

Van Thermal Runaway Naar Veilige Vaart

Eindverslag



05-06-2026, Amsterdam

Gemaakt door: Saïfeddine Zemmouri, Nizar el Muhandiz, Yousra Bougrina, Omar Bakkar en Nassim Ben Halima

5VWO

Informatie auteurs

Saïfeddine Zemmouri (16 jaar), klas 5v1, teamleider;

Nizar el Muhandiz (16 jaar), klas 5v2;

Yousra Bourgrina (15 jaar), klas 5v1

Omar Bakkar (16 jaar), klas 5v1;

Nassim Ben Halima (16 jaar), klas 5v2;

Docent

B. Schouten, docent O&O:

bschouten@calandlyceum.nl.

Opdrachtgever

Jordy Stapper: Azure Naval Architects.

Oud-Calandleerling die nu superjachten bouwt. Hij studeerde af en werkt nu aan de meest luxueuze schepen ter wereld. Van technische tekeningen tot de lancering – hij ziet zijn ontwerpen varen.

jordy@azure-na.com

Expert

Martijn Gravemaker.

Werkt bij Royal Van Lent Shipyard, als Senior projectcoördinator. Heeft gestudeerd aan de hogeschool van Amsterdam.

Data

Dit project loopt van 9 januari 2026 tot 6 juni 2026 en is ons 2^e keuzeproject van het jaar.



Samenvatting

Steeds meer superjachten maken gebruik van elektrische watersporttoestellen zoals SeaBobs, e-foils en elektrische jetski's. Deze apparaten werken met lithium-ion accu's. Hoewel deze accu's veel voordelen hebben, brengen ze ook risico's met zich mee. Een beschadigde of verkeerd opgeladen accu kan leiden tot thermal runaway, een kettingreactie waarbij de temperatuur van de accu snel stijgt en brand of explosie kan ontstaan.

De hoofdvraag van dit project luidt: hoe kan het risico op thermal runaway en brand bij lithium-ion accu's op superjachten met praktische en betaalbare maatregelen worden beperkt? Om deze vraag te beantwoorden hebben wij literatuuronderzoek uitgevoerd naar lithium-ion accu's, thermal runaway, maritieme regelgeving en bestaande veiligheidsmaatregelen. Vervolgens hebben wij verschillende oplossingen onderzocht en uitgewerkt tot één integraal veiligheidsconcept.

Uit het onderzoek bleek dat de grootste veiligheidswinst wordt behaald door het gebruik van LiFePO_4 -accu's, gecombineerd met ventilatie, temperatuurdetectie, veilige laadprocedures en training van de bemanning. Op basis hiervan hebben wij een veiligheidsconcept ontwikkeld dat bestaat uit een geventileerde opslagruimte, een detectiesysteem met temperatuursensoren, een veiligheidsprotocol en een trainingsprogramma.

Wij concluderen dat een combinatie van preventie, detectie en training de meest effectieve manier is om de risico's van lithium-ion accu's op superjachten te beperken. In vervolgonderzoek zou het concept getest kunnen worden in een realistische maritieme omgeving.

Inhoudsopgave

Informatie auteurs	2
Docent	2
Opdrachtgever	2
Expert.....	2
Data	2
Samenvatting	3
Onderwerp	5
Opdrachtgever	5
Opdracht	5
Programma van eisen	5
Veiligheid en Risicobeheersing.....	5
Opslagvoorziening	6
Laadvoorziening.....	6
Brandpreventie en Brandbestrijding.....	6
Ventilatie	7
Materiaalkeuze	7
Technische Uitwerking	7
Prototype/ Model.....	8
Eindpresentatie	8
Vooronderzoek	9
Theoretisch kader	10
Lithium-ion accu's	10
Thermal runaway en brandgevaar	10
Veilig opslaan en opladen van lithium-accu's	11
Brandpreventie en maritieme veiligheid.....	11
Methode	12
Ontwerp.....	13
Resultaten	16
Ontwerpresultaten	17
Samenwerking binnen het project	18
Conclusie	19
Discussie	20

Onderwerp

Op hedendaagse superjachten worden steeds vaker elektrische watersportaccessoires ingezet, zoals jetski's en e-foils, die functioneren met lithium-ion batterijen. Deze batterijen zijn sterk en doeltreffend, maar houden ook gevaren in, aangezien ze bij schade of onjuist opladen kunnen oververhit raken en brand veroorzaken (thermische runaway), wat moeilijk te blussen is en gevaarlijke gassen oplevert. Aangezien er nog beperkt regels en richtlijnen zijn voor het veilig bewaren en opladen van deze accu's aan boord, is dit een aanzienlijke veiligheidskwestie binnen de jachtbouw.



Opdrachtgever

Onze opdrachtgever voor dit project is Jordy Stapper, Owner's Representative van het bedrijf Azure Yacht Design & Naval architecture. Zoals de naam al zegt,

Opdracht

In deze opdracht onderzoeken wij hoe lithium-accu's op een superjacht veilig kunnen worden opgeslagen en opgeladen. We analyseren de risico's en bedenken oplossingen om deze te verkleinen, zoals aanpassingen in ruimte-indeling, ventilatie, materiaalgebruik en branddetectie. Uiteindelijk werken we dit uit in een praktisch ontwerpvoorstel, ondersteund met tekeningen en een prototype of model dat laat zien hoe onze oplossing in de praktijk werkt.

Programma van eisen

Het ontwerp voor de opslag- en laadruimte van lithium-ion accu's aan boord van een superjacht moet voldoen aan functionele, technische en veiligheidsgerichte eisen. Deze eisen vormen het uitgangspunt voor het ontwerp en zorgen ervoor dat de ruimte geschikt is voor dagelijks gebruik én voor risicosituaties.

Veiligheid en Risicobeheersing

De opslag- en laadruimte moet ontworpen worden met maximale aandacht voor brandveiligheid en beheersbaarheid van incidenten. Omdat lithium-ion accu's risico geven op oververhitting en thermal runaway, moet het ontwerp voorkomen dat een incident zich uitbreidt naar andere delen van het schip.

Daarom gelden de volgende eisen:

- Er wordt een risicoanalyse uitgevoerd waarin thermal runaway als uitgangspunt wordt meegenomen;
- Brandoverslag naar aangrenzende ruimtes moet worden voorkomen;
- De ruimte moet geschikt zijn voor incidenten met lithium-ion accu's;
- Een defecte accu moet afzonderlijk geïsoleerd kunnen worden;
- De veiligheid van eigenaar, bemanning en passagiers staat centraal.

Opslagvoorziening

De accu's moeten overzichtelijk, veilig en stabiel opgeslagen kunnen worden onder maritieme omstandigheden. Hierbij moet rekening worden gehouden met bewegingen van het schip, trillingen en beperkte werkruimte.

Belangrijke eisen zijn:

- Accu's worden gescheiden opgeslagen om kettingreacties te beperken;
- Opslagconstructies beschermen tegen mechanische beschadiging;
- Bevestigingen zijn trilling bestendig uitgevoerd;
- De temperatuur blijft binnen veilige operationele grenzen;
- De ruimte blijft toegankelijk voor inspectie en gebruik door de crew.

Laadvoorziening

Het laadproces moet gecontroleerd verlopen en mag geen extra veiligheidsrisico vormen. Daarvoor moet het ontwerp voorzien in:

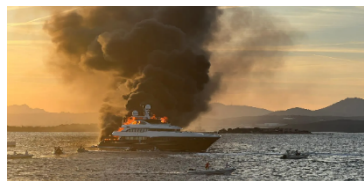
- Gecontroleerde laadpunten voor alle relevante accutypes;
- Beveiliging tegen overladen en kortsluiting;
- Automatische uitschakeling bij afwijkingen of storingen;
- Continue monitoring tijdens het laden;
- Bij voorkeur een fysiek gescheiden laadzone binnen de ruimte.

Brandpreventie en Brandbestrijding

Omdat lithiumbranden afwijken van conventionele brandscenario's, moet het ontwerp gericht zijn op snelle detectie en beheersing.

De ruimte moet daarom beschikken over:

- Brandvertragende of onbrandbare constructiematerialen;
- Een geschikt blussysteem voor lithium-ion brandscenario's;
- Detectie van rook en temperatuur, eventueel aangevuld met gasdetectie;
- Alarmkoppeling met brug of bemanningsruimte;
- Mogelijkheden voor compartimentering of individuele isolatie.



Ventilatie

Tijdens opslag en laden kan warmteontwikkeling optreden. Bij falen kunnen daarnaast schadelijke gassen vrijkomen.

Daarom gelden de volgende ventilatie-eisen:

- Mechanische ventilatie is verplicht;
- Warmte en gassen moeten actief afgevoerd worden;
- Ventilatiekanalen en componenten moeten brandveilig zijn uitgevoerd



Materiaalkeuze

Alle gebruikte materialen moeten geschikt zijn voor toepassing aan boord van een superjacht.

Dat betekent:

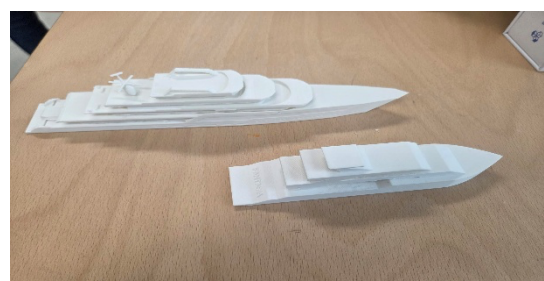
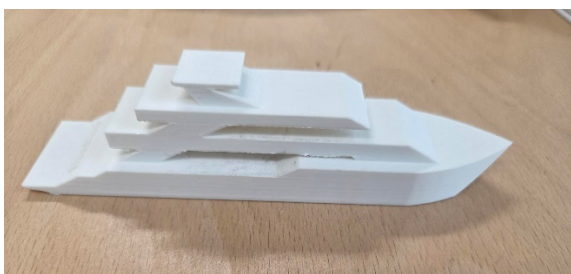
- Gebruik van onbrandbare of brandvertragende materialen;
- Corrosiebestendigheid in verband met zoutwateromgeving;
- Vloeistofdichte vloerafwerking;
- Constructieve geschiktheid voor maritieme belasting.

Technische Uitwerking

Het ontwerp wordt technisch uitgewerkt in verschillende tekeningen en onderbouwingen.

Verplicht op te leveren zijn:

- Een plattegrondtekening;
- Een doorsnedetekening;
- Detailtekeningen van kritische onderdelen;
- Technische onderbouwing van ontwerpkeuzes.
- Een 3D model van een jacht voor extra duidelijkheid.



Prototype/ Model

Om het ontwerp inzichtelijk te maken wordt een fysiek model of prototype ontwikkeld.

Hierbij geldt:

- Het model toont het werkingsprincipe van de ruimte;
- Veiligheidsmaatregelen moeten zichtbaar worden gemaakt;
- Het prototype ondersteunt de technische uitleg.

Eindpresentatie

De resultaten worden professioneel gepresenteerd aan opdrachtgever en docent.

De presentatie bevat:

- Toelichting op de risicoanalyse;
- Verantwoording van ontwerpkeuzes;
- Demonstratie van het prototype;
- Conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling.

Vooronderzoek

Waarvoor worden lithium-accu's nu gebruikt op zee?

Waarom is het gebruik van lithium-accu's aan boord van schepen gevaarlijk?

Welke oplossingen bestaan al voor het probleem?

Het brandrisico op superjachten neemt aanzienlijk toe door de groeiende hoeveelheid lithiumbatterijen in apparatuur zoals elektrische voertuigen (Seabobs, e-bikes), elektrisch gereedschap, energieopslagsystemen en zelfs elektrische voertuigen. Het grootste gevaar van deze batterijen is een "thermal runaway", een onbeheersbare kettingreactie binnen de accu die een enorme hitte genereert en niet kan worden geblust met traditionele brandblussers.

De belangrijkste punten over dit risico volgens de bronnen zijn:

Veel apparatuur wordt opgeladen terwijl niemand erop let en geen aandacht aan geeft, wat het risico op een storing tijdens het laadproces vergroot. Het is ook moeilijk om lithium-ion accu branden aan boord van schepen onder controle te krijgen. Alleen al in de eerste helft van 2024 gingen 12 jachten verloren door brand.

Wanneer er iets misgaat met lithiumbatterijen op zee, staat de bemanning er vaak alleen voor, wat het essentieel maakt om gespecialiseerd apparatuur te hebben om branden te bestrijden. Classificatiebureaus zoals DNV, Lloyds en ABS hebben momenteel nog geen allesomvattende regels voor lithiumbranden, omdat elk type apparaat unieke uitdagingen kent.

Er zijn tegenwoordig wel al meerdere oplossingen om het risico op deze branden te voorkomen en beperken, maar ze bieden geen absolute garantie dat er geen branden kunnen ontstaan en er is nog steeds een groot gevaar.

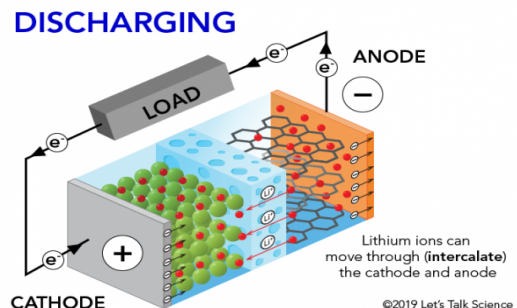
Een paar van deze oplosmiddelen zijn:

- Brandwerende oplaadboxen (zoals Fisacon): Voor het veilig laden van kleinere apparaten en Seabobs, voorzien van geïntegreerde alarmen en blussystemen.
- Gespecialiseerde blusdekens: Om een brand bij grotere apparatuur, zoals e-bikes of auto's, direct bij de bron te bedwingen.
- Geavanceerde gasdetectie (zoals Li-ion Tamer): Deze systemen detecteren de vroege gasemissies van een naderende thermal runaway en kunnen het laadproces automatisch uitschakelen voordat er brand uitbreekt.
- AI-thermische camera's: Voor realtime bewaking van risicogebieden, waarbij direct wordt gewaarschuwd als de temperatuur boven een veilig niveau stijgt.

Theoretisch kader

Lithium-ion accu's

Lithium-ion accu's worden tegenwoordig veel gebruikt in moderne technologie. Ze zitten onder andere in telefoons, elektrische fietsen, elektrische auto's en steeds vaker ook in elektrische watersporttoys op superjachten, zoals e-foils en SeaBobs. Deze accu's zijn populair omdat ze veel energie kunnen opslaan in een relatief kleine ruimte en snel opgeladen kunnen worden.



Een lithium-ion accu werkt door middel van chemische reacties tussen lithiumdeeltjes in de anode en kathode. Tijdens het opladen en ontladen verplaatsen lithium-ionen zich tussen deze twee onderdelen, waardoor energie wordt opgeslagen of vrijgegeven. Hierdoor kan een apparaat langdurig werken zonder constante stroomtoevoer.

Hoewel lithium-ion accu's efficiënt zijn, brengen ze ook risico's met zich mee. Wanneer een accu beschadigd raakt, oververhit of verkeerd wordt opgeladen, kan er een gevaarlijke situatie ontstaan. Daarom is het belangrijk om goed te onderzoeken hoe deze accu's veilig kunnen worden opgeslagen en opgeladen op een superjacht.

Kortom: lithium-ion accu's zijn krachtige en efficiënte energiebronnen, maar vereisen goede veiligheidsmaatregelen om risico's te voorkomen.

Thermal runaway en brandgevaar

Een van de grootste risico's van lithium-ion accu's is het verschijnsel **thermal runaway**. Dit betekent dat een accu zichzelf blijft opwarmen door een chemische reactie, waardoor de temperatuur steeds verder stijgt. Wanneer dit gebeurt kan de accu in brand vliegen of zelfs ontploffen.

Thermal runaway kan ontstaan door verschillende oorzaken, zoals:

- beschadiging van de accu.
- overladen
- kortsluiting
- hoge temperatuur
- slechte ventilatie
- fabricagefouten

Wanneer een lithium-ion accu in brand raakt, is deze moeilijk te blussen. De accu kan opnieuw ontbranden en gevaarlijke gassen vrijlaten, zoals giftige rook en explosieve

dampen. Dit maakt lithiumbranden extra gevaarlijk, vooral op een superjacht waar weinig ruimte is en veel waardevolle apparatuur aanwezig is.

Daarom is het belangrijk om een opslagruimte te ontwerpen die brand kan beperken, hitte kan afvoeren en ervoor zorgt dat een defecte accu geïsoleerd kan worden van andere accu's.

Veilig opslaan en opladen van lithium-accu's

Om lithium-ion accu's veilig te gebruiken op superjachten moeten er verschillende veiligheidsmaatregelen worden genomen. Hierbij wordt gekeken naar opslag, laden, ventilatie en brandpreventie.



Bij veilige opslag is het belangrijk dat:

- accu's gescheiden worden opgeslagen
- ze beschermd zijn tegen schade
- de temperatuur gecontroleerd blijft
- De ruimte goed toegankelijk is voor de bemanning

Bij het opladen van accu's is het belangrijk dat:

- het laadproces gecontroleerd verloopt
- er beveiliging is tegen overladen.
- er automatische uitschakeling mogelijk is.
- de accu's continu gemonitord worden

Ook speelt ventilatie een grote rol. Tijdens het opladen kunnen accu's warmte en gassen afgeven. Door een goed ventilatiesysteem kan deze warmte worden afgevoerd en wordt het risico op brand kleiner.

Brandpreventie en maritieme veiligheid

Op superjachten gelden strenge veiligheidseisen, vooral op het gebied van brandpreventie. Materialen moeten brandvertragend zijn en ruimtes moeten zo ontworpen worden dat brand zich niet snel kan verspreiden.

Belangrijke maatregelen zijn:

- brandwerende materialen
- rook- en temperatuursensoren.
- blussystemen voor lithiumbranden
- compartimentering van ruimtes
- alarmkoppeling met de brug.

Daarnaast moeten alle systemen geschikt zijn voor maritieme omstandigheden, zoals trillingen, vocht en zoutwater. Dit betekent dat materialen corrosiebestendig moeten zijn en installaties stevig gemonteerd moeten worden. Het doel van deze maatregelen is om de veiligheid van de bemanning en het schip te garanderen.

Methode

Om antwoord te geven op de hoofdvraag hebben wij eerst literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierbij hebben wij informatie verzameld over lithium-ion accu's, thermal runaway, brandveiligheid en maritieme regelgeving. Hiervoor maakten wij gebruik van wetenschappelijke artikelen, technische rapporten en informatie van organisaties binnen de maritieme sector.

Vervolgens hebben wij onderzocht welke veiligheidsmaatregelen momenteel worden toegepast bij de opslag en het opladen van lithium-ion accu's. Hierbij hebben wij gekeken naar ventilatiesystemen, detectiesystemen, brandwerende opslagruimtes en verschillende accutypen.

Op basis van de verzamelde informatie hebben wij een Programma van Eisen opgesteld. Dit programma vormde de basis voor het ontwerp. Daarna hebben wij verschillende concepten ontwikkeld en beoordeeld op veiligheid, haalbaarheid en kosten.

Ontwerp

Stap 1: Probleemanalyse

Tijdens het vooronderzoek bleek dat thermal runaway het grootste risico vormt bij het gebruik van lithium-ion accu's op superjachten. Daarom hebben wij ons ontwerp gericht op het voorkomen, herkennen en beperken van thermal runaway.

Stap 2: Programma van Eisen

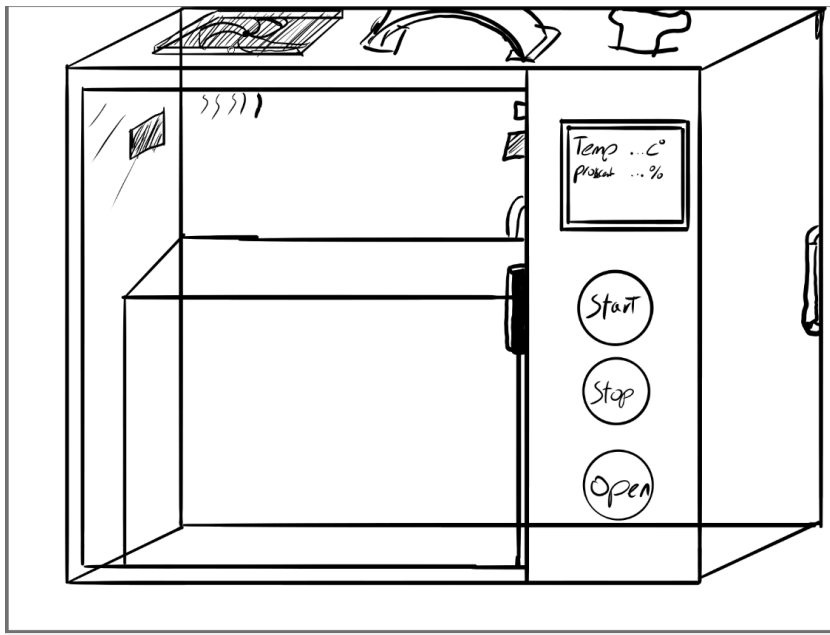
Op basis van het onderzoek hebben wij eisen opgesteld. Het ontwerp moest onder andere:

- thermal runaway helpen voorkomen;
- warmte kunnen afvoeren;
- defecte accu's kunnen detecteren;
- praktisch toepasbaar zijn op superjachten;
- betaalbaar blijven.

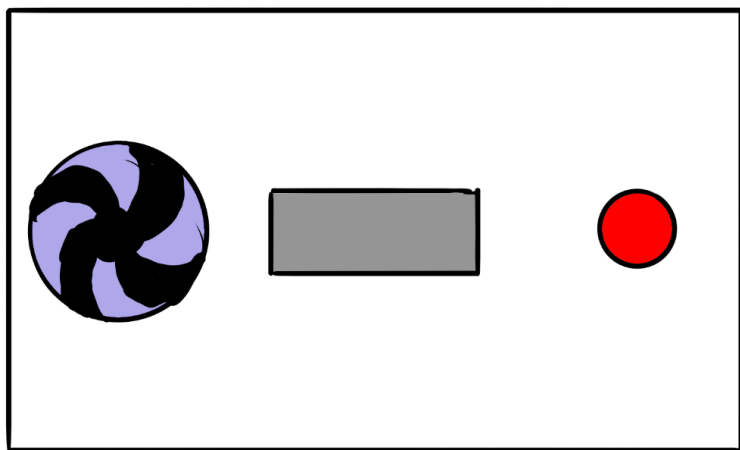
Stap 3: Conceptontwikkeling

Vervolgens hebben wij verschillende oplossingen onderzocht. Hierbij hebben wij gekeken naar:

- LiFePO_4 -accu's;
- ventilatiesystemen;
- temperatuurdetectie;
- laadprotocollen;
- training van de bemanning.

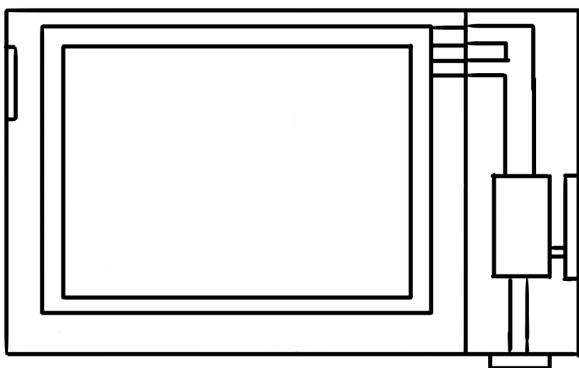


o



■ noodknop ■ ventilatie ■ hendel

o



Stap 4: Conceptkeuze

Na vergelijking van de verschillende concepten hebben wij gekozen voor een geïntegreerd veiligheidsconcept. Dit concept combineert veilige accutechnologie met ventilatie, detectie en procedures.

Wij kozen voor LiFePO_4 -accu's omdat deze thermisch stabiel zijn dan NMC-accu's. Daarnaast hebben wij gekozen voor temperatuurdetectie omdat problemen hiermee vroegtijdig kunnen worden ontdekt.

Stap 5: Prototype

Op basis van het gekozen concept hebben wij een prototype ontwikkeld. Dit prototype laat zien hoe de ventilatie, opslag en detectie binnen het veiligheidsconcept samenwerken.



Stap 6: Evaluatie

Tot slot hebben wij het ontwerp beoordeeld aan de hand van het Programma van Eisen. Hierbij hebben wij gekeken of het ontwerp voldoet aan de gestelde veiligheids- en gebruikseisen.

Resultaten

Deelvraag 1

Wat is thermal runaway en hoe ontstaat het?

Uit het onderzoek blijkt dat thermal runaway ontstaat wanneer een lithium-ion accu meer warmte produceert dan kan worden afgevoerd naar de omgeving. Hierdoor loopt de temperatuur in de accu steeds verder op, waardoor nieuwe chemische reacties ontstaan die opnieuw warmte produceren. Dit proces versterkt zichzelf en kan uiteindelijk leiden tot brand of zelfs een explosie. Thermal runaway kan onder andere worden veroorzaakt door beschadigingen, oververhitting, kortsluiting of verkeerd opladen van een accu.

Deelvraag 2

Welke risico's brengen lithium-ion accu's met zich mee op superjachten?

Tijdens het onderzoek is gebleken dat lithium-ion accu's verschillende risico's met zich meebrengen wanneer zij worden gebruikt op superjachten. Het grootste risico is brand, omdat een accu die in thermal runaway raakt zeer hoge temperaturen kan bereiken. Daarnaast kunnen tijdens dit proces giftige en brandbare gassen vrijkomen, wat gevaarlijk is voor de gezondheid van de bemanning. Ook bestaat er kans op explosies wanneer deze gassen zich ophopen in afgesloten ruimtes. Omdat superjachten vaak beperkte ruimte hebben en zich op zee bevinden, kunnen incidenten bovendien leiden tot aanzienlijke schade aan het schip en gevaarlijke situaties voor de opvarenden.

Deelvraag 3

Welke accutechnologie is het veiligst voor maritieme toepassingen?

Voor deze deelvraag zijn verschillende accutechnologieën met elkaar vergeleken. Uit deze vergelijking blijkt dat LiFePO_4 -accu's de veiligste optie zijn voor toepassing op superjachten. Hoewel deze accu's een iets lagere energiedichtheid hebben dan bijvoorbeeld NMC-accu's, zijn zij veel beter bestand tegen hoge temperaturen en minder gevoelig voor thermal runaway. Hierdoor is de kans op ernstige incidenten aanzienlijk kleiner. Daarnaast hebben LiFePO_4 -accu's een lange levensduur, wat ze ook op de lange termijn aantrekkelijk maakt voor gebruik aan boord.

Deelvraag 4

Welke preventieve maatregelen kunnen worden toegepast?

Uit het onderzoek blijkt dat een combinatie van verschillende veiligheidsmaatregelen het meest effectief is om de risico's van lithium-ion accu's te beperken. Goede ventilatie speelt hierbij een belangrijke rol, omdat warmte en eventueel vrijgekomen gassen hierdoor sneller kunnen worden afgevoerd. Daarnaast zorgt temperatuurdetectie ervoor dat afwijkingen vroegtijdig worden opgemerkt, waardoor sneller kan worden ingegrepen. Ook veilige laadprocedures zijn essentieel om overbelasting van accu's te voorkomen. Verder draagt gescheiden opslag bij aan het beperken van de gevolgen van een incident, terwijl brandveilige materialen extra bescherming bieden wanneer zich toch een probleem voordoet.

Deelvraag 5

Hoe kan de bemanning worden voorbereid op incidenten met lithium-ion accu's?

Naast technische maatregelen blijkt ook de rol van de bemanning van groot belang te zijn. Uit verschillende bronnen komt naar voren dat goed getrainde bemanningsleden risico's sneller herkennen en beter kunnen handelen tijdens noodsituaties. Door middel van trainingen leren zij signalen van oververhitting te herkennen en weten zij welke stappen moeten worden genomen wanneer een accu defect raakt of een alarm afgaat. Hierdoor kan de kans op ernstige schade aanzienlijk worden verkleind.

Ontwerpresultaten

Op basis van de resultaten uit het vooronderzoek hebben wij een veiligheidsconcept ontwikkeld. Dit concept bestaat uit het gebruik van LiFePO_4 -accu's, een geventileerde opslagruimte, een systeem met meerdere temperatuursensoren, een veiligheidsprotocol, een trainingsprogramma voor de bemanning en een gescheiden laadstation.

Tijdens de theoretische uitwerking van het ontwerp bleek dat ventilatie een belangrijke bijdrage levert aan het afvoeren van warmte rondom de accu's. Daarnaast zorgt het detectiesysteem ervoor dat temperatuurstijgingen vroegtijdig worden opgemerkt, waardoor de bemanning sneller kan reageren voordat gevaarlijke situaties ontstaan. Door deze maatregelen te combineren ontstaat een veiligheidsconcept dat zowel preventief als reactief werkt en daarmee de risico's van lithium-ion accu's op superjachten kan beperken.

Samenwerking binnen het project

Hoe ging jullie samenwerking in het project? Wat ging goed en waarom? Wat kan beter in het vervolg?

De samenwerking binnen ons team van vijf (Saïfeddine, Nizar, Yousra, Omar en Nassim) is over het algemeen goed verlopen.

Wat ging goed?

Duidelijke rolverdeling: Vanaf het begin hebben we rollen verdeeld op basis van ieders sterke kanten. Saïfeddine fungeerde als teamleider en coördinator, Yousra was sterk in onderzoek en teksten, Omar en Nassim waren goed in technische uitwerking en het prototype, terwijl Nizar veel deed aan de ontwerpschetsen en presentatie. Nassim was daarnaast verantwoordelijk voor de ontwerpschetsen.

Samenwerken in duo's: We werkten veel samen in koppels. Nizar en Saïfeddine werkten intensief samen, vooral in het begin van het project toen zij samen met het prototype bezig waren. Later namen Nassim en Omar het prototype verder over. Yousra en Nassim werkten ook veel samen. Dit zorgde voor een prettige werkverdeling en goede onderlinge afstemming.

Goede communicatie: De communicatie ging goed. We hielden regelmatig contact via WhatsApp en hadden wekelijkse (soms tweewekelijkse) afspraken op school. Problemen werden snel besproken.

Betrouwbaarheid en ondersteuning: Wanneer iemand vastliep, sprongen anderen bij. Er was een positieve sfeer en wederzijds respect. Iedereen leverde zijn deel (bijna) op tijd op.

Wat kan beter in het vervolg?

Meer gestructureerde planning: We hadden soms last van uitstelgedrag (sommige mensen in ons team) in de laatste weken. Een strakkere deadlineplanning.

Gelijkmatiger werklast: Hoewel de rolverdeling duidelijk was, lag het werk bij sommige taken toch niet helemaal gelijkmatig verdeeld. In een volgend project zouden we vaker de werklast evalueren.

Het was een mooi en geslaagd project en we hebben wel ons best gedaan om alles eruit te halen wat erin zit. Ieder van ons heeft zowel samen als individueel zijn of haar best gedaan. We kunnen terugkijken op een mooi project!

Conclusie

Het doel van dit project was om een praktisch veiligheidsconcept te ontwikkelen voor lithium-ion accu's op superjachten. De hoofdvraag was: "Hoe kan het risico op thermal runaway en brand bij lithium-ion accu's op superjachten met behulp van praktische en betaalbare maatregelen worden beperkt?"

Uit ons onderzoek bleek dat thermal runaway ontstaat wanneer een accu meer warmte produceert dan kan worden afgevoerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door beschadigingen, oververhitting, kortsluiting of verkeerd opladen. Ook hebben we verschillende soorten accu's met elkaar vergeleken. Hieruit bleek dat LiFePO_4 -accu's veiliger zijn dan NMC-accu's, omdat ze beter bestand zijn tegen hoge temperaturen en minder snel last hebben van thermal runaway.

Daarnaast hebben we onderzocht welke maatregelen kunnen helpen om gevaarlijke situaties te voorkomen. Hieruit bleek dat ventilatie en temperatuurdetectie belangrijk zijn om problemen op tijd te signaleren. Ook zijn duidelijke veiligheidsregels en training van de bemanning belangrijk, zodat er goed gehandeld kan worden als er toch iets misgaat.

Op basis van deze resultaten concluderen wij dat één maatregel niet genoeg is om alle risico's te beperken. De beste oplossing is een combinatie van verschillende maatregelen. Ons veiligheidsconcept bestaat daarom uit het gebruik van LiFePO_4 -accu's, een goed geventileerde opslagruimte, temperatuursensoren, duidelijke laad- en opslagregels en een training voor de bemanning.

Hiermee wordt de kans op thermal runaway kleiner en kunnen de gevolgen van een incident beter worden beperkt. Daarom kunnen wij concluderen dat een combinatie van preventie, detectie en goede voorbereiding de beste en meest praktische oplossing is voor het veilig gebruiken van lithium-ion accu's op superjachten.

Discussie

Een beperking van ons onderzoek is dat wij geen praktijkproeven hebben kunnen uitvoeren met echte lithium-ion accu's. Dit was niet mogelijk vanwege de veiligheidsrisico's en de beperkte middelen die wij als leerlingen tot onze beschikking hadden. Daardoor hebben wij onze conclusies vooral gebaseerd op literatuuronderzoek en informatie van experts.

Daarnaast hebben wij geen volledig werkend prototype gebouwd en getest. Hierdoor weten wij niet precies hoe goed alle onderdelen van ons veiligheidsconcept in de praktijk zouden functioneren. Ook kunnen factoren zoals weersomstandigheden, beweging van het schip en menselijk handelen invloed hebben op de werking van het systeem.

Als wij dit project opnieuw zouden uitvoeren, zouden wij eerder beginnen met het ontwerpen en testen van een prototype. Hierdoor zou er meer tijd zijn om verbeteringen door te voeren. Voor een vervolgproject raden wij aan om een werkend prototype te bouwen en dit onder realistische omstandigheden te testen. Ook zou onderzocht kunnen worden hoe het veiligheidsconcept kan worden geïntegreerd in bestaande systemen aan boord van superjachten.