⁹ Required Above 3 ppm HF
Gas or Vapor Concentration 20 ppm or less	A chemical cartridge respirator with a full facepiece and cartridge(s) providing protection against hydrogen fluoride. A gas mask with a chin-style or a front- or back-mounted canister and filter providing protection against hydrogen fluoride. Any supplied-air respirator with a full facepiece, helmet, or hood. Any self-contained breathing apparatus with a full facepiece
Greater than 20 ppm ¹⁰ or entry and escape from unknown concentrations	Self-contained breathing apparatus with a full facepiece operated in pressure-demand or other positive pressure mode. A combination respirator which includes a Type C supplied-air respirator with a full facepiece operated in

⁹ Only NIOSH-approved or MSHA-approved equipment should be used

¹⁰ Use of supplied-air suits may be necessary to prevent skin contract while providing respiratory protection from airborne concentrations of hydrogen fluoride; however, this equipment should be selected, used, and maintained under the immediate supervision of trained personnel. Where supplied-air suits are used above a concentration of 20 ppm, an auxiliary self-contained breathing apparatus operated in positive pressure mode should also be worn.

	pressure-demand or other positive pressure or continuous-flow mode and an auxiliary self-contained breathing apparatus operated in a pressure-demand or other positive pressure mode.
Fire Fighting	Self-contained breathing apparatus with a full facepiece operated in pressure-demand or other positive pressure mode.
Escape	Any gas mask providing protection against hydrogen fluoride. Any escape self-contained breathing apparatus.

4.3.6 Fosforpentafluorid

Fosforpentafluorid (PF₅) är ett mycket reaktivt ämne som vid kontakt med fukt bildar vätefluorid. Figur 35 presenterar hur denna substans kan uppkomma i samband med att Li-jon batterier utsätts för kraftfull upphettning.

Den är färglös och icke brännbar gas men en skarp lukt som vid kontakt med luftens fukt visar upp vit rök i samband med bildandet av vätefluorid.

Som nämnt är PF₅ instabil och reagerar med fukt t.ex. vid kontakt med hud, ögon, andningsvägar och slemhinnor. Liksom vätefluorid är denna substans mycket giftig och ger liknande skador på en människa som exponeras mot alltför stora mängder.

Det amerikanska organet Occupational Safety & Health Administration har satt en Permissible Exposure Limits (OSHA-PEL) gräns på PF₅ vid 8 timmars exponering på 3 ppm som ett viktat medelkoncentration över denna tid. (71)

4.3.7 Elektrolytångor från Li-jon battericeller

Elektrolyter hos Li-jon batterier baseras på organiska lösningsmedel som är brännbara. Såsom presenterades i stycket 3.2.2.3 *Elektrolytens teoretiska brännbarhet och förbränningsvärme* är dessa lösningsmedel vanligen blandningar av en grupp alkydkarbonater. Tabell 3 presenterar de vanligaste lösningsmedlen och deras enskilda egenskaper, medan Tabell 4 presenterar hur dessa egenskaper förändras i och med att lösningsmedlen och salt sammanblandas till elektrolyter.

Lösningsmedlen kan indelas i två grupper:

1. Cykliska molekyler – EC och PC – Kokpunkter kring 240°C och flampunkter 132-160°C
2. Linjära molekyler – DMC, EMC och DEC – Kokpunkter 90-126°C och flampunkter 18-31°C.

En tumregel för dessa lösningsmedel är att de linjära molekylerna är något mer reaktiva medan de cykliska är något mer stabila. Som separata lösningsmedel är skillnaderna i egenskaper tydliga (Tabell 3) vilket illustreras med deras kok- och flampunkter. Deras explosionsgränser och förbränningsenergies är dock snarlika och ligger kring 1.8 till 16.1 % blandning i luft, respektive mellan -13,24 och -22,76 kJ/g, vilket kan jämföras med förbränningsenergin hos diesel på ca. -42 kJ/g (55).

När man studerar dessa ämnens tändnings-egenskaper så använder man ett instrument som kallas ARC (Accelerating Rate Calorimeter) där testobjektet (t.ex. en lösningsmedelsvätska) uppvärms tillräckligt långsamt för att det ska gå att särskilja den punkt i uppvärmningen då testobjektet på grund av omgivande temperatur börjar brinna. I Tabell 3 anges denna Start temp. för enskilda lösningsmedel och i Tabell 4 presenteras

Start temp. för elektrolyter där de enskilda lösningsmedlen blandats tillsammans med saltet LiPF_6 . I dessa båda tabeller illustreras att Start temp. ligger kring, eller en bit över, 100°C för enskilda lösningsmedel medan elektrolyterna har sina Start temp i temperaturspannet mellan 150 och 180°C .

Tabell 4 visar också at aktiveringsenergin för elektrolyterna varierar betydligt från 188kJ/mol till 1015 kJ/mol , vilket innebär att batteritillverkarna kan använda elektrolyter med stor variation i aktiveringsenergi. En "säkrare" elektrolyt har högre aktiveringsenergi men den mindre säkra elektrolyten kanske erbjuder bättre elektriska egenskaper.

För att antända en elektrolyt behövs alltså en tändkälla som kan överföra en termisk energimängd som motsvarar aktiveringsenergin hos elektrolytblandningen. Samtidigt visar studier med ARC att elektrolyters Start temp ligger på mellan 150 och 180°C . Det är således rimligt att förvänta sig att även om elektrolyter är brännbara med förbränningsenergi på mellan $1/3$ och $1/2$ av det som diesel kan leverera så är de dock betydligt svårare att antända.

5 Riskanalys och Händelseträd

Etablerade fordonstillverkare går igenom rigorösa provserier för att kartlägga nya fordons säkerhet. Likväl som för konventionella fordon sker sådana provserier för e-fordon.

En central skillnad är dock att de nya batterisystem och -kemier som fasas in representerar forskning och kunskap som inte är lika väl etablerad och bekanta för industrin, blivande fordonsägare, verkstadstekniker, räddningstjänst och bärgare.

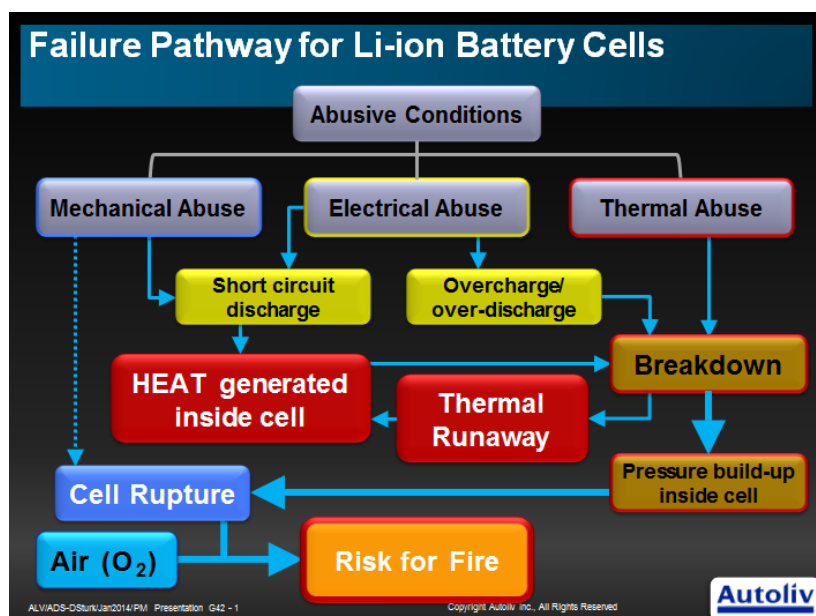
Detta visar på behovet av en riskanalys som kartläggare alla händelser som påtänks kunna ske vid ett batterihaveri – sannorlika likväl som osannorlika – och hur dessa händelser kan vara kopplade till varandra.

I inledningen av denna rapport påpekas att dess syfte är att belysa sådana händelser som har omtalats under e-fordons introduktion i samhället under de senaste åren. Huruvida dessa händelser är sannorlika, sällsynta eller osannorlika betraktas endast hypotetiskt eftersom denna rapport lutar sig mot en omvärldsanalys av befintlig forskning, publikationer, state of art, och erfarenheter kring elsystem, batterikemi, och de e-fordon som hittills nått marknaden. Under projektet Räddningskedjans arbete kommer provning utföras på batterisystem för att utvärdera de risker som omnämns i denna rapport och resultaten och slutsatserna sammanställs i en avslutande rapport vid projektets avslut.

5.1 Hypotetiskt scenario med kritiskt haveri av battericell

Såsom illustreras i Figur 40 kan alla tre grundtyper av våld – mekaniskt, elektriskt, och termisk – resultera i att battericellens inre bryts sönder och gastrycket bygger upp inuti cellen. För att förhindra att cellens ska bli en tryckbehållare med hög sprängkraft är cellen utrustad med dedikerade ventileringsmekanismer eller försvagningar i sin struktur såsom beskrivits i sektion 3.1.1 ”Battericellens uppbyggnad”.

Ventileringen av cellens gaser förhindrar att sprängkraft byggs upp, men leder i sin tur att de brandfarliga organiska elektrolytångorna frigörs till omgivningen. Miljön i cellens omgivning avgör risken för att dessa gaser ska kunna orsaka brand.



Figur 40 Då en battericell går sönder kan detta ske genom tre huvudgrupper av våld (eller åverkan) – Mekanisk åverkan; Elektrisk åverkan; Termisk åverkan. Dessa är ofta kopplade till varandra och kan leda till att gaser frigörs från battericellerna med påföljande risk för brand och/eller explosion (90) © David Sturk

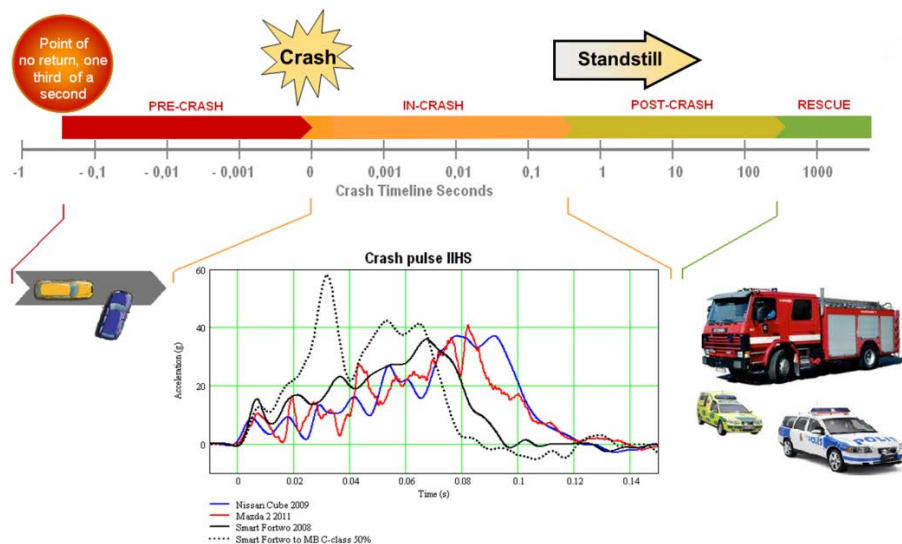
Låt oss utgå ifrån den enskilda Li-jon battericellen då den t.ex. utsätts för mekaniskt våld för att beskriva ett hypotetiskt händelseförlopp:

- En krock skadar batteriet så allvarligt att några celler upplever både kortslutning både inuti cellerna och utanför cellerna men inuti batteripacket.
- Kortslutningsströmmar rusar genom enskilda celler och genom batteripacket och hettar upp dessa så att de når starttemperaturen för termisk rusning.
- Då termisk rusning inträder ökar hettan hos drabbade celler exponentiellt under någon enstaka sekund till flera hundra grader.
- Hettan och den termiska rusningen frigör så mycket gas inuti de cellerna att de brister.
- Brännbara elektrolytångor frigörs tillsammans med andra mer eller mindre hälsoskadliga gaser som producerats under haveriets gång.
- Ifall gaserna uppnår "ideal blandning" och finner en tändkälla med tillräcklig energi så kan gaserna ta eld och det finns risk för att battericellen exploderar.
- Omgivande celler drabbas av hettan från de havererade battericellerna och riskerar att också starta termisk rusning.
- Ett kritiskt batterihaveri är nu ett faktum där brand i fordonsbatteriet riskerar skada bilen och i värsta fall även dess passagerare. Förutom själva branden finns också risk för personskador orsakade av brandröken.
- I detta läge är det viktigt att passagerare avlägsnas snarast från fordonet och att batteriet avkyls till en temperatur där termisk rusning i ytterligare batterier förhindras och att pågående brand trycks ner.

5.2 De tre faserna vid kollision

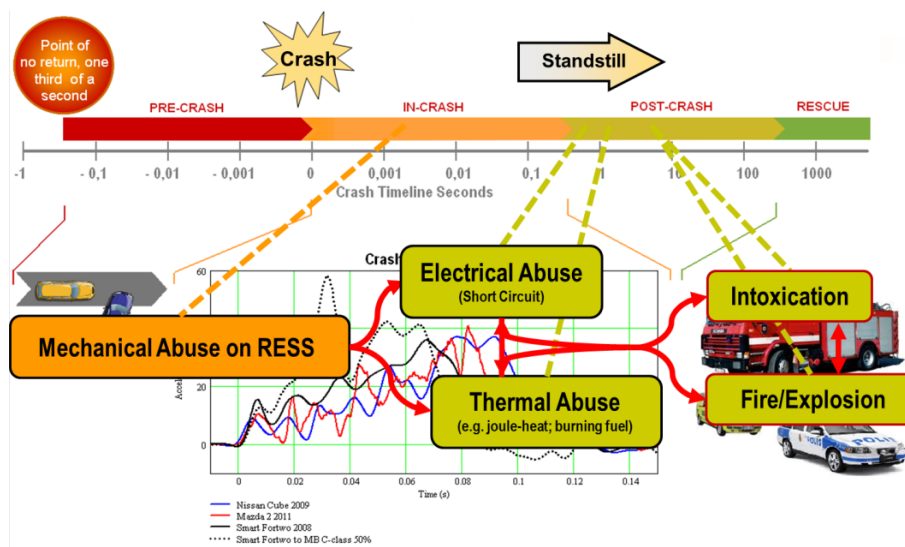
Potentiella haverihändelser i samband med e-fordonskollision och hur dessa händelser är kopplade till varandra presenteras här nedan i form av ett ”Händelsesträd” där avstamp görs från ett kollisionsscenario bestående av tre faser efter kollisionstillfället (se Figur 41):

1. In-Crash
2. Post-Crash
3. Rescue



Figur 41 Händelseförlopp då en kollision med fordon sker (obs - logaritmisktidsskala). Tiden är angiven i logaritmisk skala och In-Crash fasen är över efter cirka 0,1-0,2 ms, medan Post-Crash fasen pågår från stunden då fordonet står stilla och fram till räddningstjänst anländer till platsen för olyckan. Rescue fasen pågår tills skadade trafikanter avlägsnats från olycksplatsen. © David Sturk

I Figur 40 presenterades de tre huvudgrupperna av typvåld som kan påverka en enskild battericell att hamna i termisk rusning – Mekaniskt, Elektriskt, och Termiskt våld. I aktuell riskanalys behandlas dessa tre typer av våld utifrån att de mest troligt sker inom tiden för de två första faserna under kollisionförloppet och tiden direkt efter – In-Crash och Post-Crash (Figur 42).

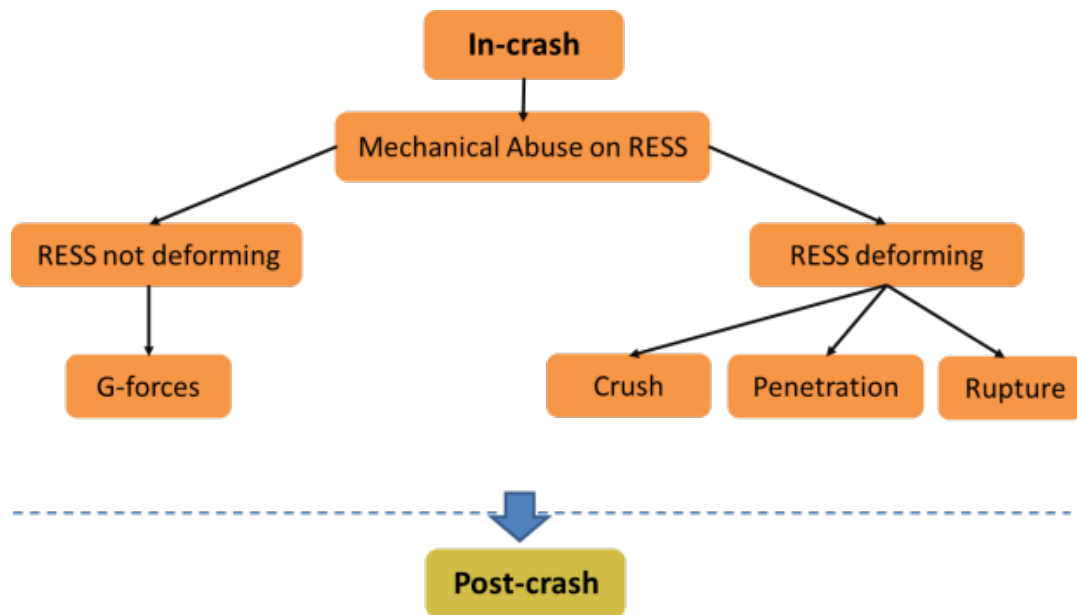


Figur 42 De tre huvudtyperna av våld antogs ske under faserna In-Crash och Post-Crash © David Sturk

5.2.1 In-Crash fasen

Vid kollision riskerar e-fordons batterisystem utsättas för Mekaniskt våld till följd av smällens accelerationsförändring och att objekt tränger in i fordonet och kanske även i batterisystemet.

Det är vanligt att fordonstillverkare placerar batterisystemen i den s.k. "Säkra Zonen" (se 3.1.3.1 *Vanliga placeringar* och Figur 21). Skyddade av bilens struktur och förstärkningar är vanligen följden att det inte uppkommer någon inträngning/deformation på batterisystemet. I dessa fall utsätts det endast för accelerationsexponering (G-krafter) från smällen. I samband med ovanligare högenergikollisioner (t.ex. höghastighetskollisioner) kan inträngning/deformation ske till följd av krossande våld, penetrerande objekt eller spänningar i batteriets struktur med följden av strukturella rupturer i batterikomponenter.



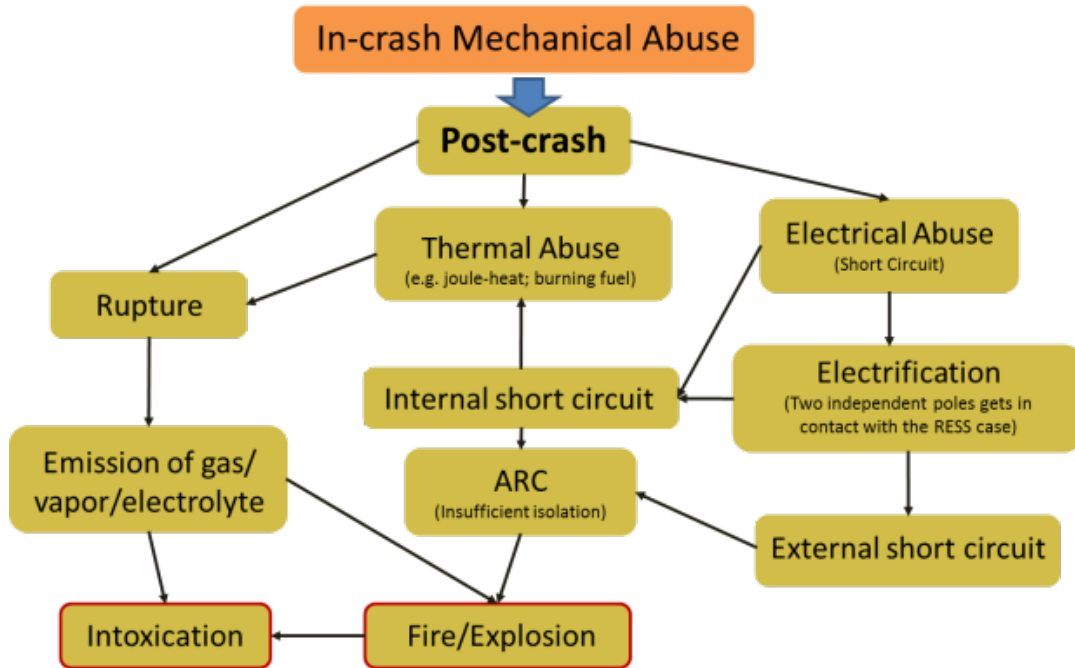
Figur 43 Händelseträdet grenar under In-Crash fasen © David Sturk

5.2.2 Post-Crash fasen

Det mekaniska våldet i föregående fas kan ge upphov sådan skada på batterisystemet att elektriskt våld och/eller termiskt våld uppkommer under Post-Crash fasen.

Som illustrerats tidigare (se Figur 3, Figur 4 och Figur 40) kan olika typer av kortslutningar uppkomma till följd av det mekaniska våldet. Kortslutningsströmmarna kommer generera värme inuti batterisystemet vilket riskerar att initiera termisk rusning. Den ökade temperaturen i battericellerna orsakar nedbrytning av deras interna komponenter varvid gaser frigörs. För att motverka den tryckstegring som skapas inuti battericellerna brister dem och dessa gaser och elektrolytångor frigörs till omgivningen.

Såsom beskrivits tidigare (3.2.2.4 *Gaser som kan frigöras från ett skadat Li-jon batteri*) är vissa av dessa gaser brandfarliga och andra är mer eller mindre giftiga. Mängden av de olika gastyperna varierar mellan olika batterikemier beroende på valen av material och additiva ämnen i cellerna. Om värme, ideal blandning och tändkälla finns i utrymmet med dessa gaser så kan brand och/eller explosion uppkomma. Alternativt kan kortslutningsströmmarna ta sig uttryck i ljusbågar (eng. "arcing") som svetsar hål i metallstrukturer och kan även fungera som tändkälla till dessa gaser.



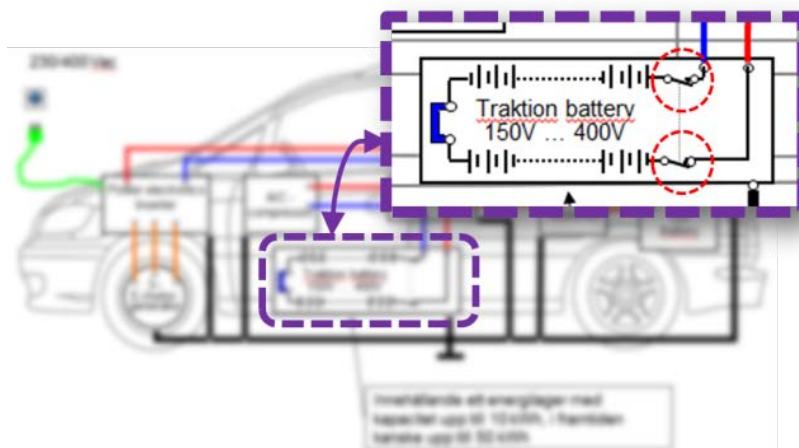
Figur 44 Händelseträdetets grenar under Post-Crash fasen © David Sturk

5.2.3 Rescue fasen

Då räddningstjänst anländer till platsen för trafikolycka börjar den avslutande fasen. Under denna fas kan fortfarande försenat batterihaveri uppkomma men antags vara mindre troligt.

Räddningstjänstens uppdrag blir här att framförallt följa existerande rutiner, säkra fordon och platsen, samt avlägsna skadade trafikanter.

Vid en återblick till Figur 29 *Överblick på e-fordons elsystem* kan man lägga märke till att i traktionsbatteriet finns illustrerat två kontaktorer som ansluter batterisystemet med fordonets drivsystem. Dessa kontaktorer är vanligen konstruerade så att de sammankopplar fordonet med batteriet så länge som 12 eller 24 V startbatteriet är kopplat till fordonet. Av denna anledning är det vanligt att räddningstjänst rekommenderas att frångkoppla/klippa bort startbatteriet så att det inte är länkat till bilens elsystem. Då detta gjorts vanligen traktionsbatteriet bli helt friflytande och dess elektriska energi frångkopplad förutsatt att inget objekt trängs in i batterisystemet.



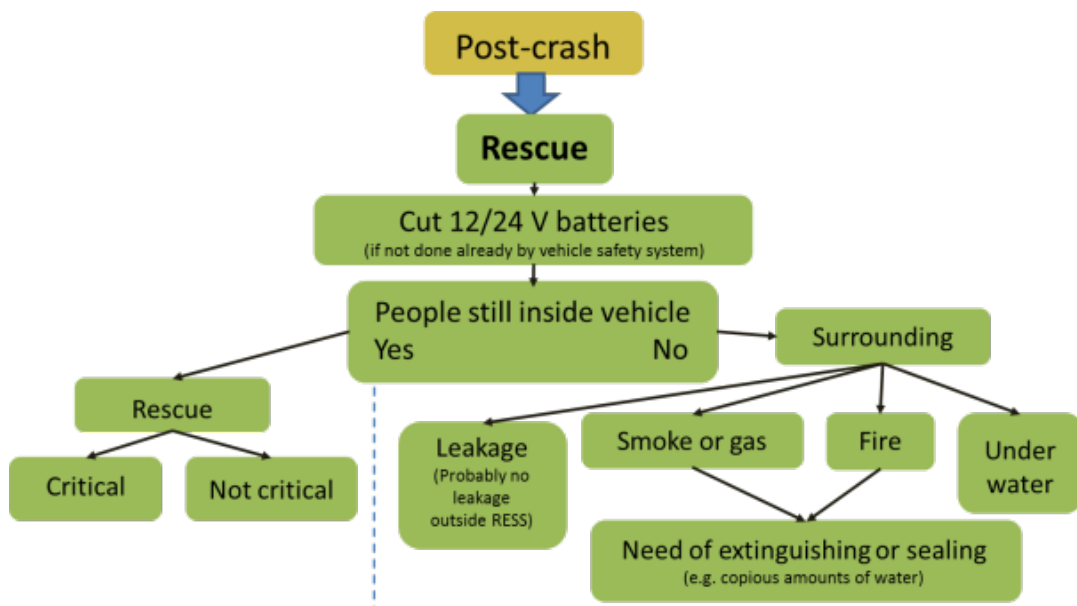
Figur 45 Det traktionsbatteriet presenteras här med två kontaktorer vilka sluter den elektriska kretsen mellan batterisystemet och fordonet så länge som 12 eller 24 V

startbatteriet är anslutet. Frånkopplas startbatteriet lyfts kontaktörerna och traktionsbatteriet blir friflytande utan elektrisk kontakt med fordonet. © Lars Hoffmann

Efter att startbatteriet frånkopplas/klippas bort och bilen i övrigt säkrats görs insats för att avlägsna eventuellt kvarvarande passagerare eller andra trafikanter från olycksplatsen. En bedömning av lämplig angreppsstrategi sker då utifrån om läget är kritiskt eller inte.

Om bilen ligger i vatten finns ofta en oro att vattnet kan strömsättas och skada räddningspersonal. Detta har inte påvisats i något av det material som omvärldsanalysen, på vilket denna rapport grundar sig, kartlagt. Därför kan denna rapport inte ge några rekommendationer på handlande förutom att sätta personal och trafikskadades säkerhet främst.

Om alla människor avlägsnats från olycksplatsen ska bedömning göras huruvida dess omgivning ska säkras från spridning av läckande vätskor, gaser, rök och brand. Om detta är fallet kan isolering, kylning eller släckning av de felande enheterna vara gångbart förutsatt att man har åtkomst till dessa delar av fordonet. I annat fall finns rekommendationer att antingen flöda stora mängder vatten över fordonet eller låta det brinna ut. Med tanke på de placeringar av traktionsbatterier som presenterades i sektionen 3.1.3.1 *Vanliga placeringar* är det uppenbart att åtkomsten till ett brinnande batterisystem kan vara kraftigt begränsad av fordonets struktur. Om åtkomst till batteriet kunde bli enklare för räddningstjänst hos framtida e-fordon modeller så skulle hanteringen av brand i traktionsbatteriet underlättas avsevärt.



Figur 46 Händelsetrådets grenar under Rescue fasen © David Sturk

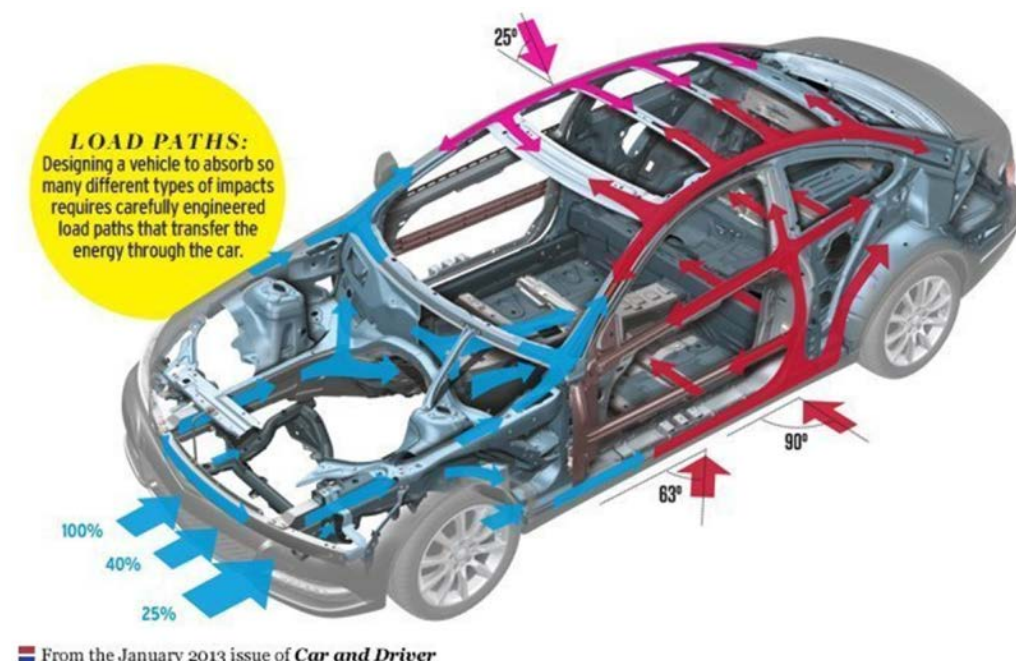
6 Lagkrav och Standarder för Säkra e-fordon

Som noterats flertal gånger genom denna rapport ställs alla modeller av serieproducerade e-fordon inför samma säkerhetskrav som fordon drivna med konventionella bränslen.

Trafiksäkerhet är en global angelägenhet varför internationella lagstiftande organ (t.ex. UN ECE – United Nations Economic Commission for Europe) och statliga myndigheter (t.ex. NHTSA under U.S. Department of Transportation) har utarbetat krav för hur säkerheten för åkande i fordon ska garanteras. Ytterligare högre krav kan ställas i Standarder och Ratings utformade av säkerhetscertifierande myndighetsprogram, branschorganisationer och institut såsom NCAP (New Car Assessment Program) som introducerades 1978 av National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), och provningsinstitutet IIHS (Institute for Highway Safety).

Krocksäkerheten hos en fordonsmodell utvärderas med provningsutföranden (definierade av ovan exemplifierade globala aktörer) vilka ska representera allehanda kollisionsscenarier som utifrån krockstatistik har bedömts avgörande för fordonssäkerhet. Av naturliga skäl definieras vanligtvis krocksäkerheten utifrån hur väl skyddad de åkande i fordonet är av dess skyddande strukturer, men krocksäkerhet kan också definieras utifrån komponentprover på t.ex. bränsletank, traktionsbatteri och andra känsliga komponenter.

Exempel på krocksäkerhetsprovning är frontalkollision mot stillastående barriär samt sidokollision och bakifrån kollision/påkörning av en rörlig barriär. Dessa barriärer ska representera kollisionsoponenter som statistiken visar är signifikant förekommande vid olyckor i trafiken. En av de vanligaste opponenten i ett krockprov är en deformierbar barriär som ska representera en påkörande bil, medan en annan typ av opponent kan vara en rigid påle som ska representera kollision med träd. Det centrala vid sådana prov är att passagerare är tillräckligt skyddade av fordonets ”säkerhetsbur” (se Figur 47) och bilens säkerhet bedöms utifrån registrerade ”skador” hos provdockor.



Figur 47 En passagerarbils bärande stomme är anpassad för att fördela kraften av en krock genom dedikerade lastvägar så att passagerare skyddas. Denna ”säkerhetsbur” ska etablera en ”säker zon” så att skador på passagerare minimeras. (91)

6.1 Åkandeskydd – Rating Prov

En fordonsmodell som testats enligt NHTSA's program U.S. NCAP tilldelas "star rating" för att underlätta för fordonsköpare att jämföra fordonets krocksäkerhet mot andra fordon. Med åren har programmets standard för frontalkollisionprov (se Figur 48) fått sällskap av sidokollisionsprov (1997) (se Figur 49) och rollover (2001). Ytterligare provtyper är under utredning såsom t.ex. Small Overlap och Oblique Testing där påkörande fordon kolliderar in i bilen på så vis att de longitudinella lastbärande balkarna under motorrummet missas. NHTSA och IIHS vill med införandet av sådan provningsmodell ytterligare öka bilisternas säkerhet.



Figur 48 Frontal Crash – NHTSA NCAP Crash Test Video 2013 Nissan LEAF 5DR Hatchback (92)



Figur 49 Side Impact Crash – NHTSA NCAP Crash Test Video 2013 Nissan LEAF 5DR Hatchback (92)

I bilderna ovan (Figur 48 och Figur 49) visas NHTSA's NCAP kollisionstest på Nissan LEAF 5DR året 2013. Åren 2011 och 2012 erhöll denna batterielbil (BEV) fem stjärnor av fem möjliga (Figur 50). 2013 års resultat reducerades något till följd av att påstås bero på högre andel av kollisionsvåld exponerades på passagerarkrockdocka i fordonet.

Explanation of 1990–2010 compared to 2011–Newer

Starting with 2011 models, NHTSA has introduced tougher tests and rigorous new 5-Star Safety Ratings that provide more information about safety feature performance and crash avoidance technologies. Because of the more stringent tests, 2011–newer model ratings are not comparable to 1990–2010 vehicles.

Year/Make/Model	Overall	Frontal Crash	Side Crash	Rollover
2013 Nissan Leaf 5 HB FWD	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
2012 Nissan Leaf 5 HB FWD	★★★★★	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆
2011 Nissan Leaf 5 HB FWD	★★★★★	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆

Figur 50 NCAP Star Rating – Nissan Leaf över åren 2011 till 2013 (92)

Det är just krockdockornas exponering till kollisionsvåld som avgör antalet stjärnor. Krockdockor är utrustade med sensorer som uppfattar hur kollisionsvåldet drabbar olika kroppsdelar och baserat på statistiskt underlag finns riktlinjer på vilka våldsnivåer på de olika kroppsdelarna som motsvarar sannolik skadekonsekvens. Våldsnivåerna förhåller sig till ett värsta scenario där person drabbas av livshotande skador eller sådana som kräver omedelbar sjukhusvård (Tabell 13). (93)

Tabell 13 Star Ratings bestäms utifrån risken för allvarliga skador hos personer i fordonet (93)

Frontal Impact	Chance of Serious injury	Side Impact
10% or less	Five Stars	5% or less
11-20%	Four Stars	6-10%
21-35%	Three Stars	11-20%
36-45%	Two Stars	21-25%
46% or greater	One Star	26% or greater

Rating system såsom ovan beskrivet Star Rating uppdateras kontinuerligt allteftersom fordon utvecklas och blir säkrare. Därför kan det vara vanskligt att direkt jämföra antalet stjärnor hos en bil med årsmodell 20XX med annan bil med årsmodell 20YY. Exemplet med Nissan i Figur 50 kan behöva betraktas utifrån detta faktum.

Ibland presenteras ett fordons Star Rating med ett klistermärke på något av bilens fönster. Ett exempel på sådan ”Window Sticker” för NHTSA's Star Rating syns i Figur 51. Exempel på ”Window Sticker” för att visa krockresultat vid NCAP provning (93).

GOVERNMENT SAFETY RATINGS		
Frontal Crash	Driver	★★★★★
	Passenger	★★★★★
<small>Star ratings based on the risk of injury in a frontal impact. Frontal ratings should ONLY be compared to other vehicles of similar size and weight.</small>		
Side Crash	Front seat	★★★★★▲
	Rear seat	Not Rated
<small>Star ratings based on the risk of injury in a side impact. ▲ Safety concern: Visit www.safercar.gov or call 1-888-327-4236 for more details.</small>		
Rollover		★★★★★
<small>Star ratings based on the risk of rollover in a single vehicle crash.</small>		
<small>Star ratings range from 1 to 5 stars (★★★★★) with 5 being the highest.</small>		
<small>Source: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).</small>		
www.safercar.gov or 1-888-327-4236		

Figur 51 Exempel på ”Window Sticker” för att visa krockresultat vid NCAP provning (93)

6.2 Batteriskydd – Komponentprov

Krocksäkerheten hos fordonskomponenter som anses vara särskilt nödvändiga att skydda utvärderas vanligen i samband med de krockprover som utvärdera åkandeskyddet såsom exemplifierats i stycket 6.1 *Åkandeskydd – Rating Prov*.

I Figur 48 och Figur 49 visas hur elbilen Nissan LEAF krockprovas i NCAP programmet. Naturligtvis utvärderades inte bara åkandeskyddet men även hur kollisionsvåldet exponerades på batteripacket. Bland e-fordon vars bärande strukturer i större grad baseras på konventionella fordonsmodeller är det inte ovanligt att den ”säkra zonen” (se Figur 21) som utformats kring åkandeskyddet även vägleder var i bilen tillverkaren placera traktionsbatteriet. I GM Volt och Audi A3 Sportback e-tron ligger en del av traktionsbatteriet skyddat i den centralt liggande golv-tunneln (se Figur 23 och Figur 24) men även bakom denna ovanför bakaxeln och i den inre delen av bagageutrymmets golv. Den senare placering kan exemplifieras av Volvo V60 Plug-in Hybrid (se Figur 22).

Traktionsbatteri som placerats i golv-tunneln erbjuds ett ordentligt skydd från bilens struktur eftersom golv-tunneln ligger långt innanför gränsen för den ”säkra zonen”. Också ett traktionsbatteri som placerats i bagageutrymmet är kraftigt skyddat även om det ligger mer exponerad för krockar bakifrån. Det är således betydelsefullt att utföra kollisionstester för att bekräfta batteriskyddet vid bakifrånkollision.

Det amerikanska lagkravet FMVSS 301 sätter ribban för detta. I provningsförfarandet krockar en släde, vilken utrustats med en barriär av deformierbar frontstruktur, in i fordonet bakifrån i en hastighet av 80 km/h (se Figur 52). Provet ursprungliga ändamål är att verifiera att bränsletanken som ligger i denna region förblir intakt vid bakifrånkollision.



Figur 52 Barriären ska representera en standardmässig personbil som i 80 km/h träffar bilen och tränger in i dess bakre deformationszon. Den högra bilden visar att trots den djupa inträngningen i bilstrukturen så sker inga inträngningar hos detta traktionsbatteri.

Som sagt utvärderas i flertalet lagkravsbestämda provningsutförande och standarder skyddet av batteripack alltså samtidigt med åkandeskyddet. Men, det finns också sådana som är specifikt inriktade på traktionsbatteriets, dess batterienheters och dess battericellers säkerhet vid belastning av de tre huvudgrupperna av skadlig påverkan – mekanisk, elektrisk och termisk åverkan (se Figur 40).

För att placera dessa lagkravsbestämda provningsutföranden och standarder i relation till vad som skulle kunna ske rekommenderas att ta en återblick till kapitlet 5 *Risikanalyser och Händelsesträd* och styckena 5.1 *Hypotetiskt scenario med kritiskt haveri av battericell* och 5.2 *De tre faserna vid kollision*.

I följande två stycken 6.3 och 0 beskrivs i korthet de huvudsakliga krockrelaterade lagkraven för e-fordon, respektive det stora utbudet av standarder som finns att tillgå för att utvärdera traktionsbatteriers, batterisystem, och battericellers säkerhetsfunktioner och stabilitet under åverkan från mekaniskt, elektriskt och termiskt våld.

6.3 Lagkrav för e-fordon – Elsäkerhet, Krasch och brand

De fordonmodeller som rullar på europeiska och svenska vägar måste godkännas i krocksäkerhetsprov definierade av United Nations Economic Commission for Europe (UN ECE) medan de som ska användas i USA måste uppfylla kraven hos krocksäkerhetsprov definierade av Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations (FMVSS).

Det är inte ovanligt att samma modeller som säljs i Sverige och i Europa säljs i USA, och därför kommer följande stycke att ge en kort översyn på både lagkrav från UNECE och FMVSS.

Lagkravet UN ECE R100 är det första lagkravet inom UN ECE för e-fordonsäkerhet med avseende på traktionsbatteriers funktionella stabilitet under drift och vid händelse av trafikskadehändelse. Det är en mycket omfattande och tidskrävande process att etablera den globala samsyn och consensus som krävs inom de internationella arbetsgrupper som arbetar med dessa typer av globala lagkrav. Dock är här arbetsgruppen bakom detta lagkrav exemplifierat en snabbare arbetsprocess än vad som ofta förväntas på grund av den snabba introduktionen av e-fordon i världen. Detta innebär att uppföljningar, eller ”amendments” kan väntas stärka och tydliggöra de riktlinjer som här ovan beskrivits så till vida att de förbättras på alla punkter där så finns behov från samhället och marknaden. Arbetet med vidareutvecklingen av R100 lagkravet kan studeras på UNECEs websida.

och Tabell 15 nedan ger en kortfattad beskrivning av de viktigaste lagkraven för fordonskrocksäkerhet.

6.3.1 UN ECE – Lagkrav för Europa

Bland de ECE lagkrav som anges nedan i Tabell 14 gäller samtliga för fordon bilar och lätta lastbilar upp till 5 ton men inte över.

Tabell 14 Sammanställning av för E-fordon relevanta UN ECE globala lagkrav gällande elsäkerhet, krasch och brand © David Sturk

Regulations	Main Focus	Basic Impact Conditions
ECE R12	Protection of the driver against the steering mechanism in the event of a Frontal	Full Frontal – Rigid Stationary Barrier – Vehicle Speed 48,3km/h
ECE R32	Behavior of the structure of the impacted vehicle in the event of a Rear End Collision	Steel Impactor – 35-38km/h
ECE R34	Prevention of Fire Risks in the event of Frontal Collision and Rear End Collision	Full Frontal – Rigid Barrier - 50km/h Rear End – See ECE R32
ECE R94	Protection of occupants in the event of Frontal Collision	Immobile Deformable Barrier – Vehicle Speed 56km/h – 40% Overlap (OL)
ECE R95	Protection of occupants in the event of Lateral Collision	Mobile Deformable Barrier – 50km/h
ECE R100	Specific requirements for the Electric Power Train	In line with R94 and R95

För att klara lagkrav R12, R32, R34, R94 och R95 måste ett e-fordon uppnå samma säkerhetskrav som konventionella fordon. Dess traktionsbatteri ska på inget sätt drabbas av ett batteriskada som leder till någon haverikonsekvens med resultat att medåkandes säkerhet hamnar på en lägre nivå än i konventionella bilar.

I och med att traktionsbatteriet introducerar nya parametrar i säkerhetsbedömningen såsom högre spänning, strömmar och effekt, samt nya batterikemier har UNECE beslutat att behandla komponentsäkerheten hos fordon med elektriska traktionssystem, dvs. e-fordon. Detta behandlas specifikt i lagkravet ECE R100 där bland annat traktionsbatteriets skydd och säkerhet bedöms utifrån en rad scenarier som bedömts vara relevanta för trafiksäkerheten:

- **Vibration** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos passivt traktionsbatteri då det utsätts för vibrationer. Efter avbruten vibrationsprov ska en driftscykel genomföras utan problem.*
- **Thermal Shock and Cycling** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos passivt traktionsbatteri då det utsätts för cykler av temperaturförändringar från -40°C till 60°C utan drift. Temperaturcyklingen följs av en driftscykel då säkerheten verifieras.*
- **Mechanical Impact**
 - *Mechanical Shock – Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under drift upplever en kollision i enlighet med UN ECE R94 eller R95. Traktionsbatteriets tålighet mot accelerationsvåld verifieras.*
 - *Mechanical Integrity – Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under drift upplever en kollision i enlighet med UN ECE R94 eller R95. Traktionsbatteriets tålighet mot deformerande våld verifieras.*
- **Fire Resistance** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos passivt traktionsbatteriet då det utsätts för en brand “utanför fordonet”. Direkt brandexponering under 70 sekunder från extern brandkälla, följt av reducerad brandexponering under 60 sekunder. Inget släckmedel ska behöva användas på traktionsbatteriet efter brandprov.*
- **External Short Circuit Protection** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under drift upplever en kortslutning. System som hindrar eller signifikant minskar kortslutning ska fungera. Efter avbruten kortslutningsprov ska en driftscykel genomföras utan problem.*
- **Overcharge Protection** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under laddning upplever överladdning. System som hindrar eller signifikant begränsar överladdning ska fungera. Efter avbruten överladdningsprov ska en driftscykel genomföras utan problem.*
- **Over-discharge protection** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under drift upplever över-URLaddning. Efter avbruten över-URLaddningsprov ska en driftscykel genomföras utan problem.*

- **Over-temperature protection** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos traktionsbatteri som under drift exponeras för och/eller upplever temperatur över tillåtet driftsområde. Säkerhetssystem ska stänga av traktionsbatteriet eller signifikant begränsa dess funktion som skydd.*
- **Emissions** – *Provning med mål att verifiera säkerheten hos “öppna” batterier såsom 12V blybatteriet där risk finns för vätgas utsläpp. “Förseglade” batterier omfattas inte, varibland Li-jon batterier ingår. Istället ska “förseglade” batteriers material och kemier beskrivas i material data blad från tillverkaren där potentiella risker tydliggörs.*

Lagkravet UN ECE R100 är det första lagkravet inom UN ECE för e-fordonsäkerhet med avseende på traktionsbatteriers funktionella stabilitet under drift och vid händelse av trafikskadehändelse. Det är en mycket omfattande och tidskrävande process att etablera den globala samsyn och consensus som krävs inom de internationella arbetsgrupper som arbetar med dessa typer av globala lagkrav. Dock är här arbetsgruppen bakom detta lagkrav exemplifierat en snabbare arbetsprocess än vad som ofta förväntas på grund av den snabba introduktionen av e-fordon i världen. Detta innebär att uppföljningar, eller ”amendments” kan väntas stärka och tydliggöra de riktlinjer som här ovan beskrivits så till vida att de förbättras på alla punkter där så finns behov från samhället och marknaden. Arbetet med vidareutvecklingen av R100 lagkravet kan studeras på UNECEs websida¹¹.

6.3.2 FMVSS – Lagkrav för USA

Som tidigare nämnt följer USA inte UN ECE utan har ett eget ramverk av trafiklagar under namnet Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations (FMVSS). I Tabell 15 redovisa likt föregående tabell de lagkrav för krocksäkerhet inom FMVSS som e-fordon måste godkännas för att en fordonsmodell ska få säljas i USA.

Tabell 15 Sammanställning av för E-fordon relevanta FMVSS USA lagkrav gällande elsäkerhet, krasch och brand © David Sturk

Impact Position	Regulations	Fuel System Integrity	Electrolyte Spillage, Electric Shock & Battery Safety	Basic Impact Conditions
Frontal Collision:	FMVSS 208	FMVSS 301	FMVSS 305	Rigid Barrier – 48 km/h – 100% OL
Rollover:	FMVSS 208			Vehicle on a 23° moving platform– Deceleration 48-0 km/h in 1m
Lateral (Side) Collision:	FMVSS 208 FMVSS 214			Moving Barrier – 32km/h Moving Barrier – 54 km/h
Rear End Collision:	FMVSS 301			Moving Barrier – 80 km/h – 70% OL

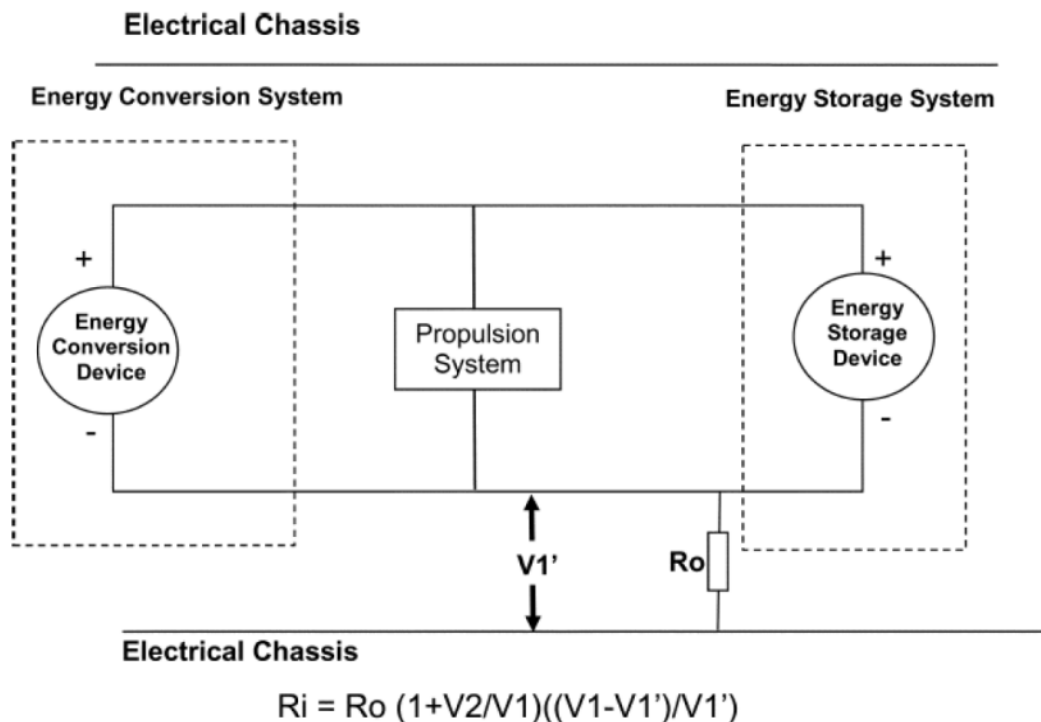
¹¹ <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/RESS+11th+meeting>

FMVSS 208 (Frontal, Rollover, Sidokollision), 214 (Sidokollision), 301 (Bakifrån och bränslesäkerhet) appliceras på alla bilar medan FMVSS 305 gäller som tillägg på e-fordon och deras säkerhet runt traktionsbatteriet.

Tabell 15 är illustrerad på så vis att den ska gestalta hur vissa lagkrav såsom 301 och 305 överligger de grundläggande lagkraven och därigenom kompletterar underliggande basala lagkrav.

FMVSS 305 är det USA lagkrav som mest konkret inriktar sig på säkerhetsaspekter hos e-fordon. Dess titel är "ELECTRIC-POWERED VEHICLES: ELECTROLYTE SPILLAGE AND ELECTRIC SHOCK PROTECTION". Följaktligen berör detta lagkrav endast läckage av elektrolyt hos sådana batterier som har fri elektrolyt (t.ex. blybatterier) och kontroll att traktionssystemet i ett e-fordon inte är konstruerat så risk finns att en människa kommer åt strömsatta delar och sluter strömkrets med kroppsdel. E-fordons krocksäkerhet regleras av de basala lagkraven (208, 214 och 301) men för att få godkänt på dessa måste även alla provningsresultat studeras och godkännas utifrån FMVSS 305 krav på elektrolytläckage och skyddet mot kortslutning.

Med andra ord så genomförs krockprover i enlighet med de basala lagkraven med till deras lista av godkännande-kriterier tilläggs de kriterier som omfattas i FMVSS 305.



Figur 53 FMVSS 305 direktiv för spänningsmätning över resistor mellan traktionssystemets negativa pol och fordonets chassi. Syftet är att verifiera att ingen risk för kortslutningsströmmar genom chassit föreligger efter genomfört prov (t.ex. 208, 214 och 301). (94)

6.4 Standarder för e-fordon och dess komponenter

Standarder är inte bindande för e-fordonstillverkare att uppfylla men de används som kvalitetsmarkörer och har stor betydelse för det förtroende som marknaden får för en nylanserad fordonsmodell.

I Tabell 16 presenteras ett urval av den stora mängd standarder för utvärdering av funktionalitet och säkerhet på nivåer från battericell, batteripack/system till komplett fordon. Om en fördjupning av vad de många standardnamnen innebär önskas så finns mer detaljerad information att erhålla i Appendix 10.1 *SIS - Electric and hybrid road vehicles – Related standards and drafts (2011) [SIS/TK 517/PC]*.

Tabell 16 Sammanställning av Standarder för utvärdering av e-fordons och deras komponenters funktionalitet och säkerhet (95) (96) (97) (98)

Category\ Organization	EN(CEN)	ISO	IEC	UL	SAE	Sandia
General		ISO 6469-4 ISO 6469-3 ISO/CD 6469-4 ISO 8713 ISO/DTR 8713 ISO 23273-3 ISO/IEC DIS 26262	IEC 60950-1 IEC 60950-22		SAE J1673 SAE J2344	
Environment		ISO 16750-1 ISO 16750-2 ISO 16750-4 ISO 20653				
Battery Pack/System		ISO 6469-1 ISO/DIS 12405-1 ISO/CD 12405-2 ISO/WD 12405-3		UL 2271:2010 UL 2580	SAE J1766 SAE J2289 SAE J2929	
Battery Cells	EN 50272-3		IEC 61982-1 IEC 61982-4 IEC 61982-5 IEC 62133 IEC 62660-1 IEC 62660-2 IEC 62660-5 IEC 62281	UL 1642 UL 2271:2010 UL 2580	SAE J2464	SAND2005-3123:2006 (FreedomCar)
Charging System	SS 436 40 00 SS-EN 61851-1, SS-EN 61851-21 SS-EN 61851-22 SS-EN 61851-23		ISO/IEC 15118-1 ISO/IEC 15118-2 IEC 60364 IEC 61851-1 IEC 61851-21 IEC 61851-22 IEC 61851-23 IEC 62196-1 IEC 62196-2	UL 2202 UL 2231-1 UL 2231-2 UL 2251 UL 2594	SAE J1772 SAE J1773	
Misc.		ISO 6469-2 ISO 6722 ISO 10924-1 ISO 10924-4 ISO 14121-1 ISO 14572	IEC 60664-1 IEC 60664-3 IEC 60664-4 IEC 60664-5 IEC/TR 60664-2-1 IEC/TR 60664-2-2 IEC 61800-5-1		SAE J1654 SAE J1742 SAE J2183 SAE J2501 SAE/USCAR-2	

Arbetsgrupper där standarder (liksom lagkrav) utformas innefattar sakkunniga experter i detaljfrågor såsom specifik provningsmetodik och produkttillverkningsprocesser samt homologeringsexperter vars profession är att inneha en övergripande förståelse för hur den aktuella arbetsgruppens arbete på bästa sätt ska samverka med andra standarder och lagkrav som anses vara av bärande betydelse. Med andra ord kan man säga att tekniskt sakkunniga experter ser till att nya tekniska parametrar introduceras och behandlas

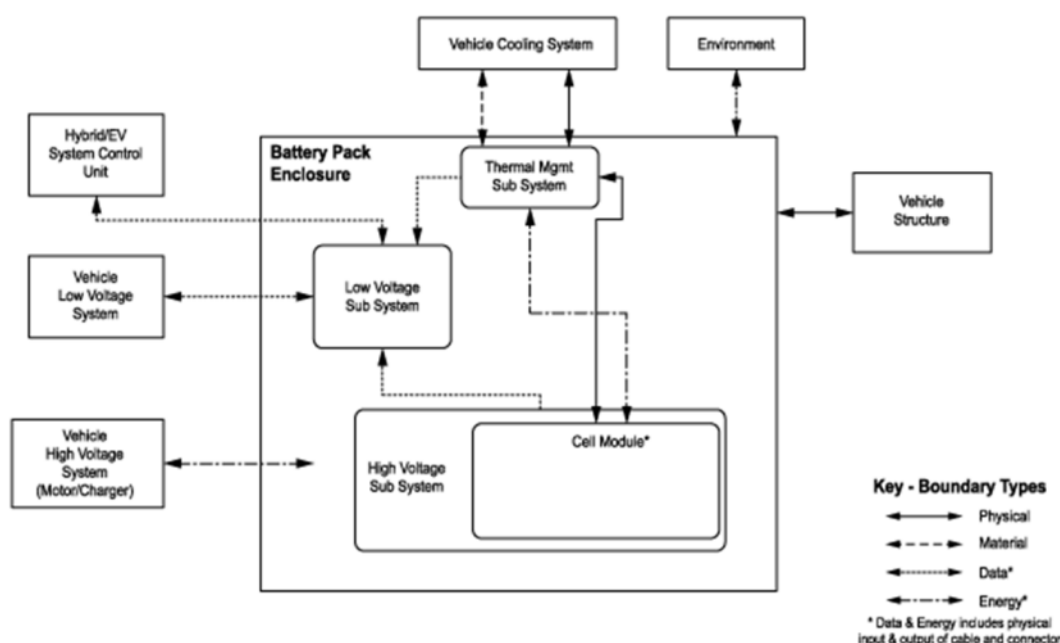
korrekt i diskussionen medan homologeringsexperten ser till att resultatet av diskussionen kommer vara logiskt i förhållande till existerande standarders och lagkravs utformningar.

En närmare titt på standarden ISO 6469 och dess version 4 (dvs. arbetsdokument i mars 2014) visar hur sammanlänkad denna standard är med andra relaterade dokument där t.ex. stycket för mekanisk provning tills vidare presenterar hänvisningen ”The safety requirements of this standard shall apply in accordance with the existing crash test procedures of each country or region”. Genom syftningen till ”the existing crash test procedures of each country or region” så kan denna standard användas i både länder som följer UN ECE (t.ex. R12, R94 och R95) och FMVSS (t.ex. 208, 214 och 301) eller andra standarder som är beroende på om de appliceras i t.ex. Europa eller USA är företrädesvis valda. Stycket efter detta om mekanisk provning behandlar säkerhetskrav ur ett elektriskt perspektiv och innehåller tydliga direktiv för provningsförfarande och hur eventuella batterihaverikonsekvenser ska bedömas för godkännande eller icke, vilket som kontrast visar hur denna standard väljer att i fråga om säkerhetskrav ur ett elektriskt perspektiv väljer att ge specifik vägledning i provningsförfarandet.

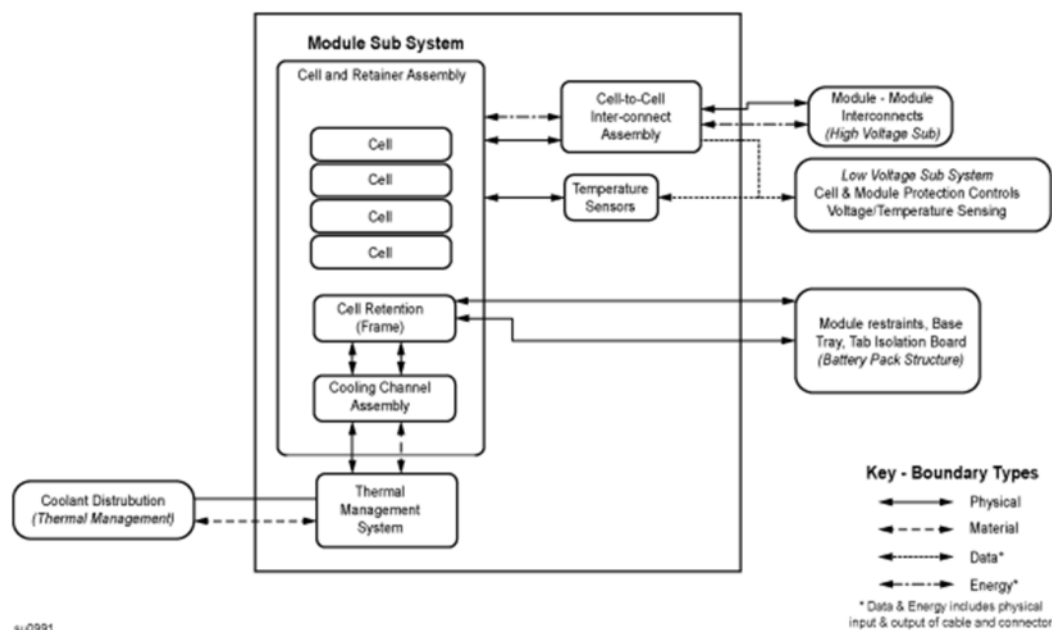
Med den typ av hänvisningar till andra dokument som exemplifieras för mekanisk provning i ISO 6469 strävar berörda arbetsgrupper att samverka med andra standarder och lagkrav som i enskild provningsförfarande (i detta exempel gällande mekanisk provning) gynnas av att hänvisas till annat mer bärande dokument.

För att ge ett exempel på standard bland de i Tabell 16 som riktar sig mot säkerheten hos både komplett REESS/batteripack och de modulära enheter som detta består av kan UL 2580 nämnas. Denna standard inriktar sig mot provning för verifiering av att de testade batterienheterna är kapabla att motstå skadande våld och att de kan förhindra att batterihaverikonsekvenser som utgör risk för människor inte uppkommer efter sådant våld exponerats på batterienheten. Denna standard omfattar inte funktionalitet eller tillförlitlighet under driftsmässigt nyttjande, och inte heller batterisystem för användning i lätta e-fordon såsom e-cyklar, e-scooter etc.

I Figur 54 och Figur 55 visas hur UL 2580 definierar systemgränsen för ett REESS respektive batterimodul.



Figur 54 Definition av systemgräns för REESS/Batteripack och dess koppling till omgivande funktionella enheter i e-fordonet, enligt UL 2580. (99)



Figur 55 Definition av systemgräns för batterimodul och dess koppling till omgivande funktionella enheter i e-fordonet, enligt UL 2580. (99)

Utifrån dessa definition beskriver UL 2580 hur säkerhetsprovning ska utföras och täcker då in huvudgrupperna Electrical Tests, Mechanical Tests, och Environmental Tests. Exempel på provning är:

- Short Circuit Test (Electrical Tests)
- Temperature Test (Electrical Tests)
- Isolation Resistance Test (Electrical Tests)
- Failure of Cooling/Thermal Stability System Test (Electrical Tests)
- Shock Test (Mechanical Tests)
- Drop Test (Mechanical Tests)
- Crush Tests (Mechanical Tests)
- Thermal Cycling (Environmental Tests)
- Salt Spray Tests (Environmental Tests)
- Immersion Test (Environmental Tests)
- External Fire Exposure Test (Environmental Tests)
- Internal Fire Exposure Test (Environmental Tests)

Under dessa test ska den batterienhet som provas påvisa att haverikonsekvenser under aktuellt provningsförarande inte ska innebära risk för människor om det skedde i bil. Kategorier av PASS och FAIL -kriterier som utvärderar omfattar i denna standard:

- Brand
- Explosion
- Ventilering av battericellsinterna gaser
- Fallerande av kontroll och skyddsutrustning

- Elektrolyt läckage
- Otillräckligt isoleringsskydd

I händelse av att provet påvisar något av dessa haverikonsekvenser så klassas det som att batterienheten misslyckas att ge det skydd som krävs för omgivande människors säkerhet.

I stort sätt liknande kravspecifikationer definieras i de andra standarder som berör säkerhet hos REESS, batterimodul och battericeller. Med sådana standarder som komplement till lagkrav för e-fordons säkerhet ska e-fordonsutveckling och tillverkning ske och kontrolleras av myndigheter, OEM och provningsinstitut för att på så sätt försäkra att alla nya fordonsmodeller motsvarar eller överträffar säkerhetsnormerna som det internationella samfundet etablerat för fordonssäkerhet.

7 Slutsatser

Som nämnts i denna rapportens inledande sammanfattning föregicks FFI-projektet Räddningskedjan av en MSB enkät till svensk och skandinavisk räddningstjänst där frågor kring e-fordon i trafikskadehändelse besvarades och påvisade en tydlig oro hos tillfrågade om obekanta riskfaktorer som skulle kunna introduceras till sådan olycka i och med att e-fordon är involverat. Arbetet med denna rapport har pågått sedan projektstart i maj 2012 och fortlöpt fram till april 2014 parallellt som det arbete med omvärldsanalys och påföljande fysisk batteriskadeprovning genomförts. Rapporten beskriver därmed hela den process som projektarbetet inneburit fram till genomförandet av de fysiska prover som i nästa stycke – 8 *Utvalda Prov för Batteriskadeforskning* – specificeras som målsättning baserat på utkomsten av arbetet bakom denna rapport.

Följande slutsatser har genererats genom denna omvärldsanalys och litteraturstudie av e-fordons säkerhetsfunktioner och potentiella risker ur tekniskt och batterikemiskt perspektiv:

- För att ge större trygghet hos räddningspersonal inför mötet med e-fordon i trafikskadeolycka behövs att:
 - nödvändig förståelse för e-fordons och traktionsbatteriers tekniska säkerhetslösningar sprids inom yrkeskåren
 - nödvändig förståelse för traktionsbatteriers elektriska och batterikemiska grunder sprids inom yrkeskåren
 - förståelse för skillnaden mellan e-fordons verkliga riskfaktorer och cirkulerande myter kring denna fordonstyp och deras elektriska traktionssystem och traktionsbatteri
- Ett kritiskt batterihaveri kan definieras med att battericell skadas till sådan grad att det ventilerar ut inre gaser och/eller går i brand och/eller explosion, vilket därefter riskerar att initiera ytterligare haveri hos närliggande battericeller.
- Merparten av e-fordonmarknadens traktionsbatterier är idag av typen Li-jon batterier eftersom dessa erbjuder högst energimängd per kilogram och därigenom ger e-fordonet längst batterigenererad räckvidd
- Traktionsbatteriet hos e-fordon är inte jordade i fordonets chassi, likt 12 Volts batterier
 - Det är vanligt hos e-fordon att om 12 Volts batteriets strömkrets bryts ges signal till kontaktorn mellan traktionsbatteri och e-fordonets övriga traktionsstystem att bryta kontakten
 - När kontaktorn mellan traktionsbatteri och e-fordonets övriga traktionsstystem bryts blir traktionsbatteriet ”friflytande” och saknar därefter elektrisk kontakt med allt utanför batteripacket
 - Räddningstjänst kan dra nytta av att fränkoppla eller klippa bort 12 Volts batteriet för att därmed isolera traktionsbatteriet

- För att strömsätta åtkomliga delar av skadat e-fordon måste traktionsbatteriets båda poler kontakteras av ledande föremål efter att traktionsbatteriets elektriska säkerhetssystem satts ur funktion
 - Vid omedelbar kroppskontakt med traktionsbatteripolerna finns överhängande risk för kroppsskada genom strömrusning genom strömsatt kroppsdel
 - Tillverkare av e-fordon minimerar avsevärt risken för omedelbar kroppskontakt med traktionsbatteripolerna genom att göra traktionsbatteriet ”friflytande”.
 - Tack vare att traktionsbatteriet görs ”friflytande” krävs det en komplicerad kombination av minst två inträngande ledande föremål i traktionsbatteriet och därtill havererade säkerhetssystem för att komponenter utanför traktionsbatteriet ska bli kontakterade med respektive batteripol och därigenom representera risk för omedelbar kroppskontakt med traktionsbatteripolerna
- Om traktionsbatteriets battericeller exponeras för värme över driftstemperatur kan, inuti battericeller, initieras nedbrytningsreaktioner av aktiva batterimaterial; sådana reaktioner kan alstrat ytterligare värme men också gaser vilket ökar trycket inuti battericell till dess säkerhetsventil(er) löser ut och frigör gaserna genom ”ventilering”
 - Vid ventilering av Li-jon batteri frigörs elektrolytångor, vilka består av organiska lösningsmedel, plus gaser som skapats från nedbrytning och i viss mån förbränning av batteriets aktiva material
 - Om en Li-jon battericell upplever högre temperatur än omkring 170-200 °C ökar materialnedbrytningen av elektrolytens salt LiPF₆ varvid hastigheten för generering av HF ökar
 - HF genereras vid brand i konventionella fordon och likaså vid brand i e-fordon men enligt en forskningsrapport från franska INERIS genererades 2-3ggr mer HF vid deras brandprov där komplett bilbrand med e-fordon (med fulladdat batteri) jämförs med motsvarande konventionellt fordon (med full bränsletank); dock framgår inte om värdena beror av den specifika Li-jon kemityp som brunnit (se 3.2.2.4 *Gaser som kan frigöras från ett skadat Li-jon batteri*)
 - Batteritillverkare tillsätter vanligen additiva ämnen till batteriets aktiva ämnen såsom elektrolyten för att minska brännbarheten och mängden skadliga gaser som skulle kunna frigöras vid cell-ventilering
- Batterier kan drabbas av termisk rusning (eng. Thermal Runaway) om battericellen drabbas av värmegenererande nedbrytningsreaktioner av

aktiva material ifall battericellens aktiva material når temperatur kring 200-250 °C och däröver

- Möjliga orsaker till kritisk exponering av värme på battericell kan vara kraftig strömrusning/kortslutning eller extern värmekälla såsom t.ex. brand i, bredvid eller under e-fordonet
 - Summan av den värmeenergi som kan frigöras vid strömrusning tillsammans med eventuellt påföljande termisk rusning är dock generellt mindre än innehållet av förbränningsvärmeenergin hos den organiska elektrolyten i ett Li-jon batteri per gram cell
 - I händelse av fulländad händelsekedja av batterihaveri [strömrusning -> cellintern upphettning -> termisk rusning -> antändning av organiska cellmaterial] så står de organiska materialens förbränningsenergi för majoriteten av värmen
 - Vid fullständigt batterihaveri med brand är det framförallt CO₂ och CO som genereras i störts mängd.
 - Vid ventilering utan brand är stor del av gaserna elektrolytångor
 - Ytterligare gaser som kan förekomma i mindre men ändå mätbar mängd är t.ex. vätgas och diverse kolväten
- Den händelsekedja som leder till kritiskt batterihaveri kan beskrivas översiktligt med en förenklad modell bestående av tre huvudgrupper av skadligt våld mot batteri (se Figur 40 Då en battericell går sönder kan detta ske genom tre huvudgrupper av våld (eller åverkan) – Mekanisk åverkan; Elektrisk åverkan; Termisk åverkan. Dessa är ofta kopplade till varandra och kan leda till att gaser frigörs från battericellerna med påföljande risk för brand och/eller explosion (90) © David SturkFigur 40) och en ”värsta konsekvens”:
- Mekaniskt våld
 - Elektriskt våld
 - Termiskt våld
 - Ventilering av gaser med påföljande brand
- Då fordonsindustrin lanserar ny fordonsmodell ska säkerhetskriterier som är definierade av globala lagkrav uppfyllas för att garantera adekvat trafiksäkerhet för fordonets åkande – oavsett konventionell fordon eller e-fordon – vilket verifieras genom tydligt reglerade krock och säkerhetsprov på både komplett fordon och dess kritiska komponenter såsom bränsletank och traktionsbatteri
 - Förutom globala lagkrav finns ett stort utbud av provningsreglerade specifikationer i Standard- och Ratingdokument vilka syftar på att

definiera en ytterligare högre nivå av trafiksäkerhet hos fordonet och dess kritiska komponenter

- e-fordon som tillverkats utifrån konventionella fordonsplattform nyttjar vanligen sådan batteriplacering som skyddad av konventionella strukturer, såsom placering i golvtunneln och över bakaxeln
- e-fordon som tillverkats utifrån ny plattform erbjuder större friheter för batteriplacering i och med att traktionsbatteriets strukturella skydd kan utformas mer ändamålsenligt varvid större traktionsbatteri kan införlivas i e-fordonet som därigenom får möjlighet till längre räckvidd

8 Utvalda Prov för Batteriskadeforskning

8.1 Mekaniskt våld

- Prover ska genomföras utifrån den exponering för accelerationsvåld och deformationsvåld ett traktionsbatteri och dess moduler upplever vid kollision. Typen av kollision definieras genom en studie av kollisionsstatistik och kollisionsmönster. Databaser över trafikskadehändelser vilka används för detta är tyska GIDAS och amerikanska NASS. Utvalda fallstudier ur detta statistiska underlag återskapas med CAE simuleringar av motsvarande kollision med komplett e-fordon. Resultaten från simuleringarna påvisar vilka nivåer av accelerationsvåld och deformationsvåld batterisystem och moduler utsatts för i händelse av det utvalda krockfallet. Detta accelerationsvåld och deformationsvåld återskapas på nivån av batteripack eller batterimodul i Autoliv specialdesignade släckrockslaboratoriet för batteri- och högriskprovning.

8.2 Elektrisk våld

- Kortslutningsprovning för att undersöka konventionella säkerhetssystem mot kortslutning och utvärdera kortslutningsströmmars beroende av traktionssystemets driftsparametrar såsom storlek på induktivlast och dess påverkan på kortslutningsströmmen och spänningens profiler och max respektive minimi nivåer.

8.3 Termiskt våld

- Brandprover där extern brandkälla exponeras på batteripack och battericeller av de två kommersiellt vanligaste Li-jon batterikemierna (NMC och LiFePO_4) för att utvärdera vilka gasemissioner som kan skapas vid brand kring och i traktionsbatteri. Brandprover utförs på battericeller i grupper med varierade antal och varierade laddningsgrad. Brandprover utförs på batteripack med hög laddningsgrad. Förutom gasemissionernas koncentrationer och toxicitet utvärderas också till vilken grad batteriers laddningsgrad vid batterihaveriet påverkar effekten med vilken brand och/eller värmeenergin frigörs samt mängden kemisk energi som frigörs under provernas förutsättningar.

8.4 Släckmedelsprov

- Baserat på resultat från brandprover genomförs prover på brinnande batterisystem – celler, moduler och batteripack – med tioalet släckmedel i syfte att utvärdera vilka släckmedel som med fördel kan användas på batteribrand respektive vilka som bör undvikas.

9 References

1. **Söderholm, Tommy.** *Projekt el-hybridfordon*. Sandö : Myndigheten för samhällsskydd och beredskap MSB, 2011. 2011-1687.
2. **Moldén, Bertil.** *Uppskattnng av mängden fordon med eldrift 2020*. Feb 3, 2012.
3. **Romero, Frances.** A Brief History of The Electric Car. *Time Business & Money*. [Online] TIME, Jan 13, 2009. [Cited: Jan 07, 2013.] <http://www.time.com/time/business/article/0,8599,1871282,00.html>.
4. **Nazri, Gholam-Abbas and Pistoia, Gianfranco.** *Lithium Batteries Science and Technology*. 2009.
5. *Understanding The Future For IEC EV*. **Bossche, Peter Van den ; Secretary of IEC TC69**. London : 3rd International EV Battery Tech Conference, 2011. p. 4.
6. **NHTSA.** *Chevrolet Volt Battery Incident Overview Report*. s.l. : NHTSA, 2012. DOT HS 811 573.
7. **Back, Gerald at Hughs Associates, Inc.** *MGA/NHTSA Car Fire Inspection*. Washington DC : NHTSA, 2012.
8. **ChinaAutoWeb.** Three BYD e6 Passengers Killed in Fiery Crash, Spurring EV Safety Concern. [Online] ChinaAutoWeb, May 27, 2012. [Cited: Oct 25, 2012.] <http://chinaautoweb.com/2012/05/three-byd-e6-passengers-killed-in-fiery-crash-spurring-ev-safety-concern/>.
9. **Pierson, David.** Fatal collision raises new concerns about Chinese automaker BYD. *Electric Car*. [Online] Los Angeles Times, May 29, 2012. [Cited: May 30, 2012.] <http://articles.latimes.com/2012/may/29/business/la-fi-mo-china-byd-20120529>.
10. **Nedelea, Andrei.** Flammable Interior Materials to Blame for BYD EV fire. *Industry*. [Online] autoevolution, Aug 03, 2012. [Cited: Aug 15, 2012.] <http://www.autoevolution.com/news/flammable-interior-materials-to-blame-for-byd-ev-fire-48028.html>.
11. **GM Authority Staff.** Breaking: Battery Explosion Reported At Warren Tech Center. [Online] GM Authority, Apr 11, 2012. [Cited: Apr 15, 2012.] <http://gmauthority.com/blog/2012/04/breaking-battery-explosion-at-warren-tech-center/>.
12. **Woodyard, Chris.** GM says battery blast at lab unrelated to Chevrolet Volt. *DriveOn*. [Online] USA Today, Apr 11, 2012. [Cited: Apr 15, 2012.] <http://content.usatoday.com/communities/driveon/post/2012/04/general-motors-gm-blast-explosion-warren-electric-car-volt-battery-lithium-ion/1>.
13. **Ewans, Huw.** GM's Battery Explosion: What We Currently Know. [Online] hybridCARS, Apr 13, 2012. [Cited: Apr 15, 2012.] <http://www.hybridcars.com/gms-battery-explosion-what-we-currently-know-44329/>.
14. **Associated Press.** Explosion injures 2 at General Motors battery testing facility. *Lifestyle Auto*. [Online] Fox News, Apr 11, 2012. [Cited: Apr 15, 2012.] <http://www.foxnews.com/leisure/2012/04/11/explosion-injures-2-at-general-motors-battery-testing-facility/>.
15. **Karlberg, Anders.** Elbil på laddning tog eld på färja. *Fordon*. [Online] NyTeknik, Nov 18, 2010. [Cited: Apr 15, 2012.] http://www.nyteknik.se/nyheter/for_\motor/bilar/article2509892.ece.

16. **Sörgaard, Jan.** Ombygget bil bröd i brand på Oslo-båden. [Online] Ekstra Bladet, Nov 17, 2010. [Cited: Apr 15, 2012.] <http://ekstrabladet.dk/112/article1453404.ece>.
17. **Hoffmann, Lars and Söderholm, Tommy.** *Elbilsbranden i Ösmo lördagen den 11:e Augusti 2012*. Borås : SP, 2013. ISBN 978-91-87017-84-1.
18. **George, Patrick.** This Is What Fiery Tesla Model S Death Looks Like (UPDATED). [Online] JALOPNIK, Oct 03, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://jalopnik.com/this-is-what-fiery-tesla-model-s-death-looks-like-1440143525>.
19. **BBC NEWS Business.** Tesla shares fall on report of a car fire. [Online] BBC NEWS Business, Oct 03, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://www.bbc.co.uk/news/business-24377350>.
20. **George, Patrick.** Another Tesla Model S Caught Fire After A Crash In Mexico. [Online] JALOPNIK, Oct 28, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://jalopnik.com/another-tesla-model-s-caught-fire-after-a-crash-in-mexi-1453376349>.
21. **Meier, Fred and Woodyard, Chris.** Feds review third Tesla fire as shares fall again. *Money*. [Online] USA TODAY, Nov 07, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://www.usatoday.com/story/money/cars/2013/11/07/third-fire-in-tesla-model-s-reported/3465717/>.
22. **Herron, David.** Tesla Model S Blaze in Nashville Makes Three Fires in Six Weeks. *Tesla Model S*. [Online] PluginCars, Nov 07, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://www.pluginCars.com/third-model-s-car-fire-5-weeks-following-accident-nashville-128802.html>.
23. **Okulski, Travis.** A Third Tesla Model S Has Caught Fire. [Online] JALOPNIK, Nov 07, 2013. [Cited: Jan 15, 2014.] <http://jalopnik.com/a-third-tesla-model-s-has-caught-fire-1460039546>.
24. **Rietschel, Andy.** Beskrivning av statistikdatabasen ELIS - Elbilen i Sverige. *Easycharge*. [Online] Feb 27, 2013. [Cited: Mar 16, 2014.] http://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrBTzgxpiVTtj8AISNXNyoA;_ylu=X3oDMTB yMG04Z2o2BHNIYwNzcgRwb3MDMQRjb2xvA2JmMQR2dGlkAw--/RV=1/RE=1395062706/RO=10/RU=http%3a%2f%2fh24-files.s3.amazonaws.com%2f72243%2f363315-Ywy41.pdf/RS=%5EADAcJvIOWTiMgcjdXZiVJi02nPC6xY-
25. **Power Circle and Johansson, Olle.** Näst bästa månaden någonsin för laddbara fordon. *Aktuellt*. [Online] Power Circle, Mar 04, 2014. [Cited: Mar 16, 2014.] <http://www.powercircle.org/se/display/elbilsstatistik.aspx>.
26. **Power Circle.** Elbilsstatistik. [Online] Power Circle, Mar 04, 2014. [Cited: Mar 16, 2014.] <http://www.powercircle.org/se/display/elbilsstatistik.aspx>.
27. **BIL Sweden.** Stark nybilsförsäljning ger höjd prognos. *Pressmeddelanden*. [Online] BIL Sweden, Mar 12, 2014. [Cited: Mar 16, 2014.] <http://www.bilsweden.se/publikationer/pressmeddelanden/stark-nybilsforsaljning-ger-hojd-prognos>.
28. **Axeon.** Our Guide to Batteries. *Technology*. [Online] [Cited: 24 Feb 2011.] <http://www.axeon.com/getdoc/46d324f7-9b2d-4cc6-a809-25ba1f1c4e34/Our-Guide-To-Batteries.aspx>.
29. **Battery University.** Types of Battery Cells. *Learn About Batteries*. [Online] Battery University. [Citat: den 07 Jan 2013.] http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells.

30. **Elger, Ragna.** On the behaviour of the lithium ion battery in the HEV application. *Licentiate Thesis*. Stockholm : KTH Chemical Engineering and Technology, 2004.
31. **Open i beta.** Hollow Nanostructured Anode Materials for Li-Ion Batteries. [Online] [Cited: Jan 08, 2013.] http://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=2956050_1556-276X-5-1525-1&query=the&fields=all&favor=none&it=none&sub=none&uniq=0&sp=none&req=4&simCollection=1533374_envhper00540-0045-c&npos=45&prt=3.
32. *A consideration of lithium cell safety.* **Tobishima, Shin-ichi och Yamaki, Jun-ichi.** u.o. : Journal of Power Sources, 1999, Vol. 81-82, ss. 882-886.
33. **NTSB.** Hazardous Materials Accident Brief. [Online] 26 September 2005. [Cited: 9 March 2011.] <http://www.ntsbgovpublicitn/2005/HZB0501.htm>. NTSB/HZB-05/01 .
34. **Sturk, David.** *Li-Ion Battery Safety Modelling*. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2010.
35. **Tamminen, Jarmo, et al., et al.** *Materialgenskaper inkapsling Kokam battericell 2 S70205130*. s.l. : Scania, 2009. R2009-0445.
36. **Hoffmann, Lars and Sturk, David.** *Några tekniska karakteristika hos el- och elhybridfordon*. Umeå : TSCN - Traffic Safety Center North, 2011.
37. *Elsäkerhet Grön Kurs.* **Hoffmann, Lars.** Trollhättan : Saab Automobile AB, 2005.
38. **Justen, Rainer and Prof. Dr. Schöneburg, Rodolfo.** *Crash Safety of Hybrid- and Electric Vehicles*. Washington : ESV Conference Washington - Daimler AG, Mercedes Car Group, 2011. 11-0096.
39. **European Cars Reviews.** Volvo V60 Plug-in Hybrid: 1.9 l/100km (123/8 mpg)! [Online] Testdrives.eu, Jan 27, 2011. [Cited: Jan 07, 2013.] <http://testdrives.eu/2011/01/27/volvo-v60-plug-in-hybrid-1-9-l100km-1238-mpg/>.
40. **Volvo Pressinfo.** Volvo V60 Plug-in Hybrid börjar säljas 2012. [Online] Nybergs Bil i Jönköping, Nässjö och Eksjö, den 17 Oct 2011. [Citat: den 07 Jan 2013.] <http://nybergsbil.wordpress.com/2011/10/17/volvo-v60-plug-in-hybrid-borjar-saljas-2012/>.
41. **Garthwaite, Josie.** Second Life for Old Electric-Car Batteries: Guardians of the Electric Grid. *Daily News*. [Online] National Geographic, Nov 15, 2012. <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2012/11/121116-second-life-for-used-electric-car-batteries/>.
42. **Edelstein, Stephen.** Chevrolet Volt dealers opt out over expensive tools. *CES 2012 Coverage provided by LG*. [Online] dt Digital Trends, Jan 02, 2013. [Cited: Jan 07, 2013.] <http://www.digitaltrends.com/cars/chevrolet-volt-dealers-opt-out-over-expensive-tools/>.
43. **Reynolds, Kim.** Driving the Audi e-tron Concept. *Road Tests*. [Online] MOTOR TREND, Dec 2009. [Cited: Jan 07, 2013.] http://www.motortrend.com/roadtests/alternative/112_0912_audi_e_tron_concept_drive/viewall.html.
44. **Thibaut, Kyle.** In Detail: Audi's etron Program. *Car Technology*. [Online] Translogic Aol Autos, Dec 07, 2011. [Cited: Jan 07, 2013.] <http://translogic.aolautos.com/2011/12/07/in-detail-audis-e-tron-program/>.
45. **Tesla Motors.** Model S. *Tesla*. [Online] Tesla Motors. [Cited: Jan 16, 2014.] <http://www.teslamotors.com/models>.
46. **Weintraub, Seth.** Tesla shores up battery supplies with Panasonic through 2017, capacity to produce well over 300,000 cars. [Online] electrek, Oct 30, 2013.

- [Cited: Jan 16, 2014.] <http://electrek.co/2013/10/30/tesla-shores-up-battery-supplies-with-panasonic-through-2017-capacity-to-produce-well-over-300000-cars/>.
47. **Sturk, David.** *Evaluation of Crash Statistics on Heavy Vehicle Accidents.* Autoliv Research. Vårgårda : Autoliv Development AB, 2012. p. 7, FFI-project report.
48. **Electropaedia.** Battery Management Systems (BMS). *Battery Energy Technologies.* [Online] Electropaedia. [Cited: 03 15, 2014.] <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>.
49. *Så fungerar batterier.* **Behm, Mårten.** Stockholm : KTH Kemiteknik, Tillämpad elektrokemi, 2009.
50. *on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC.* **European Parliament.** Brussels : Official Journal of the European Union, Sept 26, 2006, DIRECTIVE 2006/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, Vol. L 266/1. 2006/66/EC.
51. **Wikipedia.** ZEBRA. *Molten salt battery.* [Online] Wikipedia. [Cited: Feb 05, 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_battery#ZEBRA.
52. —. Think City. [Online] Wikipedia. [Cited: Feb 05, 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Think_City.
53. *Abuse Response of 18650 Li-Ion Cells with Different Cathodes Using EC:EMC/LiPF6 and EC:PC:DMC/LiPF6 Electrolytes.* **Roth, E. P.** 19, s.l. : ECS Translations, 2008, Vol. 11, pp. 19-41. 10.1149/1.2897969.
54. **Sehlstedt, Per.** *Safety mechanisms for lithium ion batteries on cell level.* Gothenburg : Volvo Advanced Technology & Research, 2013. 06120-13-14646-1.
55. *Deremination of Heat of Cumbustion of Fuels by Calculation.* **Bugai, V.T., Oreshenkov, A.V. and Burmistrov, O.A.** 5, s.l. : Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 1998, Vol. 34, pp. 272-274. UDC 621.039.542.4.
56. *Effects of solvents and salt on the thermal stability of charged LiCoO2.* **Wang, Qingsong, et al., et al.** s.l. : Materials Research Bulletin, 2009, Vol. 44, pp. 543-548. DOI: 10.1016/j.materresbull.2008.07.006.
57. *Liquid-Solid Phase Diagrams of Binary Carbonates for Lithium Batteries.* **Ding, Michael S, Xu, Kang and Jow, T Richard.** 5, s.l. : J. of Electrochem. Soc, 2000, Vol. 147, pp. 1688-1694.
58. *Micro calorimeter study on the thermal stability of lithium-ion battery electrolytes.* **Wang, Qingsong, et al., et al.** s.l. : J. of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, Vol. 19, pp. 561-569. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.02.002.
59. **WolframAlpha.** Chemistry. *WolframAlpha.* [Online] [Cited: 17 March 2011.] www.wolframalpha.com/examples/Chemistry.html.
60. Ethyl methyl carbonate. *LookChem.* [Online] [Cited: 17 March 2011.] www.lookchem.com/Ethyl-methyl-carbonate/.
61. **J.T.Baker.** *MSDS Propylene Carbonate.* Philipsburg, NJ : Mallinckrodt Baker, Inc., 2009. MSDS Number: P6873.
62. *Thermal study of organic electrolytes with fully charged cathodic materials of lithium-ion batteries.* **Huang, Qian, Yan, Manming and Jiang, Zhiyu.** s.l. : J. Solid State Electrochem., 2008, Vol. 12, pp. 671-678. DOI 10.1007/s10008-007-0400-7.

63. *Thermal stability of LiPF₆ salt and Li-ion battery electrolytes containing LPF₆*. **Yang, Hui, Zhuang, Guorong V and Ross Jr., Philip N.** s.l. : J. of Power Sources, 2006, Vol. 161, pp. 573-579. doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.03.058.
64. **MedicinesComplete.** Propylene Carbonate. *Pharmaceutical Excipients*. [Online] MedicinesComplete. [Cited: 18 March 2011.] www.medicinescomplete.com.
65. *A Review of Li-Ion Cell Chemistries and their Potential use in Hybrid Electric Vehicles*. **Yang, Hui, o.a., o.a.** 1, u.o. : J. Ind. Eng. Chem., 2006, Vol. 12, ss. 12-38.
66. *Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries*. **Arora, Pankaj and White, Ralph E.** 10, s.l. : J. Electrochem. Soc., 1998, Vol. 145, pp. 3647-3667.
67. *Decomposition reaction of LiPF₆-based electrolytes for lithium ion cells*. **Kawamura, Tetsuya, Okada, Shigeto and Yamaki, Jun-ichi.** s.l. : J. of Power Sources, 2006, Vol. 156, pp. 547-554.
68. *Initial stages of thermal decomposition of LiPF₆-based lithium ion battery electrolytes by detailed Raman and NMR spectroscopy*. **Wilken, Susanne, et al., et al.** s.l. : The Royal Society of Chemistry, June 27, 2013, RSC Advances, pp. 1-6.
69. *Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle*. **Lecocq, Amandine, et al., et al.** Chicago : FIVE 2nd Conference, 2012. pp. 183-193.
70. **International Electrotechnical Commission.** Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects. 4 *IEC/TS 60479-1*. July 2005. 2-8318-8096-3.
71. **Magna Styer Fahrzeugtechnik AG & Co KG.** Safety Guideline for Energy Storage System 120 kW ESS. s.l. : Magna Styer Fahrzeugtechnik AG & Co KG, 2009. 5. IBAN: AT81 3100 0001 0045 2557.
72. **Gas Generation Team.** Is Hydrogen a Safe Gas Chromatography (GC) Carrier Gas? Part 2 of 3. *Gas Generation*. [Online] Parker, May 02, 2013. [Cited: Nov 24, 2013.] <http://blog.parker.com/is-hydrogen-a-safe-gas-chromatography-gc-carrier-gas-part-2-of-3-series>.
73. **Wikipedia.** Carbon monoxide poisoning. [Online] Wikipedia, Publication year unknown. [Cited: Feb 17, 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_monoxide_poisoning.
74. *Carbon Monoxide*. **National Academy of Sciences.** Washington D.C. : s.n., 1977, Vol. pp. 29. ISBN 0-309-02631-8.
75. **Wikipedia.** MOPITT. [Online] Wikipedia. [Citat: den 17 Feb 2013.] <http://en.wikipedia.org/wiki/MOPITT>.
76. **EPA United States Environmental Protection Agency.** An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ). *Indoor Air*. [Online] EPA, Jan 03, 2013. [Cited: Feb 17, 2013.] <http://www.epa.gov/iaq/co.html#Levels>.
77. *What Do Carbon Monoxide Levels Mean? Article #588*. **Gosink, Tom.** s.l. : Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks in cooperation with UAF research community, Jan 28, 1983.
78. **AFS.** *Hygieniska gränsvärden*. s.l. : Arbetsmiljöverkets författningssamling, 2011.
79. *Carbon monoxide poisoning*. **Goldstein, Mark.** 6, Royal Oak, Mich 48073, USA : JEN: Official Publication of the Emergency Department Nurses

- Association , Dec 2008, Journal of Emergency Nursing, Vol. 34.
doi:10.1016/j.jen.2007.11.014; PMID 19022078.
80. *Unintentional carbon monoxide poisoning from an unlikely source.*
Struttmann, T, et al., et al. 6, Lexington, 40504-2915, USA : J Am Board Fam Pract., 1998, Vol. 11, pp. 481-4. PMID: 9876005.
81. **SenseAir.** *Koldioxid - liv och död.* s.l. : SenseAir, 2011.
82. **Almgren, Roger.** *Räddningstjänst vid olycka med gaser.* Sandö : MSB, 2007. ISBN: 978-91-7253-338-7.
83. **Sutherland, Alan.** *AET Insights October 2010.* [Online] AET Insights, Oct 2010. [Cited: Nov 24, 2013.] <http://aetinc.biz/newsletters/2010-insights/october-2010>.
84. **Hathaway, Gloria J, Proctor, Nick H and Hughes, James P.** *Proctor and Hughes' Chemical Hazards of the Workspace.* 4. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 1996. p. 704. ISBN-13: 978-0471287025 / ASIN: 0471287024.
85. **Gosselin, Robert E, et al., et al.** *Clinical Toxicology of Commercial Products.* 5. s.l. : Williams & Wilkins, 1984. p. 2012. ISBN-13: 978-0683036329.
86. **NIOSH.** *Hydrogen Fluoride. IDLH Documentation.* [Online] NIOSH, 16 Aug 1996. [Cited: 20 February 2011.] www.cdc.gov/niosh/idlh/7664393.html.
87. **Apoteket AB.** *Förgiftning Behandlingsanvisningar och antidotlista.* s.l. : Apoteket AB, 2010.
88. **CDC.** *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards. NIOSH Publications and Products.* [Online] Center for Disease Control and Prevention. [Cited: Nov 18, 2013.] <http://www.cdc.gov/niosh/docs/81-123/>.
89. **NIOSH.** *Occupational Health Guideline for Hydrogen Fluoride.* U.S. Department of Health and Human Services, CDC, NIOSH, OSHA. s.l. : U.S. Department of Health and Human Services, 1978 Sept.
90. **Sturk, David.** *Risk Analysis from an EV/HEV collision point of view.* Research. Vårgårda : Autoliv Development AB, 2011. Cooperative. ALR – DS/1109.
91. **CSERE , CSABA .** *Crash Course: How Current Impact Tests Make Cars Safer. Features.* [Online] Car and Driver, Dec 2012. [Cited: Mar 16, 2014.] <http://www.caranddriver.com/features/crash-course-how-current-impact-tests-make-cars-safer-feature>.
92. **Kane, Mark.** 2013 Nissan LEAF Scores Fewer Stars In NHTSA Crash Tests Than 2012 Model (w/video). [Online] InsideEVs, Maj 2013. [Cited: Apr 18, 2014.] <http://insideevs.com/nissan-leaf-scored-4-stars-in-nhtsa-crash-tests-video/>.
93. **TrueCar.** *Safety Spotlight: NHTSA Safety Star Ratings.* [Online] TRUECar, Jul 12, 2010. [Cited: Mar 18, 2014.] <http://blog.truecar.com/2010/07/12/safety-spotlight-nhtsa-safety-star-ratings/>.
94. **FMVSS.** *Electric-Powered Vehicles: Electrolyte Spillage and Electrical Shock Protection.* s.l. : FMVSS, 2011.
95. **Bossche, Peter Van.** *Understanding The Future For IEC EV Battery Standards.* Erasmus University College Brussels. Brussels : IEC TC69, 2011.
96. *Determining The Latest Developments For Producing future EV Battery Standards For Performance Rating, Safety & Abuse Testing, Life Cycle Testing And Crash Integrity Testing.* **Galyen, Bob.** London : SAE International, 2011.
97. **Karlsson, Ingvar, Olsson, Daniel and Tunare, Jens.** *Regulatory requirements and standards in the automotive field - Electric Safety.* Electronics. Borås : SP Technical Research Institute of Sweden, 2011. ISSN 0284-5172.

98. **Claeson, Peter.** *Electric and hybrid road vehicles - Related standards and drafts.* Stockholm : SIS Swedish Standards Institute, 2011. SIS/TK 517/PC.
99. **UL - Underwriters Laboratories Inc.** *Standardd for Batteries for Use in Electric Vehicles.* Chicago : UL - Underwriters Laboratories Inc, 2013. UL 2580.
100. *Thermal behavior and decomposition kinetics of six electrolyte salts by thermal analysis.* **Lu, Zhenrong, Yang, Li and Guo, Yaju.** s.l. : J. of Power Sources, 2006, Vol. 156, pp. 555-559. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.05.085.
101. *Comparison of fire behaviours of an electric-battery powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test.* **Watanabe, Norimichi, et al., et al.** Chicago : FIVE 2nd Conference, 2012. pp. 195-205.

10 Appendix

10.1 SIS - Electric and hybrid road vehicles – Related standards and drafts (2011) [SIS/TK 517/PC]

Global standardisation (ISO and IEC)

ISO/TC 22/SC 21 Electrically propelled vehicles (secr: Germany)

WG 1: Vehicle operation conditions, vehicle safety and energy storage installation

WG 2: Definitions and methods of measurement of vehicle performance and of energy consumption

WG 3: Lithium Ion traction batteries

ISO-standards and drafts*:

ISO 6469-1:2009, ed.2 Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS)

ISO 6469-2:2009, ed.2 Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures

ISO/FDIS 6469-3*

Publication expected soon

Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 3: Protection of persons against electric hazards

ISO/NP 6469-4*

New work item proposal

Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 4: Post crash electrical safety requirements

ISO/DTR 8713*

Publication expected soon

Electric road vehicles – Vocabulary

ISO 8714:2002 Electric road vehicles - Reference energy consumption and range - Test procedures for passenger cars and light commercial vehicles

ISO 8715:2001 Electric road vehicles - Road operating characteristics

ISO/TR 11954:2008 Fuel cell road vehicles - Maximum speed measurement

ISO/TR 11955:2008 Hybrid-electric road vehicles - Guidelines for charge balance measurement

ISO 12405-1

Published September 2011

Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 1: High power applications

ISO/DIS 12405-2*

DIS voting ended May 2011

Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 1: High energy applications

ISO/WD 12405-3*

Draft under development

Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 3: Safety performance requirements

ISO/IEC 15118-1*

DIS version under preparation

Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 1: General information and use-case definition

ISO/IEC 15118-2*

DIS version under preparation

Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 2: Technical protocol description and Open Systems Interconnections (OSI) layer requirements

ISO/IEC 15118-3*

CD voting until 2012-01-04

Road vehicles - Vehicle to grid Communication Interface - Part 3: Physical and data link layer requirements

ISO/NP PAS 16898*

Draft under development

Electrically propelled road vehicles – Battery system design – Requirements on dimensions for lithium-ion cells for vehicle propulsion

ISO/NP 17409*

Draft under development

Electrically propelled road vehicles - Connection to an external electric power supply -

Safety requirements

ISO 23273-1:2006 Fuel cell road vehicles - Safety specifications - Part 1: Vehicle functional safety

ISO 23273-2:2006 Fuel cell road vehicles - Safety specifications - Part 2: Protection against hydrogen

hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen
ISO 23273-3:2006 Fuel cell road vehicles - Safety specifications - Part 3: Protection of persons against electric shock
ISO 23274:2007 Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Non-externally chargeable vehicles
ISO/CD 23274-1*
 CD voting ended Sept 2011
 Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Part 1: Non-externally chargeable vehicles
ISO/DIS 23274-2*
 DIS voting ended Nov 2011
 Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Part 2: Externally chargeable vehicles
ISO 23828:2008 Fuel cell road vehicles - Energy consumption measurement - Part 1: Vehicles fuelled with compressed hydrogen

IEC/TC 69 Electric road vehicles and electric industrial trucks (secr: France)

Active Working Groups :

WG 2: Motors and motor controllers

WG 4: Power supplies and chargers

IEC standards and drafts*, incl. TC 21 (batteries) and SC 23H (connectors):

IEC 61851-1

2nd edition published Dec 2010

Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements

IEC 61851-21

Status of revision*

Electric vehicle conductive charging system - Part 21: Electric vehicle requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply

IEC 61851-22

Status of revision*

Electric vehicle conductive charging system - Part 22: AC electric vehicle charging station

IEC 61851-23* Electric vehicle conductive charging system - Part 23: d.c. electric vehicle charging station

IEC 61851-24* Electric vehicles conductive charging system - Part 24: Control communication protocol between off-board d.c. charger and electric vehicle

IEC 61980-1* Electric equipment for the supply of energy to electric road vehicles using an inductive coupling - Part 1: General requirements

IEC 61982-1

Status of revision*

Secondary batteries (except lithium) for the propulsion of electric road vehicles - Part 1: Test parameters

IEC 61982-2 Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Part 2: Dynamic discharge performance test and dynamic endurance test

IEC 61982-3 Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Part 3: Performance and life testing (traffic compatible, urban use vehicles)

IEC 62196-1

2nd edition published Oct 2011

Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: Charging of electric vehicles up to 250 A a.c. and 400 A d.c.

IEC 62196-2

2nd edition published Oct 2011

Plugs, socket-outlets and vehicle couplers – Conductive charging of electricity vehicles – Part 2: Dimensional interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories

IEC 62196-3* Plugs, socket-outlets, and vehicle couplers - Conductive charging of electric vehicles - Part 3: Dimensional interchangeability requirements for pin and contact-tube coupler with rated operating voltage up to 1 000 V d.c. and rated current up to 400 A for dedicated d.c. charging

IEC/TR 60783 Wiring and connectors for electric road vehicles

IEC/TR 60784 Instrumentation for electric road vehicles

IEC/TR 60785 Rotating machines for electric road vehicles

IEC/TR 60786 Controllers for electric road vehicles

IEC/TS 61382-1 Nickel/cadmium rechargeable cells for vehicle propulsion applications - Part 1: Dynamic discharge performance test (DDPT) and dynamic endurance test (DET)

IEC 62576 Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles - Test methods for electrical characteristics

IEC 62660-1

Published Dec 2010

Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Performance testing for lithium-ion cells and batteries

IEC 62660-2

Published Dec 2010

Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Reliability and abuse testing for lithium-ion cells

European standardisation (EN)

The European standards below are published. Most of these are ISO or IEC standards adopted as EN:s.

New activities started in spring 2010 to review the needs of additional European standards as

a response to European market needs and the EC Directive and Mandate, in the field of electric vehicles and charging infrastructure. CEN, CENELEC and ETSI are involved.

EN standards (CEN):**CR 1955:1995** Proposals for the braking of electrical vehicles**EN 12736:2001** Electrically propelled road vehicles - Airborne acoustical noise of vehicle during charging with on-board chargers - Determination of sound power level**EN 13444-1:2001** Electrically propelled road vehicles - Measurement of emissions of hybrid vehicles - Part 1: Thermal electric hybrid vehicles**EN 13447:2001** Electrically propelled road vehicles - Terminology**EN 1821-1:1996** Electrically propelled road vehicles - Measurement of road operating ability - Part 1: Pure electric vehicles**EN 1821-2:1999** Electrically propelled road vehicles - Measurement of road operating ability - Part 2: Thermal electric hybrid vehicles**EN 1986-1:1997** Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 1: Pure electric vehicles**EN 1986-2:2001** Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 2: Thermal electric hybrid vehicles**EN 1987-1:1997** Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 1: On board energy storage**EN 1987-2:1997** Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 2: Functional safety means and protection against failures**EN 1987-3:1998** Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 3: Protection of users against electrical hazards

Electric_hybrid_vehicles_standards_and_drafts-2011-11-14.doc

IEC 62576 Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles - Test methods for electrical characteristics**IEC 62660-1**

Published Dec 2010

Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Performance testing for lithium-ion cells and batteries

IEC 62660-2

Published Dec 2010

Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles - Reliability and abuse testing for lithium-ion cells

European standardisation (EN)

The European standards below are published. Most of these are ISO or IEC standards adopted as EN:s.

New activities started in spring 2010 to review the needs of additional European standards as

a response to European market needs and the EC Directive and Mandate, in the field of electric vehicles and charging infrastructure. CEN, CENELEC and ETSI are involved.

EN standards (CEN):**CR 1955:1995** Proposals for the braking of electrical vehicles**EN 12736:2001** Electrically propelled road vehicles - Airborne acoustical noise of vehicle during charging with on-board chargers - Determination of sound power level**EN 13444-1:2001** Electrically propelled road vehicles - Measurement of emissions of hybrid vehicles - Part 1: Thermal electric hybrid vehicles**EN 13447:2001** Electrically propelled road vehicles - Terminology**EN 1821-1:1996** Electrically propelled road vehicles - Measurement of road operating ability - Part 1: Pure electric vehicles**EN 1821-2:1999** Electrically propelled road vehicles - Measurement of road operating ability - Part 2: Thermal electric hybrid vehicles**EN 1986-1:1997** Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 1:

Pure electric vehicles

EN 1986-2:2001 Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 2: Thermal electric hybrid vehicles

EN 1987-1:1997 Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 1: On board energy storage

EN 1987-2:1997 Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 2: Functional safety means and protection against failures

EN 1987-3:1998 Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 3: Protection of users against electrical hazards

EN standards (CENELEC):

CLC/prTS 50457-1:2006 Conductive charging for electric vehicles -- Part 1: D.C. charging station

CLC/prTS 50457-2:2006 Conductive charging for electric vehicles -- Part 2: Communication protocol between off-board charger and electric vehicle

EN 61851-22:2002 Electric vehicle conductive charging system -- Part 22: AC electric vehicle charging station

2006/95/EC*

EN 61851-21:2002 Electric vehicle conductive charging system -- Part 21: Electric vehicle requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply

2006/95/EC*

EN 61851-1:2001 Electric vehicle conductive charging system -- Part 1: General requirements

2006/95/EC*

ENV 50275-2-3:1998 Conductive charging for electric vehicles -- Part 2-3: D.C. charging Station

SAE standards and drafts

May not be fully complete or updated.

*: under revision

Hybrid Committee

Document Title

J1654:2004 High Voltage Primary Cable

J1673:1996 High Voltage Automotive Wiring Assembly Design

J1711 Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles

J1715* Hybrid Electric Vehicle (HEV) & Electric Vehicle (EV) Terminology

J1742:2005 Connections for High Voltage On-Board Road Vehicle Electrical Wiring

J1766:2005 Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing

J1772:2010 SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler

J1773:1999* SAE Electric Vehicle Inductively Coupled Charging

J2183:2006 60 V and 600 V Single Core Cables – Test Methods, Dimensions and Requirements (= ISO 6722)

J2289:2000* Electric Driver Battery Pack System Functional Guidelines

J2344:1998* Guidelines for Electric Vehicle Safety

J2464:1999* Electric Vehicle Battery Abuse Testing

J2501:2007 Round, Screened and Unscreened, 60 V and 600 V Multicore Sheathed Cables – Basic and High Performance Test Methods and Requirements (= ISO 14572)

J2578:2002 * Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety

J2698:2008 Primary Single Phase Nominal 120 VAC Wiring Distribution Assembly Design - Truck and Bus

J 2787 Hybrid Terminology

J2836/1 Use Cases for Communication between Plug-in Vehicles and the Utility Grid

J2836/2 Use Cases for Communication between Plug-in Vehicles and the Supply Equipment (EVSE)

J2836/3 Use Cases for Communication between Plug-in Vehicles and the Utility Grid for Reverse Power Flow

J2841 Definition of the Utility Factor for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using NHTS Data

J2847/1 Communication between Plug-in Vehicles and the Utility Grid

J2847/2 Communication between Plug-in Vehicles and the Supply Equipment (EVSE)

J2847/3 Communication between Plug-in Vehicles and the Utility Grid for Reverse Power Flow

J2929:2011 Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard - Lithium-based Rechargeable Cells

5(5)

Date Reference

2011-11-14 SIS/TK 517/PC

Electric_hybrid_vehicles_standards_and_drafts-2011-11-14.doc

Truck and Bus Advanced and Hybrid Powertrain Committee

Document Title

J1264:1986 Joint Rccc/SAE Fuel Consumption Test Procedure (Short Term In-Service Vehicle) Type I

J1321:1986 Joint Tmc/SAE Fuel Consumption Test Procedure-Type Ii

J1526:1987 Joint Tmc/SAE Fuel Consumption In-Service Test Procedure Type Iii

J695:1998 Turning Ability and Off Tracking--Motor Vehicles

UL Safety Standards (Underwriters Laboratories)

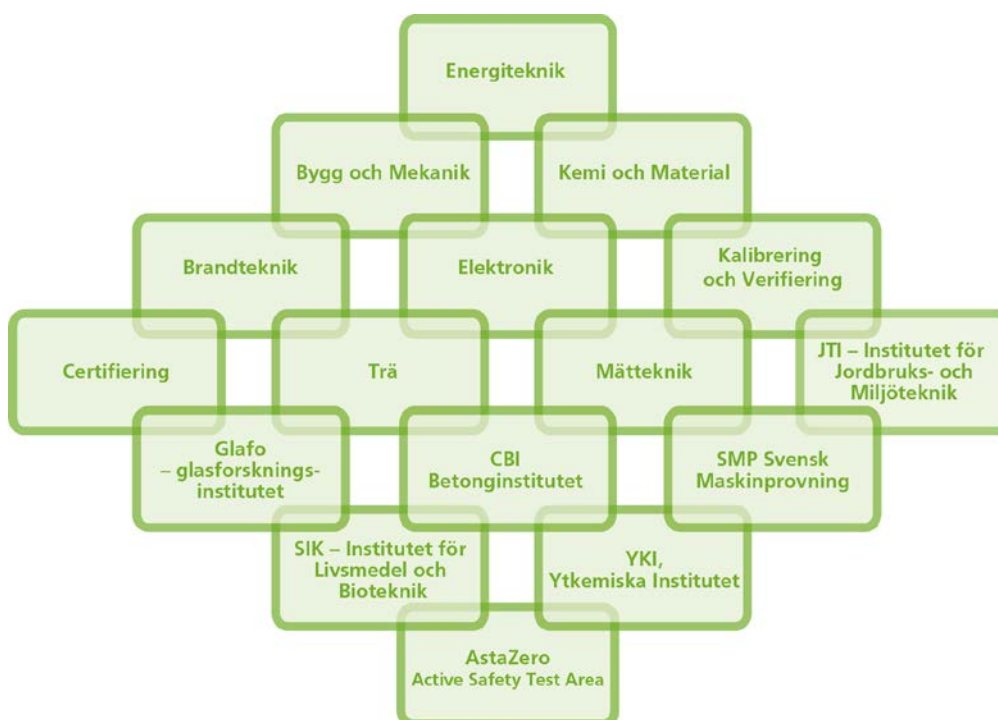
May not be fully complete or updated.

Document Title

- UL 1564:2006** Industrial battery chargers
- UL1642:2005** Safety of Lithium-Ion Batteries – Testing
- UL 2202:2009** Electric vehicle Charging System Equipment (2nd edition)
- UL 2231-1:2002*** Personnel Protection Systems for EV Supply Circuits: Part 1: General Requirements
- UL 2231-2:2002*** Personnel Protection Systems for Electric Vehicle (EV) Supply Circuits: Particular Requirements for Protection Devices for Use in Charging Systems
- UL 2251:2002*** Plugs, Receptacles and Couplers for EVs
- UL 2580:2009** Outline of Investigation for Batteries for use in Electric Vehicles
- UL 2594:2009** Outline of Investigation for Electric Vehicle Supply Circuit

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Vi arbetar med innovation och värdeskapande teknikutveckling. Genom att vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling har vi stor betydelse för näringslivets konkurrenskraft och hållbara utveckling. Vår forskning sker i nära samarbete med universitet och högskolor och bland våra cirka 10000 kunder finns allt från nytänkande småföretag till internationella koncerner.



Företagsnamn? Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon?

Epost?: info@sp.se, Internet:: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

Enhetsnamn?

SPRapport?: 2013:58

ISBN 978-91-87461-44-6

ISSN 0284-5172



SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.

