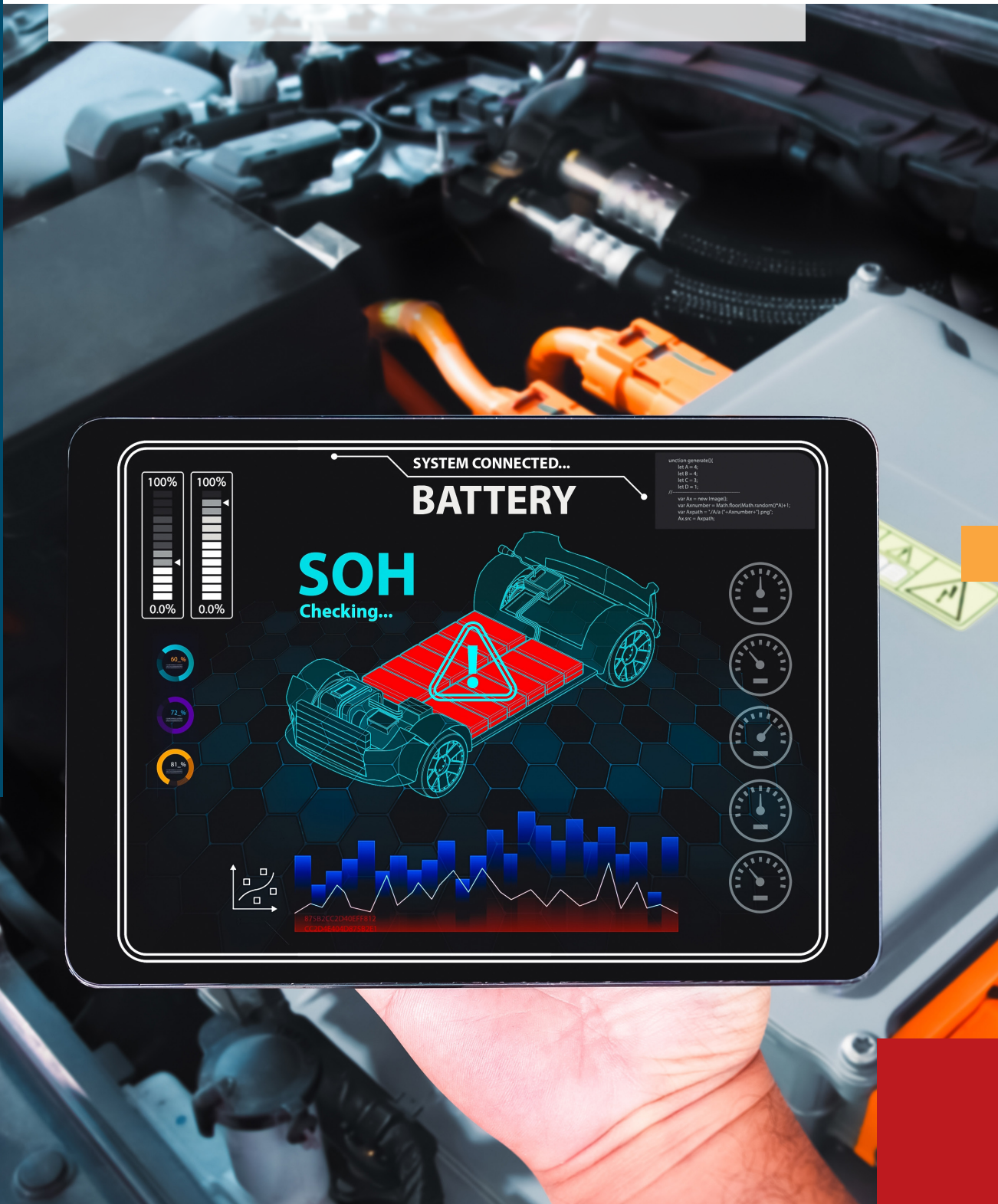


Batterijmanagementsysteem en thermal runaway



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2025

Auteurs	T. van Harn, J. Reinders
Contactpersoon	T. van Harn
Datum	23 april 2025

Foto cover	Shutterstock
------------	--------------

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

	Abstract	4
	Samenvatting	5
	Inleiding	6
1	Systeembeschrijving	9
1.1	Opbouw van een batterijpakket	9
1.2	Functie en werking van een BMS	10
2	Veiligheidsniveau BMS	14
3	Een BMS en thermal runaway	16
3.1	Spanning-, stroom- en temperatuurmetingen	16
3.2	Wat doet een BMS om een thermal runaway te voorkomen?	18
3.3	Ontwikkelingen	19
4	Het BMS in de praktijk	21
4.1	Het BMS van Tesla	21
4.2	Zelfbouw BMS'en	29
5	Conclusies	31
	Referentielijst	33

Abstract

Lithium-ion batteries play an important role in the energy transition as a carrier of sustainably generated energy. This means that the safety risks associated with the use of lithium-ion batteries, such as the thermal runaway, will also become more important. In order to prevent a thermal runaway, it is necessary to obtain information about the internal condition of the battery by performing control measurements of certain parameters. This is done by the Battery Management System (BMS), which monitors and manages the data from these measurements. The aim of this research is to gain insight into the way a BMS functions, and the role it plays or can play in the prevention of a thermal runaway. Based on a literature study and discussions with experts, the following can be stated:

A BMS aims to keep the battery operating safely, optimise its performance and maximise its lifetime. Data obtained via measurements in batteries or battery packs are analysed and evaluated via algorithms. The current, voltage and temperature of battery cells are important input parameters. Based on these data, the algorithms take decisions that control the battery system. To prevent overheating, the BMS can, for example, switch off battery cells, modules or the entire battery system, along with any charging currents. Also (automatic) warnings can be issued. In addition, the BMS can control impact-reducing measures.

BMSs are tailored to the battery system to which they are connected. Nevertheless, some general configurations can be distinguished: centralized, modulated, distributed and decentralized. These mainly differ in the way in which a BMS performs measurements and controls the system. Important here are the number of battery cells, the method of monitoring and the number of parameters to be measured and controlled.

Many processes that take place inside the battery cell are still unknown. Therefore, research is carried on this subject. For example, methods are being investigated to enable early detection of factors that can lead to a thermal runaway. Relevant developments in this area are gas detection and impedance measurements.

Furthermore, there is a focus on improving the algorithms that are used to determine the safety level of a battery (pack) based on the various input parameters. For example, the combination and analysis of large amounts of data leads to improved algorithms.

Samenvatting

Lithium-ion batterijen spelen in de energietransitie een belangrijke rol als drager van duurzaam opgewekte energie. Dit betekent dat de veiligheidsrisico's verbonden aan het gebruik van lithium-ion batterijen, zoals een thermal runaway, ook belangrijker zullen worden. Om een thermal runaway te kunnen voorkomen, is het noodzakelijk informatie te verkrijgen over de toestand van de batterij door het uitvoeren van controlemetingen van bepaalde parameters. Dit gebeurt door het Batterij Management Systeem (BMS), dat de data uit deze metingen monitort en beheert. Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de werking van een BMS, en de rol die het speelt of kan spelen bij de preventie van een thermal runaway. Op basis van een literatuurstudie en gesprekken komt het volgende naar voren:

Een BMS heeft als doel om de batterij veilig te laten functioneren, de prestaties te optimaliseren en de levensduur te maximaliseren. Data, verkregen via metingen in batterijen worden via algoritmes geanalyseerd en geëvalueerd. De stroom, spanning en temperatuur van batterijcellen zijn belangrijke invoerparameters. Op basis van gemeten parameters nemen algoritmes beslissingen, waarmee het batterijsysteem wordt aangestuurd. Een BMS kan bij afwijkende metingen ingrijpen door de desbetreffende cel, module of het gehele pakket en eventuele laadstromen uit te schakelen. Daarnaast kunnen ook (automatische) waarschuwingen worden gegeven en kan het BMS effectbeperkende maatregelen aansturen.

Er zijn veel verschillende batterijsystemen en BMS'en worden afgestemd op het batterijsysteem waarop ze zijn aangesloten. Niettemin kunnen enkele algemene configuraties worden onderscheiden: gecentraliseerd, gemoduleerd, gedistribueerd en gedecentraliseerd. Deze verschillen vooral in de manier waarop een BMS metingen uitvoert en het systeem aanstuurt. Van belang hierbij zijn het aantal batterijcellen, de wijze van monitoring, de vereiste mate van nauwkeurigheid en het aantal te meten en beheersen parameters.

Er is nog veel onbekend over de precieze processen die zich binnenin batterijcellen afspelen. Naar deze processen wordt dan ook het nodige onderzoek gedaan. Veel onderzoek richt zich hierbij op methodes waarmee factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden eerder gedetecteerd kunnen worden. Zoals gasdetectie en impedantiemetingen.

Verder richt men zich ook op verbetering van de algoritmes die gebruikt worden om op basis van deze factoren het veiligheidsniveau van een batterij vast te stellen. Zo leidt combinatie en analyse van grote hoeveelheden data tot verbetering van algoritmes.

Inleiding

Het lectoraat Energie- en Transportveiligheid verricht onderzoek naar de risico's voor de omgeving en de brandweer die verbonden zijn aan de energietransitie. Lithium-ion batterijen spelen in de energietransitie een belangrijke rol als drager van duurzaam opgewekte energie. Dit betekent dat de veiligheidsrisico's verbonden aan het gebruik van lithium-ion batterijen ook belangrijker zullen worden. De zogenaamde thermal runaway is een van die risico's. Hierdoor ontstaan ongewenste reacties in de batterijcel, waarbij brandbare en giftige gassen worden gevormd. Deze reacties genereren hitte die tot nog verdere opwarming leidt, waardoor aangrenzende batterijcellen ook oververhit raken. Dit resulteert in een zichzelf in standhoudend hitte-genererend (exotherm) proces dat zich van cel naar cel door een batterijpakket kan verspreiden.

De gevormde gassen zorgen voor drukopbouw in het batterijpakket. Er zal een afblaasklep openen of het batterijpakket zal openbreken. Als het (brandbare) gas ontsteekt, ontstaan fakkels, die branduitbreiding naar de omgeving tot gevolg kunnen hebben. Als het gas niet (direct) ontsteekt, kan een explosief gasmengsel worden gevormd. De toxische gassen kunnen bij inademing gezondheidsschade veroorzaken. Het zoveel mogelijk beperken van deze risico's is derhalve van belang voor een veilige energietransitie (NIPV, 2023b).

Er bestaan de nodige documenten die inzicht geven in de wijze waarop deze risico's kunnen worden beheerst, zoals de [aandachtskaart lithium-ion energiedragers](#). Deze richten zich met name op het beperken van de *gevolgen* van een (beginnende) thermal runaway. Om een thermal-runaway te kunnen *voorkomen*, is het belangrijk informatie te verkrijgen over de toestand van de batterij door het uitvoeren van controlemetingen van parameters die bij afwijkingen mogelijk kunnen leiden tot een thermal runaway. Dit gebeurt door het Batterij Management Systeem (BMS), dat de data uit deze metingen monitort en beheert.

Doelstelling, vraagstelling en afbakening

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in de werking van een BMS, en de rol die het speelt of kan spelen bij de preventie van een thermal runaway.

Hiertoe zijn de volgende vragen opgesteld:

1. Wat is het doel van een BMS?
2. Wat is het basisprincipe van een BMS?
3. Van welke parameters maakt een BMS gebruik?
4. Welke verschillende typen BMS'en zijn er?
5. Hoe draagt een BMS bij aan veiligheid?
6. Welke rol speelt een BMS in het voorkomen en inperken van de effecten van een thermal runaway?
7. Wat zijn de ontwikkelingen rondom BMS'en in het voorkomen en bestrijden van een thermal runaway?

Dit onderzoek richt zich op oplaadbare batterijen en batterijsystemen van het type lithium-ion.

Onderzoeksmethode

Allereerst is door middel van zoektermen in Google Scholar naar wetenschappelijke literatuur gezocht. De volgende zoektermen zijn gebruikt:

- > Battery management system safety
- > Battery management system thermal runaway
- > Battery management systems battery monitoring
- > Thermal runaway early detection battery management system.

Met deze zoektermen zijn verschillende wetenschappelijke artikelen gevonden. Drie artikelen waaruit veel relevante informatie is verkregen, zijn opgenomen in Tabel I.1.

Tabel I.1 Toelichting gebruikte literatuur

Titel – Tijdschrift	Verkregen informatie	Referentie in rapport
A novel compact thermal management model for performance evaluation of tesla-like lithium-ion battery packs - <i>Energy Conversion and Management</i> 300	Licht de in een Tesla batterijmodule toegepaste en andere mogelijke methoden toe voor het koelen van batterijen, en de rol die een BMS daarin speelt.	(Afraz et al., 2024)
Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV applications - <i>IEEE Access</i>	Door het toelichten van diverse begrippen draagt dit overzichtsartikel bij aan het verkrijgen van inzicht in de werking van BMS'en.	(Kumar et al., 2023)
Critical review and functional safety of a battery management system for large-scale lithium-ion battery pack technologies - <i>International Journal of Coal Science & Technology</i>	Dit artikel geeft een toelichting op verschillende BMS-configuraties, en de manier waarop een BMS bijdraagt aan het inperken van risico's.	(See et al., 2022)

Naast literatuur zijn met de genoemde zoektermen via Google ook webpagina's met bruikbare informatie gevonden, zoals:

- > De servicewebsite van Tesla¹ waar een toelichting wordt gegeven op BMS'en in de batterijsystemen die door Tesla worden toepast.
- > De website van het bedrijf MOKO Energy², waar ingenieurs van het bedrijf die zich bezighouden met het ontwikkelen van BMS'en uitleg geven over diverse onderwerpen.

¹ Service.tesla.com.

² Mokoenergy.com.

Aanvullende informatie is verkregen uit het boek *Electrochemical power sources: fundamentals, systems, and applications – Li-Battery Safety*³ (Garche & Brandt, 2019). Daarnaast contact gezocht met professor T. Donkers (TU Eindhoven) en B. van der Weerd (Huawei). Professor Donkers houdt zich onder meer bezig met het optimaliseren van BMS-algoritmes. De heer van der Weerd werkt bij Huawei aan technologische innovaties binnen de energieopslagsector, waaronder veilig energiebeheer⁴.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 worden de algemene aspecten van BMS'en behandeld, zoals de mogelijke functionaliteiten. Hoofdstuk 2 omschrijft hoe BMS'en bijdragen aan het veilig functioneren van batterijsystemen. In hoofdstuk 3 wordt toegelicht hoe een BMS metingen uitvoert en welke rol een BMS speelt bij het voorkomen en inperken van de effecten van een thermal runaway. Hoofdstuk 4 geeft een praktijkvoorbeeld van een BMS. Hoofdstuk 5 bevat de conclusies waarin de onderzoeksvragen worden beantwoord.

³ <https://www.sciencedirect.com/book/9780444637772/electrochemical-power-sources-fundamentals-systems-and-applications>.

⁴ Verwijzingen naar informatie in dit rapport verkregen via deze contacten zal worden weergegeven als (Donkers, 2024) of (van der Weerd, 2024).

1 Systeembeschrijving

De behoefte aan een Battery Management Systeem (verder: BMS) ontstond begin jaren 90 toen de eerste lithium-ion batterijen op de markt kwamen. Deze batterijen leverden een hogere energiedichtheid, maar hun gevoeligheid voor bijvoorbeeld overladen maakte de toepassing van meer verfijnde managementsystemen noodzakelijk. Met de komst van steeds meer elektrische toepassingen, zoals voertuigen en energieopslagsystemen waarin grote hoeveelheden batterijcellen worden gebruikt, hebben BMS'en een grotere rol gekregen binnen batterijsystemen (Kumar et al., 2023; MPS, n.d.).

1.1 Opbouw van een batterijpakket

Het hebben van inzicht in de opbouw van een batterijpakket helpt bij het begrijpen van de werking van een BMS. In deze paragraaf worden mogelijke manieren toegelicht waarop batterijpakketten kunnen zijn opgebouwd .

Batterijpakketten zijn opgebouwd uit batterijcellen die met elkaar zijn verbonden. Dit gebeurt in serie- en parallelverbindingen. Om de wijze waarop ze met elkaar worden verbonden vast te stellen, zijn de gewenste energie-inhoud of capaciteit (kWh) en het (piek)vermogen (kW) van belang. Dit is vereenvoudigd geïllustreerd met vier lithium-ion batterijcellen (type 18650; 3,8 V, 3,2 Ah, zie ook paragraaf 4.1.1.) in Figuur 1.1 op de volgende pagina.

Voor capaciteit en vermogen gelden de volgende formules⁵:

$$E = P \times t \text{ (capaciteit)} \quad (1)$$

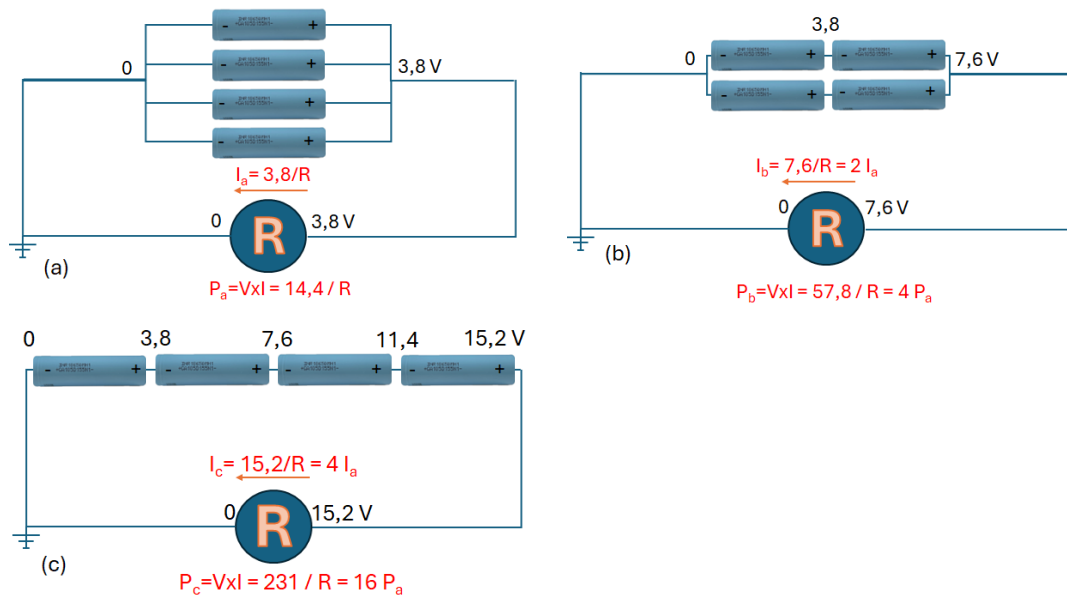
$$P = V \times I = I^2 \times R \text{ (elektrisch vermogen)} \quad (2)$$

Verder geldt:⁵

$$V = I \times R \text{ (wet van Ohm)} \quad (3)$$

In deze formules is V de spanning (in Volt), I de stroom (in Ampères), R de weerstand van het systeem waaraan energie wordt geleverd (in Ohm); P het vermogen (in Watt); E de capaciteit (in Wh), t de tijd dat energie wordt geleverd (in s). Elke batterijcel levert $3,8 \text{ V} \times 3,2 \text{ Ah} = 12,16 \text{ Wh}$. Dat is dus $48,6 \text{ Wh}$ in totaal voor vier cellen.

⁵ [Ohms Law Tutorial and Power in Electrical Circuits.](#)



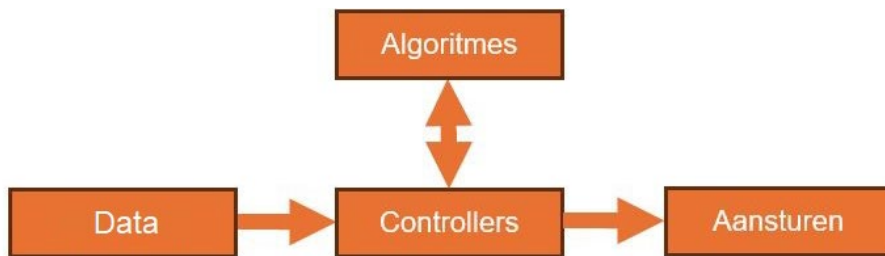
Figuur 1.1 Voorbeelden van in serie en parallel verbonden batterijcellen

Indien alle batterijen parallel zijn verbonden (Figuur 1.1a), zal de spanning 3,8 V bedragen en de stroom gelijk zijn aan $I_a = 3,8 / R$. Het vermogen $P_a = 14,4 / R$. Indien alle vier de batterijcellen in serie zijn geschakeld (Figuur 1.1c), zal de spanning gelijk zijn aan $4 \times 3,8 = 15,2$ V. De stroom zal dan ook vier keer zo groot zijn dan bij de parallelschakeling in Figuur 1.1a. Het (piek)vermogen wordt hierdoor zestien keer zo hoog. Indien twee batterijen in serie en twee parallel zijn geschakeld (Figuur 1.1b), zullen de stroom en spanning twee keer de waarde van één cel hebben en het vermogen vier keer. Uiteraard zal de tijd dat een groter vermogen kan worden geleverd, worden beperkt door de totale capaciteit van de vier batterijcellen: uit formule (3) hierboven: $t = E/P$, waarin $E = 48,6$ Wh.

In werkelijkheid bevatten batterijpakketten vaak tientallen tot duizenden cellen met meerdere combinaties van parallelle en serie schakelingen, waardoor spanningen van honderden Volts en capaciteiten van vele kWh worden gehaald. Hierbij worden meerdere batterijcellen gecombineerd tot een module en meerdere modules tot een batterijpakket (zie ook paragraaf 4.1). Meerdere batterijpakketten samen kunnen een energie(opslag)stelsel vormen.

1.2 Functie en werking van een BMS

Een BMS heeft als doel om een batterij veilig te laten functioneren, de prestaties te optimaliseren en de levensduur te maximaliseren (Natarajan, 2022; MPS, n.d.). De werking van een BMS wordt weergegeven in Figuur 1.2. Binnen de batterij worden via metingen data verkregen die via algoritmes worden geanalyseerd en geëvalueerd. Op basis hiervan nemen de algoritmes beslissingen, waarop controllers het batterijsysteem aansturen. Data in de vorm van spanning-, stroom- en temperatuurmetingen zijn de belangrijkste inputparameters van een BMS. Deze drie parameters worden namelijk door batterijcellen zelf gegenereerd. Wanneer de waarden van deze parameters buiten de grenswaarden liggen, is dit een indicatie dat er iets mis is in de betreffende batterijcel. Daarnaast kunnen veel processen worden uitgevoerd op basis van deze drie parameters (van der Weerd, 2024; See et al., 2022).



Figuur 1.2 Het basisprincipe van een BMS

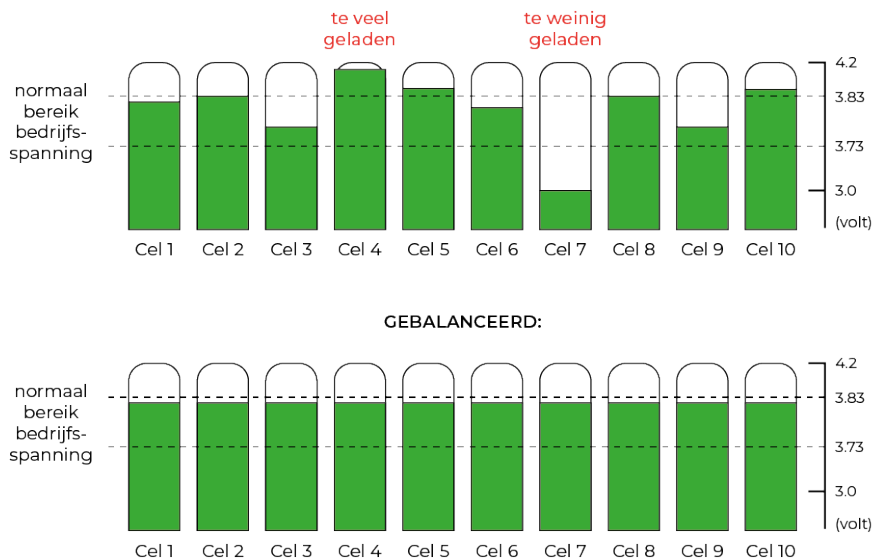
Een BMS kan diverse taken uitvoeren, vaak zijn dit (van der Weerd, 2024; Kumar et al., 2023) de volgende:

- > Balanceren⁶ van de individuele batterijcellen binnen een batterijpakket. Dit betekent dat de ladingsniveaus van de individuele cellen binnen een batterijpakket aan elkaar gelijk worden gemaakt. Dit voorkomt zogenaamde ‘cell drift’, waarbij bepaalde cellen steeds te ver worden opgeladen of ontladen, en zorgt voor een gelijke belasting van de individuele batterijcellen (zie Figuur 1.3; de bovenste groep cellen hebben ‘cell drift’ en de onderste groep is gebalanceerd). Balanceren kan op twee manieren:
 - Passief balanceren is de meest gebruikte methode. Wanneer de batterijcel een hogere spanning heeft dan de andere, wordt de overtollige energie met een weerstand omgezet in warmte, totdat de batterijcel een overeenkomende spanning heeft met de andere cellen.
 - Actief balanceren: overtollige energie van een cel met een te hoge spanning wordt overgedragen aan cellen met een lagere spanning. Een voordeel van actief balanceren ten opzichte van passief balanceren is dat de energie niet verloren gaat.
- > Beheren van de batterijtemperatuur voor optimale prestaties.
- > Berekenen van de state of charge⁷ (SOC).
- > Het tijdig stoppen van het op- en ontladproces om diepontladen en overladen te voorkomen.

De spanning (voltage) in een batterijcel neemt toe als de cel wordt opgeladen en neemt af bij ontlading. De gespecificeerde spanning (bedrijfsspanning) van een cel is ‘een gemiddelde waarde’ van het voltage waarbij de batterij volledig is opgeladen en het voltage waarbij de cel zijn laatste hoeveelheid opgeslagen energie heeft afgegeven. Bepaalde types en merken (niet oplaadbare) AA-batterijen bevatten al geruime tijd een metertje waarmee te zien is hoe vol de batterij nog is. Dit metertje werkt op basis van de hoeveelheid spanning die de batterij nog afgeeft (Donkers, 2024).

⁶ [The Significance of Cell Balancing in Lithium Packs.](#)

⁷ Het percentage dat aangeeft hoeveel energie er nog in de batterij zit, dus tot hoever de batterij is ontladen.



Figuur 1.3 Cell drift (AP Hogeschool Antwerpen, n.d.)

Er zijn veel verschillende batterijsystemen. Een BMS moet worden afgestemd op de specifieke eisen van het batterijsysteem waarin het toegepast wordt. Factoren die hierbij een rol spelen zijn bijvoorbeeld (See et al., 2022):

- > Verschillende batterijtypes kunnen verschillende meetnauwkeurigheden vereisen. Zo vereisen LFP-batterijen⁸ een hogere nauwkeurigheid voor het meten van de spanning over individuele cellen dan NMC-batterijen⁹ doordat over een groot SOC-gebied de spanning minder afneemt bij een afnemende hoeveelheid energie in de batterij.
- > Een BMS kan worden betrokken bij het aansturen van verschillende installaties in de toepassing waarin de batterij zich bevindt. In de automotive sector beheert een BMS bijvoorbeeld de opslag van energie die wordt teruggewonnen bij het remmen van een auto. Hiervoor zijn extra sensoren vereist, die bijvoorbeeld de posities van het gas- en rempedaal kunnen meten, en algoritmes.
- > Er zijn extra hardware- en softwaretoepassingen nodig wanneer een BMS de gezondheidsstatus, resterende cycluslevensduur, onderhoudsactiviteiten en/of storingen van een batterijsysteem moet weergeven.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen vier verschillende BMS-configuraties (Liu, 2023; See et al., 2022):

1. **Gecentraliseerd:** alle batterijcellen worden bewaakt en beheerd door een unit¹⁰. Deze configuratie is vooral geschikt voor kleinere batterijsystemen met een gering aantal cellen, bijvoorbeeld een fietsbatterij.
2. **Gemoduleerd:** het totale aantal batterijcellen binnen het systeem wordt onderverdeeld in kleinere gelijke hoeveelheden, die elk worden aangesloten op identieke subunits die data meten. De subunits sturen de gemeten data door naar een masterunit die het batterijsysteem in zijn geheel aanstuurt en communiceert met andere systemen in de toepassing waarin het batterijsysteem is geïmplementeerd. Deze configuratie wordt voornamelijk toegepast in grotere batterijsystemen, bijvoorbeeld in elektrische voertuigen of energieopslagsystemen.

⁸ Lithium-ijzerfosfaat.

⁹ Nikkel-mangaan-kobalt.

¹⁰ Een chip of printplaat waarmee batterijcellen verbonden zijn.

3. **Gedistribueerd:** ook hier wordt het totale aantal batterijcellen binnen het systeem onderverdeeld in kleinere gelijke hoeveelheden, die elk worden aangesloten op identieke subunits. De subunits meten nu echter niet alleen data van de batterijcellen waarop ze zijn aangesloten, maar nemen ook een deel van de aansturingstaken over van de masterunit. In deze configuratie worden kleinere aantallen batterijcellen aangestuurd, wat voordelen biedt voor de efficiëntie van het systeem. Zo kan er meer aandacht worden besteed aan het voorkomen van 'cell drift'. Ook wordt de rekenkracht meer onderverdeeld en komt niet alles neer op de masterunit, waardoor het BMS sneller wordt. Het kan per systeem verschillen welke taken worden uitgevoerd door de subunits of de masterunit. De masterunit heeft in deze configuratie voornamelijk de taak om te communiceren met andere systemen in de toepassing waarin het batterijsysteem is geïmplementeerd, zoals het doorgeven van het ladingsniveau (SOC) aan het systeem dat dit weer moet geven. Ook deze configuratie wordt voornamelijk toegepast in grotere batterijsystemen, bijvoorbeeld in elektrische voertuigen of energieopslagsystemen.
4. **Gedecentraliseerd:** bij deze configuratie bevat een batterijsysteem meerdere batterij-modules en/of -pakketten die ieder een eigen BMS hebben. Deze units communiceren direct met elkaar en niet via een masterunit. Dit heeft als voordeel dat een fout in een module of pakket, of in de masterunit geen invloed heeft op de rest van het systeem.

2 Veiligheidsniveau BMS

Een taak van het BMS is ervoor te zorgen dat de veiligheidsrisico's van het gebruik van lithium-ion batterijsystemen op een acceptabel niveau blijven. Volgens (See et al., 2022) betreffen deze veiligheidsrisico's:

- > gevaarlijke situaties waarbij personen letsel of gezondheidsschade kunnen oplopen
- > schade die aan de apparatuur of in de omgeving kan ontstaan.

Omdat batterijen voor veel verschillende toepassing worden ingezet, zal het vereiste veiligheidsniveau voor BMS'en ook vaak verschillen. Zo kan een storing in medische apparatuur levensbedreigend zijn, terwijl in andere toepassingen, zoals bijvoorbeeld doe-het-zelfgereedschap, de gevolgen doorgaans minder ernstig zijn. Daarnaast spelen omgevingsfactoren een rol. BMS'en die worden blootgesteld aan hoge temperaturen of aan trillingen moeten voldoen aan strengere eisen dan BMS'en die moeten werken in omgevingen met betere omstandigheden voor de batterij (See et al., 2022). Daarnaast spelen ook kosten een rol. Voldoen aan een hoger veiligheidsniveau brengt in het algemeen meer kosten met zich mee (Garche & Brandt, 2019).

Om het vereiste veiligheidsniveau te bepalen is het mogelijk principes van 'functional safety' te hanteren zoals uiteengezet in IEC 61508 of ISO 26262 (See et al., 2022). Een BMS moet dan voldoen aan standaarden waarin staat aangegeven wat het minimale veiligheidsniveau moet zijn. De IEC 61508 is de overkoepelende veiligheidsnorm voor programmeerbare elektronische veiligheidssystemen. Op deze norm zijn verschillende standaarden gebaseerd voor specifieke industrieën die omschrijven van welke veiligheidsmaatregelen een BMS moet zijn voorzien, en aan welke veiligheidsniveaus (uitgedrukt in Safety Integrity Levels of SILs) deze moeten voldoen. Iedere veiligheidsmaatregel binnen het systeem kan dus een ander niveau hebben. De veiligheidsmaatregelen hebben als doel om een (bepaald deel van) het systeem in een veilige toestand te houden of te brengen, wanneer er een (potentieel) gevaarlijke gebeurtenis plaatsvindt. Een hoger veiligheidsniveau kan bijvoorbeeld worden verkregen door (See et al., 2022):

- > extra sensoren: bijvoorbeeld vochtsensoren wanneer er een grote kans is op vocht in de batterij
- > dubbele onderdelen (redundantie): wanneer een onderdeel binnen een veiligheidsmaatregel faalt, zoals een schakelaar die de stroomtoevoer vanuit batterijcellen kan stoppen, neemt een reserveonderdeel de taak over, waardoor de maatregel blijft werken.

Het equivalent van de IEC 61508 voor de auto-industrie is ISO 26262. In deze richtlijn wordt gesproken over Automotive Safety Integrity Levels (ASIL's). Er wordt onderscheid gemaakt in ASIL A, B, C en D. Hierin is ASIL A het minst strenge en ASIL D het strengste veiligheidsniveau (See et al., 2022).

Het aantal veiligheidsniveaus en de manier waarop ze worden aangeduid, kan per standaard verschillen. Een andere standaard die gebaseerd is op IEC 61508 is ISO 13849, specifiek voor de machinebouw en industriële automatisering. Deze norm gebruikt Performance Levels (PL), variërend van PL a tot PL e, waarbij PL a het laagste veiligheidsniveau is en

PL e het hoogste. Deze standaarden stellen fabrikanten in staat om het veiligheidsniveau van machinesystemen in te schatten en aan te passen aan de risico's die bij de toepassing horen (Kader, n.d.).

Aan welk veiligheidsniveau een toepassing moet voldoen binnen een standaard, wordt bepaald door het uitvoeren van een risicoanalyse waarin wordt gekeken naar de wijzen van falen van verschillende maatregelen en de kansen daarop, bijvoorbeeld via een FMEDA.¹¹ Om deze kansen te bepalen, wordt gerekend met de kans op het falen van de verschillende componenten binnen een veiligheidsmaatregel (See et al., 2022).

Na de productie doorlopen BMS'en testprogramma's om te beoordelen of ze aan de verwachte betrouwbaarheid voldoen. Een belangrijk aspect hierbinnen is de frequentie waarmee data moeten worden gemeten. Veiligheidskritische parameters (zoals de temperatuur) moeten met een hogere frequentie worden gemeten dan minder kritische parameters (See et al., 2022).

¹¹ Failure Modes, Effects and Diagnostics Analysis: deze risicoanalyse geeft een gedetailleerd overzicht van verschillende faalmodi en diagnostische mogelijkheden van apparatuur of componenten (See et al., 2022).

3 Een BMS en thermal runaway

Batterijcellen kunnen intern beschadigd raken door elektrische, mechanische en thermische oorzaken, bijvoorbeeld door respectievelijk overbelasting, doorboring of oververhitting (NIPV, 2023). Wanneer batterijcellen intern beschadigd raken, kunnen ze in een thermal runaway raken, waardoor drie effecten op kunnen treden (NIPV, 2023):

- > brand
- > explosie
- > toxische wolk

Door het meten van de spanning, de stroom en de temperatuur kan een BMS detecteren dat er iets mis is in de batterijcel. De spanning, stroom en temperatuur zullen afwijken wanneer er defecten in de cel zijn die zijn ontstaan door de eerder genoemde elektrische, mechanische of thermische oorzaken. Met deze drie parameters (spanning, de stroom en temperatuur), kunnen afgeleide parameters worden bepaald die ook aangeven dat er mogelijk problemen zijn met de batterijcel. Zo kan een afwijkende interne weerstand¹² ontstaan, wanneer bepaalde onderdelen in de batterijcel slijten. Een verhoogde interne weerstand is terug te zien in een lagere stroom (van der Weerd, 2024).

State of health

Fabrikanten willen graag aangeven hoe lang de batterij nog mee kan. De State of Health (verder: SOH) is een parameter die mede bepaalt wanneer een batterij aan vervanging toe is (Donkers, 2024). De SOH van een batterij is gedefinieerd als de actuele batterijcapaciteit uitgedrukt als percentage van de nominale capaciteit, ofwel als percentage van de capaciteit in nieuwstaat (Kumar et al., 2023; See et al., 2022). Volgens (Kumar et al., 2023) is monitoren van de SOH essentieel voor het veilig functioneren van de batterij. De SOH wordt niet direct gemeten, maar door algoritmen in het BMS berekend, of eigenlijk geschat, op basis van de verschillende gemeten parameters, waaronder stroom, spanning en temperatuur. De SOH is moeilijk exact vast te stellen, omdat veranderingen in parameters die worden gebruikt om SOH te bepalen, afhankelijk zijn van de omstandigheden waarin een batterij wordt en werd gebruikt. Wordt een batterij onder omstandigheden gebruikt die niet optimaal zijn, dan kan de SOH sneller achteruit gaan. Fabrikanten gebruiken verschillende methodes om de SOH te bepalen.

3.1 Spanning-, stroom- en temperatuurmetingen

Batterijmodules zijn opgebouwd uit individuele batterijcellen. Dit kunnen grotere hoeveelheden cellen van een kleiner formaat en lagere capaciteit zijn, of kleinere hoeveelheden cellen van een groter formaat en hogere capaciteit. Batterijen opgebouwd uit cellen van een kleiner formaat en lagere capaciteit zullen om de gewenste capaciteit te verkrijgen zijn onderverdeeld in meerdere parallelle groepen. Deze parallelle groepen worden door een

¹² Een batterijcel bevat componenten die weerstand bieden tegen elektronen wanneer deze door de batterij getransporteerd worden. De totale weerstand van alle componenten in de batterijcel wordt de interne weerstand genoemd.

BMS op het gebied van spanning in het algemeen als één cel gezien. De spanning van een groep parallel geschakelde cellen blijft namelijk hetzelfde, ongeacht het aantal batterijcellen in een parallelle groep (zie Figuur 1.1a) (See et al., 2022; Garche & Brandt, 2019).

Wanneer er een probleem is met een individuele cel binnen een parallel geschakelde groep, bijvoorbeeld door een verhoogde interne weerstand, een lagere spanning¹³ of wanneer de spanning volledig uitvalt, zal er minder stroom door deze cel gaan. Het BMS registreert dit door een afname van de stroom door de hele groep. De totale stroom van de parallel geschakelde groep is immers gelijk aan de stroom door alle individuele batterijcellen bij elkaar opgeteld. Daarnaast zal een defecte cel hoogstwaarschijnlijk de energie niet goed in zich opnemen tijdens het laadproces. Dit leidt tot een afwijkende hoeveelheid totale opgenomen energie ten opzichte van andere parallelle groepen binnen de module. Dit kan door een BMS worden waargenomen. In het geval van een kortsluiting in een van de cellen binnen een parallelle groep, zal alle stroom uit de overige cellen binnen de groep zich gaan verplaatsen naar deze kortgesloten cel. Dit is terug te zien in de totale stroom (en ook spanning) van de groep parallel geschakelde cellen (Donkers, 2024).

Om een juiste en veilige spanningsbalans tussen de batterijcellen te garanderen, is het belangrijk om spanning en stroom van elke batterijcel te meten (van der Weerd, 2024). Hoe meer cellen in de batterijmodule worden gemeten, hoe meer controle een BMS heeft over de cellen. Spanning- en stroommetingen vinden plaats voor iedere batterijcel die in serie geschakeld is. Er zijn ook systemen die alle individuele cellen in een parallelle groep monitoren, met name systemen die een hoger veiligheidsniveau¹⁴ vereisen (Donkers, 2024).

Er zijn batterijcellen op de markt van verschillende formaten. Denk bij een grote cel aan een rechthoekige vorm van 50 x 50 x 2 cm (Donkers, 2024) en bij een kleine cel aan een cilindrische vorm met een lengte van 6,5 cm en een diameter van 1,8 cm (het eerder genoemde type 18650).

De hedendaagse trend gaat over het algemeen in de richting van systemen die gebruikmaken van kleinere hoeveelheden batterijcellen van een groter formaat en een grotere capaciteit, die in serie worden geschakeld. Kleinere hoeveelheden maken het gemakkelijker om alle batterijcellen individueel te meten en aan te sturen, waardoor een BMS dus controle heeft over alle individuele batterijcellen, en niet over groepen batterijcellen (Donkers, 2024).

Een andere parameter die een mogelijk probleem aantoont in een batterijcel is een te sterk oplopende temperatuur. Een BMS kan temperatuurmetingen uitvoeren aan de hand van temperatuursensoren op individuele batterijcellen of op moduleniveau. Temperatuurmetingen doen op celniveau gaat het gemakkelijkst door sensoren aan te brengen op de buitenkant van de batterijcel. Temperatuurmetingen binnenin de cellen zijn lastiger te produceren (van der Weerd, 2024).

Grotere batterijsystemen bevatten koelsystemen, waarin een koelmedium (vaak lucht of een vloeistof) dat de warmte opneemt, langs batterijcellen wordt geleid. De mate waarin het koelmedium opwarmt, geeft inzicht in de hoeveelheden warmte die batterijcellen afgeven (Afriz et al., 2024). Dit koelmedium kan trouwens ook worden gebruikt om de batterij op te warmen tot de gewenste bedrijfstemperatuur.

¹³ De hoeveelheid stroom (ampère) die een batterijcel levert, neemt af met afnemende spanning (volt).

¹⁴ Meer informatie over het veiligheidsniveau is gegeven in hoofdstuk 2.

3.2 Wat doet een BMS om een thermal runaway te voorkomen?

Een basisfunctionaliteit van een BMS is om voor een goede balans te zorgen tussen batterijcellen onderling en het afvoeren van door de batterijcellen gegenereerde warmte. Dit draagt naast het zorgen voor optimale prestaties en levensduur ook bij aan het voorkomen van factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden (van der Weerd, 2024; Kumar et al., 2023).

Zoals eerder beschreven, kan een BMS elektrische en thermische afwijkingen detecteren. Wanneer afwijkingen worden waargenomen, kan een BMS ingrijpen door:

- > De betreffende cel, groep cellen of het gehele batterijsysteem waartoe de desbetreffende cel behoort uit te schakelen, waardoor verdere schade wordt voorkomen (Donkers, 2024).
- > Het geven van waarschuwingssignalen. Dit kan op verschillende manieren en niveaus. Zo kan een lamp nabij het batterijsysteem rood oplichten wanneer er potentieel gevaar is. Waarschuwingen op celniveau zijn het meest geavanceerd. Bijvoorbeeld 'cel 23 in module 2 is uitgeschakeld, omdat deze waarschijnlijk defect is'. Deze melding kan op verschillende manieren worden weergegeven, zoals op een display nabij het batterijsysteem of een telefoon. De personen die dit waarschuwingssignaal ontvangen, zijn op de hoogte van een protocol, waardoor zij weten hoe er gehandeld moet worden. Ook kan de manier van handelen worden weergegeven in de melding (van der Weerd, 2024).

Wanneer een batterijcel intern beschadigd raakt door elektrische, mechanische of thermische oorzaken waardoor er daadwerkelijk een thermal runaway plaatsvindt, kan een BMS dit proces niet meer stoppen. Een BMS moet dus door middel van het detecteren en reguleren van factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden, bijdragen aan het voorkomen daarvan (Donkers, 2024; Conzen et al., 2023; See et al., 2022).

Wel kan een BMS maatregelen aansturen die ten doel hebben om de effecten van een thermal runaway te beheersen. Zo kan een BMS de koeling intensiveren van een module waarin een thermal runaway plaatsvindt. Ook kan een blusgassysteem door een BMS worden geactiveerd en een rookgasafvoer worden aangestuurd. Maar zoals gezegd, dit zijn maatregelen die alleen effecten beheersen. Zo nemen blusgassen wel hitte weg, maar kunnen ze een thermal runaway niet stoppen. Het doel van maatregelen als deze is om de thermal runaway zo gecontroleerd mogelijk te laten verlopen en de schade te beperken tot bijvoorbeeld één module, die naderhand vervangen kan worden, of om personen meer tijd te geven om zich in veiligheid te brengen (van der Weerd, 2024).

Andere technieken

Naast het detecteren van potentiële risico's door metingen kunnen ook andere maatregelen bijdragen aan het voorkomen of beperken van de effecten van een thermal runaway. Zo dienen de 'fuse wires' in het batterijpakket van Tesla (toegelicht in paragraaf 4.1.1, zichtbaar in Figuur 4.1) niet alleen als verbinding tussen batterijcellen, maar ook als zekering. Ze zijn namelijk zo ontworpen dat ze direct doorbranden wanneer de hoeveelheid stroom die erdoorheen loopt te groot is, wat het geval is bij kortsluiting in een parallelle groep, zoals uitgelegd in paragraaf 3.1 (Bhowmick, 2021). Hiermee wordt voorkomen dat er stroom door de kortgesloten cel blijft stromen en er oververhitting ontstaat.

Om de kans op beschadigingen door externe impact of kortsluiting te verkleinen, worden batterijmodules (in auto's) in stevige constructies en waterdichte omhullingen geplaatst. Röntgenfoto's van batterijpakketten uit elektrische voertuigen die bij een crash betrokken zijn geweest, tonen dan ook nauwelijks zichtbare beschadigingen. Hieruit blijkt dat de constructies waarin de batterijmodules worden geplaatst, zo stevig zijn dat een thermal runaway kan worden voorkomen (Donkers, 2024). Ook uit de [Database Incidenten met Alternatief Aangedreven Voertuigen](#) van het NIPV blijkt dat batterijpakketten zelden ontbranden wanneer elektrische auto's betrokken zijn bij een ongeluk.

Batterijcellen kunnen thermisch en/of elektrisch van elkaar worden geïsoleerd om de kans op propagatie van een thermal runaway naar andere batterijcellen te verlagen, of de effecten een langere tijd ingeperkt te houden, zodat mensen meer tijd hebben om zich in veiligheid te brengen (Donkers, 2024; van der Weerd, 2024).

3.3 Ontwikkelingen

Het detecteren van afwijkingen gebeurt momenteel nog voornamelijk op basis van de parameters stroom, spanning en temperatuur. Veel van de processen die zich binnen in de batterijcel afspelen, zijn nog onbekend. Er wordt dan ook veel onderzoek naar gedaan. Zo worden methoden onderzocht waarmee factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden, eerder gedetecteerd kunnen worden. Hierdoor kan er ook eerder worden ingegrepen, waardoor de kans dat er daadwerkelijk een thermal runaway plaatsvindt, kleiner wordt (Donkers, 2024). Zo wordt er gekeken naar vlambogen, die karakteristieke frequenties in ruispatronen hebben die door geluidssensoren kunnen worden waargenomen via akoestische metingen. Wanneer in bijvoorbeeld beschadigde schakelaars of bekabeling een vlamboog in het systeem ontstaat, kan de cel, module of het pakket waarin dit gebeurt, uitgeschakeld worden, waardoor schade aan batterijcellen die kan leiden tot een thermal runaway wordt voorkomen (van der Weerd, 2024). Daarnaast wordt onderzoek gedaan naar gassensoren die gassen voor, of in een vroeg stadium van, een thermal runaway kunnen detecteren (X.-X. Wang et al., 2024).

Hoewel het doen van metingen binnenin batterijcellen uitdagingen met zich meebrengt op het gebied van productie (zie paragraaf 3.1), kunnen deze metingen wel bijdragen aan een vroegtijdige detectie van afwijkingen. Zo wordt een temperatuurstijging eerder binnen in de batterijcel gedetecteerd dan erbuiten (Garche & Brandt, 2019). De volgende zaken op het gebied van metingen zijn in ontwikkeling:

- > Er wordt onderzoek verricht naar het detecteren van lithiumneerslag. Deze ontstaat gedurende de levensduur van de batterij en kan de batterij intern beschadigen, waardoor een thermal runaway kan ontstaan (Donkers, 2024).
- > Tijdens de levensduur van een batterij veroorzaken de verschillende interne chemische en fysische processen veranderingen, bijvoorbeeld in de elektrolyt. Hierdoor neemt de geleidbaarheid af en dus de elektrische weerstand toe. De mate waarin chemische en fysische veranderingen hebben plaatsgevonden, kan worden gemeten door een wisselstroom door de batterij te geleiden. De weerstand die wisselstroom ondervindt, wordt reactantie genoemd. Chemische en fysische veranderingen in de batterij hebben invloed op de reactantie. Het meten van de reactantie wordt een impedantiemeting¹⁵

¹⁵ Dit is de EIS-methode (Electrical Impedance Spectroscopy). Hierbij wordt een kleine sinusvormige stroom door een batterij gestuurd en wordt de resulterende spanning gemeten. Dit gebeurt met verschillende frequenties.

genoemd. Omdat de altijd aanwezige interne weerstand door de componenten van de batterij ook weerstand biedt tegen wisselstroom, is de impedantie de interne weerstand, met daarbij opgeteld de reactantie. Impedantiemetingen worden door het BMS geanalyseerd. Indien de gedetecteerde chemische en fysische veranderingen buiten vastgestelde grenzen liggen kan dit wijzen op mogelijke afwijkingen van de lithium-ion batterijen (X.-X. Wang et al., 2024; X. Wang et al., 2021).

De hedendaagse trend is het gebruik van minder, maar grotere batterijcellen met een hogere capaciteit. Dit leidt ertoe dat er minder cellen nodig zijn in een pakket, wat resulteert in compactere batterijpakketten. Een gevolg daarvan is dat er minder verbindingen met een BMS nodig zijn, waardoor de kans op falen van een BMS kleiner wordt (Subramaniam, 2022).

Grotere cellen betekent dat er meer (anode- en kathode-)materiaal in één cel moet worden gestopt ('gevouwen'). De scherpte waarmee anode- en kathodematerialen worden gevouwen, heeft invloed op de hoeveelheid die in een cel past. Meerdere vouwen en meer materiaal in een cel maken de kans op falen echter groter. Ook heeft meer materiaal in een cel invloed op de thermische regulatie.¹⁶ Hoewel onderzoek plaatsvindt naar optimalisatie van dit proces, is het de vraag of door deze ontwikkelingen batterijcellen daadwerkelijk veiliger worden (van der Weerd, 2024).

Technisch gezien zou het mogelijk moeten zijn om te detecteren in welke cel of module een thermal runaway in een batterijpakket is begonnen. Auto's bevatten vaak een simkaart waarmee de gegevens van een BMS naar een applicatie of Cloud doorgestuurd kunnen worden. Met name combinatie en analyse van de grote hoeveelheden Cloud-data kan tot verbetering van algoritmes leiden. Dit kan mogelijk van waarde zijn bij het achterhalen van de oorzaken van incidenten (Donkers, 2024).

¹⁶ Warmtetransport uit de cel naar buiten en de manier waarop cellen gekoeld moeten worden.

4 Het BMS in de praktijk

Afhankelijk van de toepassing kan een BMS bestaan uit een kleine chip die een batterijcel aanstuurt (bijvoorbeeld in een mobiele telefoon of elektrische tandenborstel), een enkele printplaat die verschillende batterijcellen aanstuurt (in fietsaccu's) of een geavanceerd (computer)systeem bestaande uit meerdere componenten (Donkers, 2024; van der Weerd, 2024). Op de opbouw van dit laatste zal in onderstaande paragrafen worden ingegaan aan de hand van een voorbeeldsysteem van Tesla.

4.1 Het BMS van Tesla

Tesla is sinds het begin van de deze eeuw aanwezig in de automotive industrie met een groot aanbod aan batterij-aangedreven elektrische voertuigen. Tesla investeert in samenwerkingen met de industrie en academische instellingen om de batterijproductie en onderzoeksactiviteiten op te schalen (MSG Equipment, 2023; Subramaniam, 2022).

In 2012 lanceerde Tesla de Model S. Het batterijpakket in deze auto legde de basis voor Tesla's schaalbare batterijtechnologie. Dit batterijpakket is toegepast in auto's die zijn geproduceerd tot het jaar 2021. Momenteel rijden er naar schatting in Nederland nog ongeveer 31.000 personenauto's met dit batterijpakket (Kenteken.tv, 2024). BMS'en van Tesla maken gebruik van technieken die de algoritmes tijdens gebruik optimaliseren, hetgeen onder meer bijdraagt aan een langere levensduur (Link Sun International, 2024).

Uiteraard zijn de algoritmes en de detectiemethoden in modernere systemen in vele opzichten verbeterd (Xray, 2024), maar de algemene werkingsprincipes zijn voor een groot deel nog steeds hetzelfde en goed zichtbaar in dit systeem. Zo worden de batterijcellen nog steeds gemonitord op basis van temperatuur-, stroom- en spanningsmetingen. Deze batterijsystemen worden ook veel gebruikt voor onderzoeksdoeleinden, bijvoorbeeld om thermisch beheer in batterijsystemen te optimaliseren (Afrac et al., 2024). Hierdoor is er veel informatie over beschikbaar. Om deze redenen zien wij het BMS behorende bij dit batterijsysteem als een interessant voorbeeld, dat verderop zal worden toegelicht.

Om inzicht te verkrijgen in de werking van een BMS, wordt achtergrondinformatie over de opbouw van de batterijpakketten gegeven. Dit maakt tevens het verschil inzichtelijk tussen BMS'en uit oudere (paragraaf 4.1.1) en nieuwere batterijpakketten (paragraaf 4.1.2). Inmiddels worden modules uit deze batterijpakketten ook ingezet voor andere doeleinden waarin een BMS een rol speelt. Dit wordt toegelicht in paragraaf 4.2.

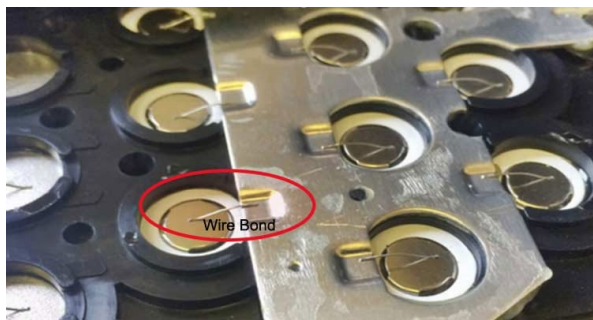
4.1.1 Cilindrische NCA-batterijen

De batterijcellen die vanaf 2012 in de batterijpakketten van Tesla werden gebruikt, waren cilindrische NCA¹⁷-batterijcellen. In totaal bevat een dergelijk batterijpakket 7104 NCA-batterijcellen die met elkaar samenwerken (Afrac et al., 2024; Sharma et al., 2019).

¹⁷ Nikkel-kobalt-aluminium, type 18650 (MSG Equipment, 2023).

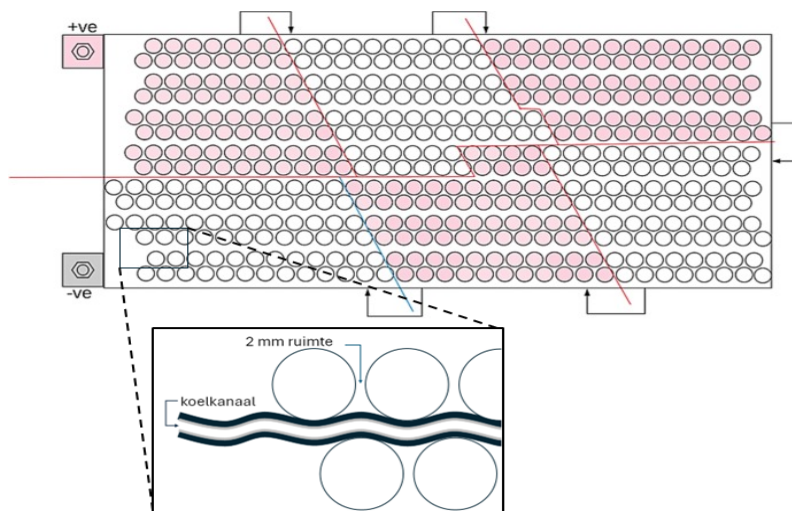
De 7104 batterijcellen zijn onderverdeeld in 16 modules van elk 444 batterijcellen. Om de gewenste capaciteit te verkrijgen, zijn deze 444 batterijcellen in de module onderverdeeld in zes groepen van ieder 74 parallel geschakelde batterijcellen. Deze zes groepen zijn samen in serie geschakeld om het gewenste voltage te verkrijgen. Het totale voltage van een module is $6 \times 3,8 = 22,8$ volt. De zestien modules samen leveren een totale spanning van ongeveer 400 volt (Afraz et al., 2024)

Om de losse batterijcellen in de module met elkaar te verbinden, worden de plus- en de minpolen met draadjes aan geleidende platen verbonden (Popp et al., 2023). Deze draadjes, ook wel 'wire bonds' of 'fuse wires' genoemd, worden weergegeven in Figuur 4.1 (Bhowmick, 2021).



Figuur 4.1 Draadverbinding tussen verschillende cellen (Bhowmick, 2021)

In de zes verschillende parallel geschakelde groepen worden de batterijen afwisselend met de plus- of minpool naar boven of beneden in de module geplaatst. De indeling van de batterijcellen in de module is weergegeven in Figuur 4.2.

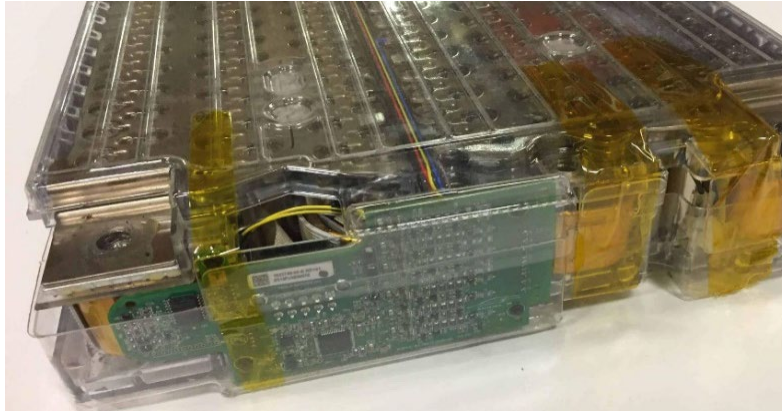


Figuur 4.2 Verdeling tussen batterijcellen in een module met uitvergroet het koelsysteem (op basis van Afraz et al., 2024; Sharma et al., 2019)

De roze batterijcellen in Figuur 4.2 zijn met de pluspool naar boven geplaatst, de witte met de minpool. In het bovenste deel van Figuur 4.2 is zichtbaar dat de cellen zijn gepositioneerd als zeven dubbele rijen. Tussen de dubbele rijen is ruimte voor koelkanalen waardoor koelmiddel loopt, weergegeven in uitvergroete deel van Figuur 4.2 (zie Figuur 4.6 voor het gehele koelkanaal). De ruimte tussen twee naburige batterijcellen is 2 millimeter. Deze ruimte is opgevuld met brandvertragend materiaal ontworpen om het gas te kunnen afvoeren

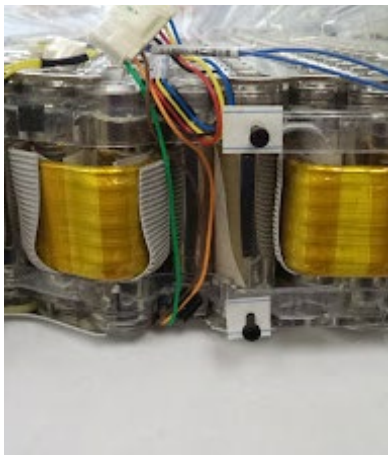
dat kan ontstaan als gevolg van reacties in de batterij (Afraz et al., 2024; Sharma et al., 2019).

In Figuur 4.3 is de batterijmodule weergegeven. De printplaat aan de voorzijde is een sub-unit. Deze is verantwoordelijk voor het balanceren van de zes parallel geschakelde groepen en het monitoren van de temperatuur van de batterijcellen, en wordt uiteindelijk verbonden met de masterunit (Bhowmick, 2021). Het batterijpakket maakt dus gebruik van een gedistribueerde BMS-configuratie (zie hoofdstuk 1), omdat iedere module een eigen subunit bevat die specifieke taken uitvoert.



Figuur 4.3 Batterijmodule (EV Europe, n.d.)

De rood-, geel- en blauwgekleurde draden aan de bovenzijde van de module in Figuur 4.3 zijn verbonden met drie van de zes parallel geschakelde groepen. In Figuur 4.4 is te zien dat uit de onderzijde van de module een groene, bruine en oranje draad komen, die elk verbonden zijn aan de overige drie van de zes parallel geschakelde groepen (Bhowmick, 2021).

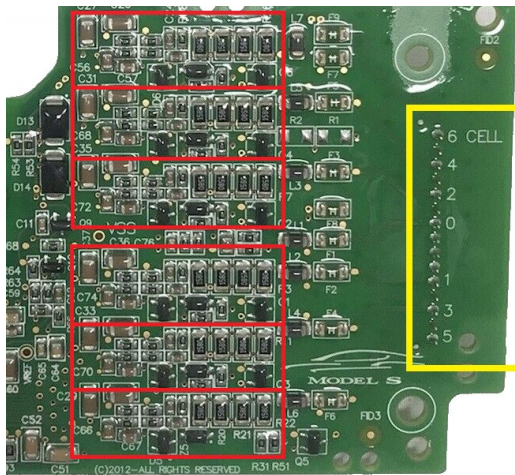


Figuur 4.4 Draden voor stroom- en spanningsmonitoring (William, 2016a)

Via deze zes gekleurde draden worden de spanning en stroom van de zes parallelle groepen gemeten en de balans ertussen gereguleerd. De zwarte draad is de nuldraad die dient als referentiepunt voor de metingen (EV West, 2021).

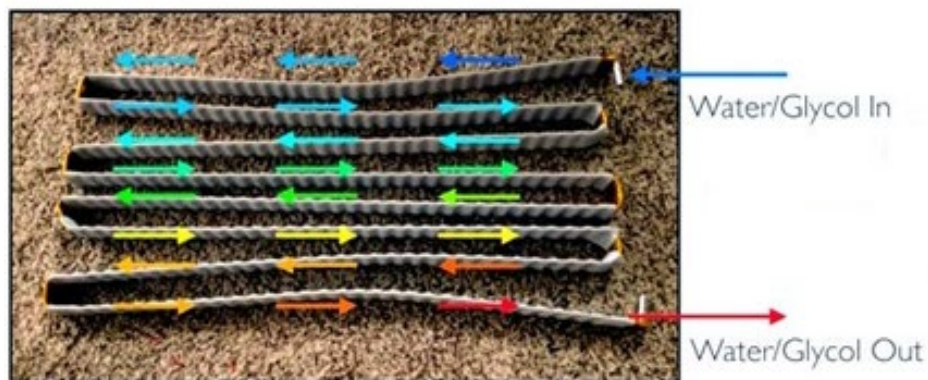
In Figuur 4.5 is de voorzijde van de subunit weergegeven. De zes gekleurde draden worden ieder aangesloten aan de aansluitpunten die in de gele rechthoek worden weergegeven. Met zes rode vakjes worden de locaties van de groepen microchips aangegeven, die de data

vanuit de draden verwerken om de zes groepen te balanceren en monitoren (Bhowmick, 2021).



Figuur 4.5 Voorzijde BMS dochterbord (Bhowmick, 2021)

Bij het op- en ontladen van de batterijcellen komt warmte vrij. Om deze warmte af te voeren, waarmee oververhitting wordt voorkomen en de prestaties van de batterijcellen worden geoptimaliseerd, wordt koelvloeistof¹⁸ door koelkanalen gepompt¹⁹ (zie Figuur 4.6).



Figuur 4.6 Warmtewisselaar in de module (Bhowmick, 2021)

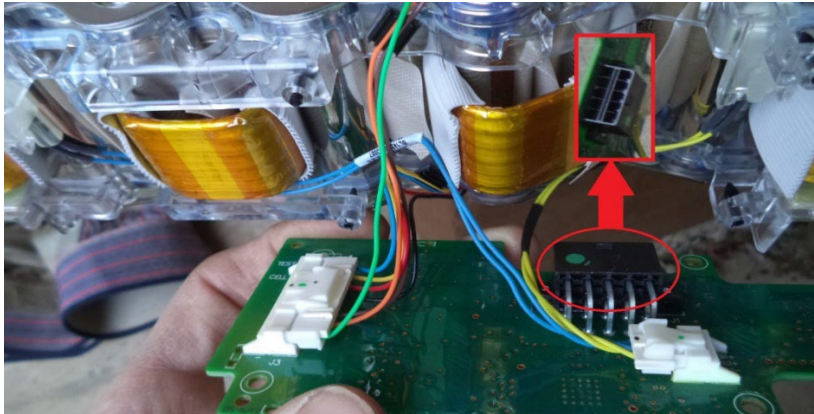
Om het koelkanaal zit isolatie om elektrische geleiding te voorkomen, thermisch geleidt dit materiaal uiteraard wel. De warmtewisselaar heeft een golvend patroon om het contactoppervlak met de batterijcellen en dus het koelvermogen te vergroten. Dit is eveneens weergegeven in Figuur 4.2. Via een warmtewisselaar wordt de koelvloeistof gekoeld. Door de koelvloeistoftemperatuur op twee punten in de warmtewisselaar te meten, kan het temperatuurverschil tussen deze punten worden bepaald. Op basis van dit verschil bepaalt de BMS-subunit de benodigde koelcapaciteit binnen de module. Tevens kan op deze manier een overmatige hoeveelheid warmte worden gemeten (Afraz et al., 2024; Rosenberger et al., 2024; Bhowmick, 2021; Shama et al., 2019).

De twee blauwe en gele draden die zijn aangesloten op de subunit in Figuur 4.7, zijn afkomstig van de temperatuursensoren, in dit geval thermistors. Het principe van deze

¹⁸ Een mengsel van water en glycol (Bhowmick, 2021). Overigens kan onder koude omgevingscondities dit systeem ook worden gebruikt om de batterij op te warmen.

¹⁹ Aluminium buis (Afraz et al., 2024).

sensoren is gebaseerd op het gegeven dat de weerstand die een elektronenstroom ondervindt wanneer deze door een thermistor stroomt, afhankelijk is van de omgevingstemperatuur. Met de zwarte connector rechtsboven (rode pijl), wordt de subunit verbonden met de masterunit (EV West, 2021; Bhowmick, 2021).



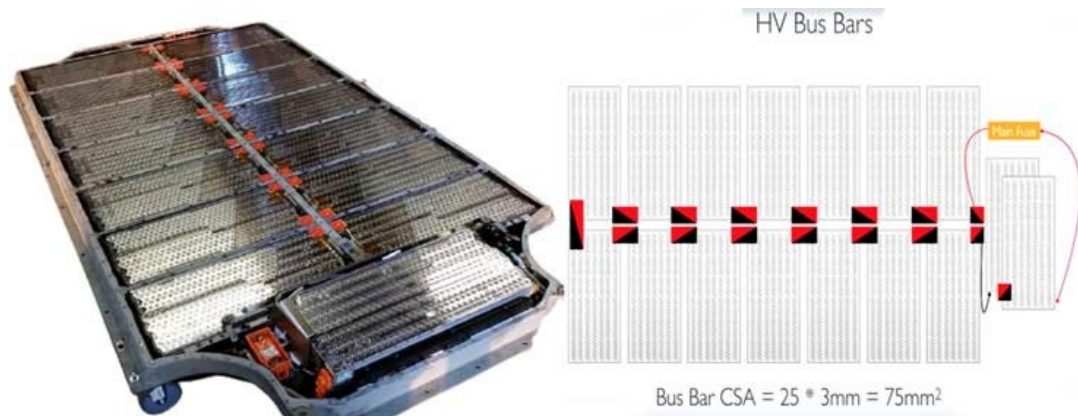
Figuur 4.7 Achterzijde BMS-subunit (William, 2016b)

De zestien modules worden in een frame geplaatst met vakken die voor de modules zijn ontworpen. De wanden van de vakken zijn zodanig vormgegeven, dat de modules thermisch zijn geïsoleerd om overdracht van warmte naar naburige modules te voorkomen. Daarnaast is het frame zo ontworpen dat het weerstand biedt tegen impact door bijvoorbeeld een ongeluk (Bhowmick, 2021). Het frame wordt weergegeven in Figuur 4.8. De gele pijlen wijzen naar de stekkers die aan de subunits worden gekoppeld om deze te verbinden met de masterunit. De paarse pijl wijst naar de koelvloeistofpomp, die in verbinding staat met de masterunit (Jehugarcia, 2017).



Figuur 4.8 Tesla model S batterijpakket frame (Jehugarcia, 2017)

Het totale batterijpakket wordt in Figuur 4.9 weergegeven: links een foto en rechts een schematisch overzicht van de configuratie van de modules. In het schematische overzicht geeft de rode kleur de positieve, en de zwarte kleur de negatieve polen van de modules in het batterijpakket weer. Aan het uiteinde (in de figuur rechts) van het pakket zijn twee modules op elkaar gestapeld. De positieve en negatieve polen worden met koper gecoate platen met elkaar verbonden (Bhowmick, 2021).



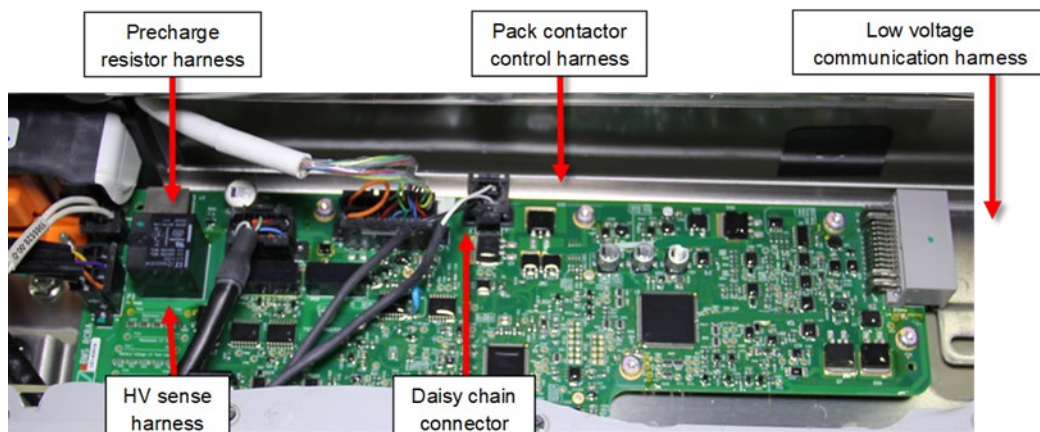
Figuur 4.9 Batterijpakket en configuratie (Bhowmick, 2021)

De masterunit, waarmee alle subunits in verbinding staan, is de printplaat die is weergegeven middels de paarse pijl in Figuur 4.10. In de oranje kast, links naast de masterunit (op de foto van het batterijpakket in Figuur 4.9 linksboven), wordt de hoogspanning gereguleerd (Tanim & Prucha, 2024). Deze kast is aangesloten op de masterunit, omdat de regulatie wordt uitgevoerd op basis van informatie die de masterunit geeft. De masterunit communiceert ook met de overige elektrische systemen in het voertuig, zoals de elektromotor, de lader en de schakelaars om het batterijpakket aan en uit te schakelen (Tesla, 2024a; Manly Batteries, 2021).



Figuur 4.10 Tesla masterunit (Tesla, 2024a)

Details van de masterunit zijn weergegeven in Figuur 4.11.



Figuur 4.11 BMS-masterunit (Tesla, 2024b)

In Figuur 4.12 is de schakelaar weergegeven waarmee het batterijpakket in- en uitgeschakeld kan worden. Deze wordt aangestuurd via de 'daisy chain connector' vanaf de masterunit (zie Figuur 4.11) (Tesla, 2024b).



Figuur 4.12 Schakelaar batterijpakket (Tesla, 2024b)

4.1.2 Prismatische LFP-batterijen

Na het gebruik van NCA-batterijcellen is Tesla begonnen met het ontwikkelen van batterijpakketten met andere types batterijcellen. Vanaf 2013 zijn NMC-batterijcellen gebruikt in 'long-range-modellen', omdat deze een hogere energiedichtheid hebben, wat resulteert in een hogere actieradius. Deze batterijen worden nog steeds gebruikt in nieuwe long range modellen (MSG Equipment, 2023).

Vanaf 2020 gebruikt Tesla prismatische²⁰ LFP²¹-batterijcellen in de 'standard-range-modellen'. Deze hebben een lagere energiedichtheid vergeleken met NMC-batterijcellen, maar bieden voordelen qua levensduur en veiligheid (MSG Equipment, 2023). LFP-batterijcellen zijn thermisch stabiel (Walvekar et al., 2022). Dit type batterijcellen is onder andere toegepast in Tesla Model 3. Batterijpakketten waarin prismatische LFP-batterijcellen worden toegepast, bestaan uit vier langwerpige modules, elk met een rij batterijcellen. De

²⁰ Vorm van een rechthoek.

²¹ Lithium-ijzer-fosfaat.

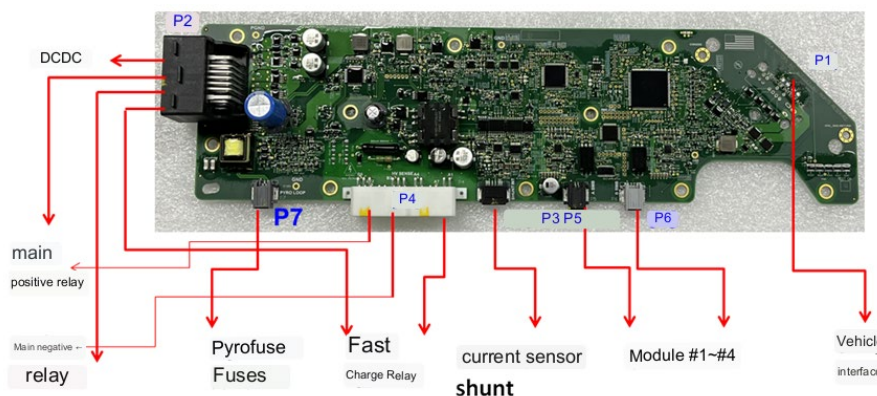
twee buitenste modules bevatten vijftientig in serie geschakelde batterijcellen, de twee binnenste achtentwintig (Rosenberger et al., 2024).

Alle modules en batterijcellen zijn in serie geschakeld. Vergelijken met het batterijpakket dat Tesla eerder had ontwikkeld (paragraaf 4.1.1), worden in dit batterijpakket alle batterijcellen gemonitord. Dit gebeurt middels tussenunits, waarvan er een is weergegeven in Figuur 4.13 (Rosenberger et al., 2024).

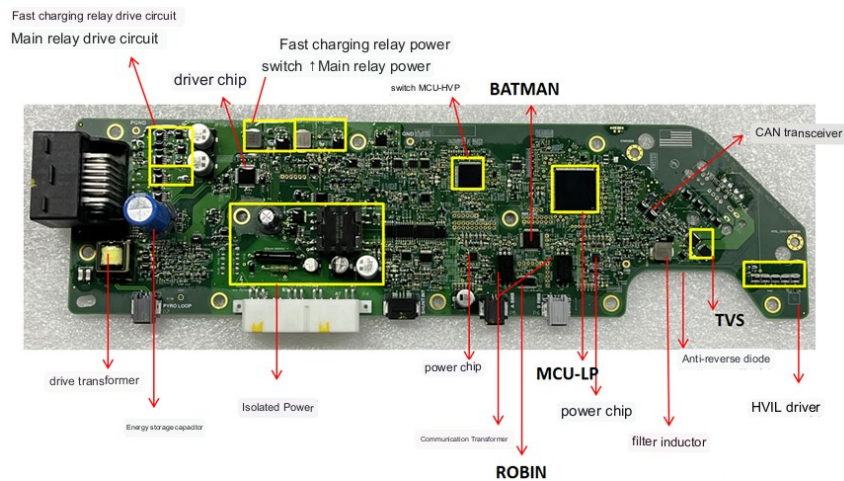


Figuur 4.13 Tesla model 3 module bord (subunit) (Chen, 2023)

De BMS-tussenunits staan in verbinding met een masterunit, die wordt weergegeven in Figuur 4.14. Daarin zijn ook de aansluitingen aangegeven. In Figuur 4.15 wordt de masterunit weergegeven met een toelichting op een aantal chips.



Figuur 4.14 Tesla tweede generatie masterunit met aansluitingen (Chen, 2023)



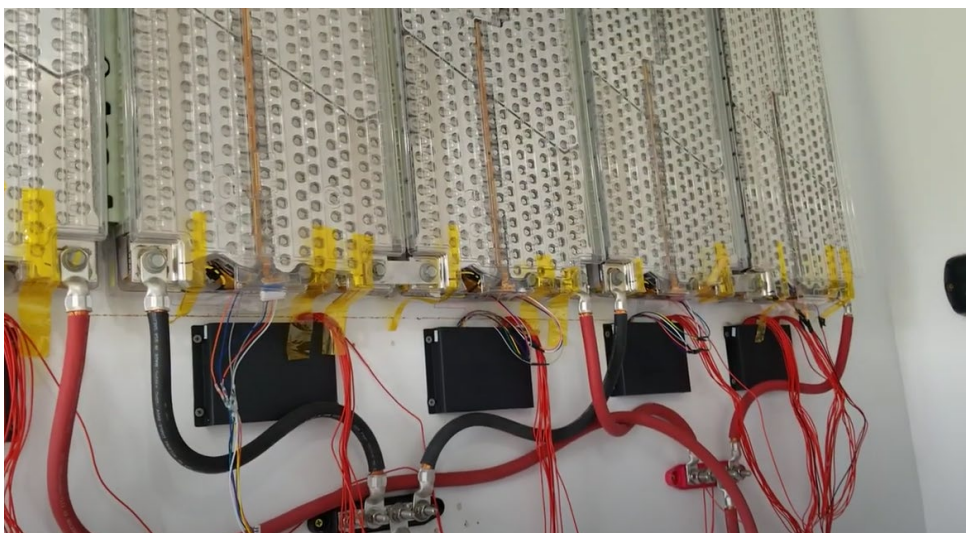
Figuur 4.15 Tesla tweede generatie masterunit met chips (Chen, 2023)

In dit batterijpakket is de hedendaagse trend zichtbaar van een kleinere hoeveelheid batterijcellen van een groter formaat, zoals toegelicht in paragraaf 3.1. Er is een kleinere hoeveelheid cellen gebruikt, die niet meer onderverdeeld zijn in parallele groepen, maar in serie zijn geschakeld. Al deze cellen worden gemonitord. Tesla heeft de architectuur van de batterijpakketten herzien. Het toekomstplan is om batterijcellen niet langer in modules onder te verdelen, maar een volledig batterijpakket direct uit losse batterijcellen samen te stellen (Subramaniam, 2022).

4.2 Zelfbouw BMS'en

Op het internet zijn losse Tesla-batterijmodules te koop. Daarnaast zijn er op internetforums en in video's beschrijvingen te vinden over de manier waarop een BMS vervangen kan worden voor een ander type, zodat de batterijmodules voor andere doeleinden ingezet kunnen worden. Denk aan het bouwen van een thuisbatterij om zonne-energie op te slaan.

In Figuur 4.16 is een met Tesla-modules gebouwde thuisbatterij weergegeven. Hier zijn de reguliere BMS-subunits vervangen (Modern Off Grid DIY, 2020).



Figuur 4.16 Zelfbouw thuisbatterij met Tesla-modules (Modern Off Grid DIY, 2020)

In Figuur 4.17 is een ontwikkelde controller weergegeven waarop de originele BMS-subunits kunnen worden aangesloten, zodat ze voor andere doeleinden ingezet kunnen worden.



Figuur 4.17 EVTV monitor/controller voor batterijpakketten die zijn opgebouwd uit eerste generatie Tesla-batterijen (SCRIBD, 2017)

Het is niet altijd zeker of deze systemen worden ontworpen en gebouwd door personen die bekend zijn met de veiligheidsnormen waaraan batterijsystemen moeten voldoen. Door menselijke fouten kunnen batterijcellen in een thermal runaway raken, met mogelijk gevaarlijke effecten tot gevolg, zoals in hoofdstuk 3 uiteengezet (Donkers, 2024; van der Weerd, 2024).

5 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksvragen beantwoord.

1. Wat is het doel van een BMS?

Een BMS heeft als doel om de batterij veilig te laten functioneren, de prestaties te optimaliseren en de levensduur te maximaliseren.

2. Wat is het basisprincipe van een BMS?

Data, verkregen via metingen in batterijsystemen worden via algoritmes geanalyseerd en geëvalueerd. Op basis hiervan worden besluiten genomen waarmee het batterijsysteem wordt aangestuurd.

3. Van welke parameters maakt een BMS gebruik?

De stroom, spanning en temperatuur van batterijcellen binnen een systeem zijn belangrijke invoerparameters waarmee een BMS bepaalt of een batterijsysteem veilig functioneert en prestaties worden geoptimaliseerd. Optionele sensoren zijn bijvoorbeeld vocht- of vlamboogsensoren.

4. Welke verschillende typen BMS'en zijn er?

BMS'en worden afgestemd op het batterijsysteem waarop ze zijn aangesloten. Elk batterijsysteem bevat dus een specifiek BMS. Niettemin kunnen wel enkele algemene configuraties worden onderscheiden: gecentraliseerd, gemoduleerd, gedistribueerd en gedecentraliseerd. Deze verschillen vooral in de manier waarop een BMS metingen uitvoert en het batterijsysteem aanstuurt. Van belang hierbij zijn:

- > het aantal batterijcellen.
- > de vereiste mate van nauwkeurigheid en complexiteit, zoals het aantal te beheersen parameters.

5. Hoe draagt een BMS bij aan veiligheid?

Het BMS dient veiligheidsrisico's te beheersen, voor zover deze een gevolg zijn van problemen met de batterijen. Dat wil zeggen het BMS probeert te voorkomen dat er gevaarlijke situaties ontstaan waarbij personen letsel of gezondheidsschade kunnen oplopen of dat schade wordt aangericht aan apparatuur of omgeving. Het BMS doet dit door parameters te monitoren en binnen de gestelde operationele grenzen te houden. Omdat de risico's per toepassing kunnen verschillen, kan ook het veiligheidsniveau waaraan BMS'en dienen te voldoen verschillen.

6. Welke rol speelt een BMS in het voorkomen en inperken van de effecten van een thermal runaway?

Indien een BMS afwijkende parameters waarneemt die duiden op mogelijke factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden, grijpt het in door de desbetreffende cel, module of het gehele pakket en eventuele laadstromen uit te schakelen. Daarnaast kunnen ook (automatische) waarschuwingen worden gegeven.

Wanneer er daadwerkelijk een thermal runaway ontstaat, kan een BMS deze niet stoppen. Wel kan het BMS maatregelen aansturen, zoals koel-, ventilatie-, en blussystemen die bijdragen aan het beheersen van de effecten.

7. Wat zijn de ontwikkelingen rondom BMS'en in het voorkomen en bestrijden van een thermal runaway?

Er is nog veel onbekend over de precieze processen die zich binnenin batterijcellen afspelen. Naar deze processen wordt dan ook het nodige onderzoek gedaan. Veel onderzoek richt zich hierbij op methodes waarmee factoren die tot een thermal runaway kunnen leiden eerder gedetecteerd kunnen worden. Zoals gasdetectie en impedantiemetingen.

Verder richt men zich ook op verbetering van de algoritmes die gebruikt worden om op basis van deze factoren het veiligheidsniveau van een batterij-(pakket) vast te stellen. Zo leidt combinatie en analyse van grote hoeveelheden data tot verbetering van algoritmes.

Referentielijst

- Afraz, M. V., Ali Mohammadi, Z., & Karimi, G. (2024). *A novel compact thermal management model for performance evaluation of tesla-like lithium-ion battery packs*. *Energy Conversion and Management*, 300, 117927.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117927>
- AP Hogeschool Antwerpen. (n.d.). *Spot op: Lithium-ion batterijen*. Retrieved January 21, 2025, from <https://www.ap.be/society/kennis-delen/spotop/spot-op-lithium-ion-batterijen>
- Bhowmick, S. (2021). *Tesla Model S Battery System: An Engineer's Perspective*. Retrieved March 6 2025, from <https://circuitdigest.com/article/tesla-model-s-battery-system-an-engineers-perspective>
- Chen, K. (2023, April 16). *Model 3 BMS main control board disassembled*. Retrieved January 21, 2025, <https://www.linkedin.com/pulse/model-3-bms-main-control-board-disassembled-keven-chen>.
- Conzen, J., Lakshmipathy, S., Kapahi, A., Kraft, S., & DiDomizio, M. (2023). *Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104932>
- Donkers, T. (2024, November 29). *Gesprek met Tijs Donkers van de technische universiteit Eindhoven*.
- EV Europe. (n.d.). *Tesla Model S module 5,3 kwhr - 24 vdc*. Retrieved November 6, 2024, from <https://eveurope.eu/product/tesla-model-s-module-53-kwhr-24-vdc/>
- EV West. (2021). *EV West - Model S Tesla Battery BMS PCB Board*. Retrieved November 6, 2024, from <https://www.evwest.com/support/Tesla%20Model%20S%205.3%20BMS%20Board%20Rev%20B.pdf?srsId=AfmBOopbyDfM6AwfRHshoscNv1n0NgpVBz4QFICH3maVIJdye zsa9Tma>
- Garche, J., & Brandt, K. (2019). *Li-Battery Safety*. Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780444637772/electrochemical-power-sources-fundamentals-systems-and-applications#book-description>
- Jehugarcia. (2017). *Tesla model S battery teardown* [Video recording]. Retrieved November 6, 2024, from <https://www.youtube.com/watch?v=NpSrHZnCi-A&t=350s>
- Kader. (n.d.). *ISO 13849 Norm*. Retrieved November 12, 2024, from <https://kader.nl/begrippen/machine-safety/iso-13849-norm>
- Kenteken.tv. (2024). *Hoeveel zijn er nog? Tesla / Personenauto / vanaf 2000 tot en met 2019 / volledig elektrisch*. Retrieved November 6, 2024, from <https://www.kenteken.tv/hoeveelzijnernog.php?merk=TESLA&merk2=&voertuigsoort=Personenauto&filter=&bjmin=2000&bjmax=2019&ev=J>
- Kumar, R. R., Bharatiraja, C., Udhayakumar, K., Devakirubakaran, S., Sekar, K. S., & Mihet-Popa, L. (2023). *Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications*. *IEEE Access*, 11, 105761–105809.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318121>
- Link Sun International. (2024, February 14). *Detailed explanation of battery management system (BMS)*. Retrieved January 21, 2025 from

- <https://www.linkedin.com/pulse/detailed-explanation-battery-management-system-bms-link-sun-rvgac>.
- Liu, J. (2023, August 23). *Compare 4 Types of BMS Topologies: Centralized vs Distributed vs Modular vs Hybrid*. Retrieved January 21, 2025 from https://www.mokoenergy.com/types-of-bms-topologies/#elementor-toc__heading-anchor-4
- Manly Batteries. (2021, May 13). *Design features of Tesla BMS battery management system*. Retrieved January 21, 2025 from <https://www.manlybatteries.com/info/design-features-of-tesla-bms-battery-managemen-57269880.html>
- Modern Off Grid DIY. (2020). *Wiring Tesla Battery modules Active Balancer* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=bEqqhspAJN8>
- MPS. (n.d.). *Role and Importance of BMS*. Retrieved November 12, 2024, from [https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/bms-basics/role-and-importance-of-bms#:~:text=Battery%20Management%20System%20\(BMS\)%20are,by%20each%20of%20these%20functions](https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/bms-basics/role-and-importance-of-bms#:~:text=Battery%20Management%20System%20(BMS)%20are,by%20each%20of%20these%20functions).
- MSG Equipment. (2023). *Which batteries is Tesla using in its models?* Retrieved January 21, 2025 from <https://servicems.eu/en/news/post/1255-Type-and-chemical-composition-of-lithium-ion-.html>
- Natarajan, R. (2022). *Battery Management Systems Role in Battery Safety*. Retrieved January 21, 2025 from <https://www.accure.net/battery-knowledge/battery-management-systems-role-in-battery-safety>
- NIPV. (2023, May). *Scenarioboeken NIPV - Buurtbatterij in kelder*. Li-Ion Buurtbatterij in Kelder. . Retrieved January 21, 2025 from <https://scenarioboeken.nipv.nl/li-ion-buurtbatterij-in-kelder/#:~:text=Deze%20scenariokaart%20geeft%20een%20ongeval,bij%20advisering%20over%20ruimtelijke%20ontwikkelingen>.
- Popp, A., Fechtner, H., Schmuelling, B., Scholz, T., Kremzow-Tennie, S., & Pautzke, F. (2023). *Challenges in the Real-World Evaluation of Traction Batteries at the End of their First Life*. Proceeding of the 33rd European Safety and Reliability Conference, 3365–3373. https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1_P258-cd
- Rosenberger, N., Rosner, P., Bilfinger, P., Schöberl, J., Teichert, O., Schneider, J., Abo Gamra, K., Allgäuer, C., Dietermann, B., Schreiber, M., Ank, M., Kröger, T., Köhler, A., & Lienkamp, M. (2024). *Quantifying the State of the Art of Electric Powertrains in Battery Electric Vehicles: Comprehensive Analysis of the Tesla Model 3 on the Vehicle Level*. World Electric Vehicle Journal, 15(6), 268. <https://doi.org/10.3390/wevj15060268>
- See, K. W., Wang, G., Zhang, Y., Wang, Y., Meng, L., Gu, X., Zhang, N., Lim, K. C., Zhao, L., & Xie, B. (2022). *Critical review and functional safety of a battery management system for large-scale lithium-ion battery pack technologies*. International Journal of Coal Science & Technology, 9(1), 36. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00494-0>
- Sharma, A., Zanotti, P., & Musunur, L. P. (2019). *Enabling the Electric Future of Mobility: Robotic Automation for Electric Vehicle Battery Assembly*. IEEE Access, 7, 170961–170991. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953712>
- Subramaniam, S. (2022). *Latest Tesla Battery Design - A Review of Present and Future Design Concepts and their Energy, Thermal, and Manufacturing Cost Benefits*. Retrieved January 21, 2025 from <https://mragheb.com/NPRE%20498ES%20Energy%20Storage%20Systems/Shashank%20Subramaniam%20Latest%20Tesla%20Battery%20Design%20pdf.pdf>.

- Tanim, T. R., & Prucha, T. (2024). *A Teardown Study of Flood-Damaged Electric Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration. Retrieved January 21, 2025 from https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/2024-02/16180-NSR-231214-003_SAE_Teardown%20Analysis%20of%20Flood-damaged%20Evs-tag.pdf.
- Tesla. (2024a). *BMS PCBA - High Voltage Battery Assembly (HV Battery 2.0) (Remove & Replace)*. Retrieved January 21, 2025 from <https://service.tesla.com/docs/ModelS/ServiceManual/en-us/GUID-B6FDF27B-E03D-4BA2-AAF1-5FC59DF6F646.html>
- Tesla. (2024b, October 8). *Contactors - HV Battery (HV Battery 1.0/1.5) (Remove and Replace)*. Retrieved January 21, 2025 from <https://service.tesla.com/docs/ModelS/ServiceManual/en-us/GUID-B71CCF56-1912-4BA2-AE6A-AC9A7A6D11AD.html>
- SCRIBD. (2017). *Tesla Battery Module Controller*. Retrieved January 21, 2025 from <https://www.scribd.com/document/435934145/Tesla-Modul-Controller-Battery>
- van der Weerd, B. (2024, December 3). Gesprek met Bouke van der Weerd, chief technical officer bij Huawei.
- Walvekar, H., Beltran, H., Sripad, S., & Pecht, M. (2022). *Implications of the Electric Vehicle Manufacturers' Decision to Mass Adopt Lithium-Iron Phosphate Batteries*. IEEE Access, 10, 63834–63843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3182726>
- Wang, X., Wei, X., Zhu, J., Dai, H., Zheng, Y., Xu, X., & Chen, Q. (2021). *A review of modeling, acquisition, and application of lithium-ion battery impedance for onboard battery management*. ETransportation, 7, 100093. <https://doi.org/10.1016/J.ETTRAN.2020.100093>
- Wang, X.-X., Li, Q.-T., Zhou, X.-Y., Hu, Y.-M., & Guo, X. (2024). *Monitoring thermal runaway of lithium-ion batteries by means of gas sensors*. Sensors and Actuators B: Chemical, 411, 135703. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135703>
- William. (2016a). *Tesla 5.3 kWh Battery Module Monitoring Board - Part 1*. Retrieved January 21, 2025 from <https://evbimmer325i.blogspot.com/2016/12/tesla-battery-module-monitoring-board.html>.
- William. (2016b). *Tesla 5.3 kWh Battery Modules Overview*. Retrieved January 21, 2025 from <https://evbimmer325i.blogspot.com/2016/12/tesla-battery-modules-overview.html>.
- Xray. (2024, May 28). *Tesla's Innovations in Battery Management Systems*. Retrieved January 21, 2025 from <https://xray.greyb.com/ev-battery/tesla-innovations-in-battery-management-systems>.