

Scriptie afstudeerstage

# Lithium-ion

Risico op thermal runaway voor verschillende soorten lithium-ion cellen

Tessa Hogeterp

459617

12-01-2024

HBO Forensisch Onderzoek

Hogeschool Saxion

M. Steenhuisen



Acuro

Utrecht

M. Hardeman



# Risico op thermal runaway voor verschillende soorten lithium-ion cellen

**Versie 1.0**

**Utrecht , 12 januari 2024**

**Tessa Hogeterp**

459617

**Hogeschool Saxion, Enschede**  
**Life science, Engineering & Design – Forensisch Onderzoek**

**Acuro**

Maarssebroeksedijk 13a  
3542 DL Utrecht

Materiaalweg 8a  
5681 RJ Best

**Stagecoördinator Saxion**  
**Stage docent Saxion**

Louise Lycklama à Nijeholt  
Marten Steenhuisen  
Jonathan Brons

**Bedrijfscoach Acuro**

Matthijs Hardeman, Directeur

# Voorwoord

Voor u ligt de scriptie over het risico op thermal runaway bij verschillende soorten lithium-ion cellen. Dit onderzoek is uitgevoerd ter afronding van de opleiding hbo Forensisch Onderzoek aan het Saxion University of Applied Sciences, te Enschede.

Gedurende de opleiding is mijn interesse voor brandonderzoek en brandveiligheid ontstaan en per project verder gegroeid. Het afgelopen halfjaar kreeg ik de kans voor zowel persoonlijke als professionele groei, waarbij ik mijn opgedane kennis kon toepassen. Ik kijk ernaar uit om me als brandveiligheidsadviseur bij Acuro verder te verdiepen en te blijven leren over dit vakgebied.

Mijn dank gaat uit naar mijn begeleider M. Hardeman, die met enthousiasme en toewijding altijd klaarstaat om ondersteuning te bieden. Ik wil hem en I. Genefaas ook bedanken voor de mogelijkheid om mijn afstudeertraject bij Acuro te voltooien en voor hun persoonlijke begeleiding gedurende deze periode.

Zoals collega stagiaire J. van Straalen op de eerste dag tegen mij zei:

“Bij Acuro wordt je in het diepe gegooid, maar wel met enorm goede zwembandjes om”

Ook wil ik Peutz bedanken voor de mogelijkheid om gebruik te maken van hun laboratorium van brandveiligheid, wat het mogelijk heeft gemaakt op de experimentele onderzoeken uit te voeren.

Daarbij wil ik C. Huijbregts bedanken voor het mogelijk maken van de voorbereiden de experimenten en gaat mijn dank uit naar N. Stolte die altijd klaarstond om te helpen met zijn opgedane kennis uit het voorgaande onderzoek, waarop dit huidige onderzoek voortbouwde. Ook wil ik mijn overige collega's bedanken die te allen tijden bereid waren om te helpen, mij meenamen om een kijkje te nemen in het werkveld en uiteraard voor de gezelligheid.

Tot slot gaat mijn dank uit naar mijn familie die mij gedurende mijn volledige studie periode hebben gesteund.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Tessa Hogeterp

Utrecht, 12 januari 2024

# Samenvatting

De recente toename van apparaten met daarin één of meerdere lithium-ion (Li-ion) cellen, roept vragen op bij klanten van Acuro over de veiligheidsrisico's van dergelijke apparaten die opgeslagen liggen in hun faciliteiten. In het geval van interne kortsluiting kan een Li-ion cel een ongecontroleerde thermische reactie ondergaan, die bekend staat als 'thermal runaway (TR)'.

Het algemene verloop van een TR is bekend, maar kennis over de tijdsduur ontbreekt. Vandaar dat dit onderzoek zich focust op het verschil in risico tussen de Lithium Cobalt Oxide (LCO), Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) en Lithium Iron Phosphate (LFP), met een specifieke focus op de tijdslijn van de TR.

Op basis van de gevisualiseerde interne gebeurtenissen in relatie tot de temperatuur van een cel, zoals beschreven door Asecos (2023), en de beweerde volgorde van thermische stabiliteit door Doughty & Pesaran (2012), is de verwachting dat het verschil in risico tussen de drie meest gebruikte Li-ion cellen, zoals gebruikt door klanten van Acuro, sterk afhankelijk is van de verschillende initiële fasen van een TR. Hierbij wordt het volgende risico verwacht (van laag naar hoog risico): LFP > NMC > LCO.

Om het doel van het onderzoek te bereiken is gekozen voor een vaste onderzoeksopzet, conform de wetenschappelijke methode. Volgens deze onderzoeksstrategie wordt door middel van een experimentele opzet, de opgestelde hypothese getoetst, waarna antwoord kan worden gegeven op de gestelde vraag.

Het laboratorium voor brandveiligheid van Peutz heeft twee dagen beschikbaar gesteld om experimenten uit te voeren. De LCO, NMC en LFP zijn hier in triplo met twee verschillende snelheden extern verhit op een kookplaat.

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de tijd tot bepaalde initiële fasen sterk afhankelijk is van de snelheid waarmee de cel extern wordt verhit. Opvallend is dat de gemiddelde temperatuur waarbij dit gebeurt aanzienlijk dicht bij elkaar ligt. Uit dit onderzoek kan dus worden geconcludeerd dat in plaats van het bijhouden van de verstreken tijd vanaf het moment van 'abuse', het nauwlettend monitoren van de cel temperatuur meer inzicht kan bieden in het stadium van de TR waarin de Li-ion cel zich bevindt

Statistisch gezien liggen de gemiddelde tijdsintervallen waarin een TR optreedt te ver uit elkaar om op basis van deze bevindingen specifieke tijdslijnen te benoemen voor elk van deze drie typen Li-ion cellen. Gezien de mate van schade, het ontbreken van vlammen en/of vonken en het feit dat de IFR er gemiddeld langer over doet om zijn piektemperatuur te bereiken kan wel worden geconcludeerd dat de het risico van de LFP-cellen lager is dan die van de LCO- en NMC- cellen.

# Inhoud

Afkortingenlijst.....	9
1 Inleiding.....	10
1.1 Aanleiding.....	10
1.2 Probleemanalyse.....	10
1.3 Doelstelling.....	11
1.4 Afbakening.....	11
2 Theoretisch kader.....	13
2.1 Energiedragers.....	13
2.2 Lithium-ion cellen.....	13
2.3 Op- en ontladen.....	16
2.4 Thermal runaway.....	17
2.5 Beveiliging van energiedragers.....	18
3 Onderzoeksstrategie.....	21
3.1 Doel.....	21
3.2 Onderbouwing.....	21
3.3 Hypothese.....	23
4 Materiaal & methode.....	24
4.1 Voorbereidingen.....	24
4.2 Peutz.....	27
4.3 Resultaten verwerken.....	29
5 Resultaten.....	30
5.1 Voorbereidingen.....	30
5.2 Peutz.....	31
5.3 Deelconclusie.....	36
6 Discussie.....	37
7 Conclusie.....	40
8 Aanbevelingen.....	41
9 Bibliografie.....	44
10 Bijlage A :EV's are less likely to catch fire.....	47
11 Bijlage B: Beveiligingsapparatuur gedemonteerde 18650 Li-ion batterijen.....	48
12 Bijlage C: Interne gebeurtenissen TR.....	49
13 Bijlage D: Testopstelling.....	50
14 Bijlage E: Kalibratie rapporten.....	51
15 Bijlage F: Volgorde van testen bij Peutz.....	64

16	Bijlage G: Resultaten per cel.....	65
17	Bijlage H: Bepaling $t\alpha/2$ .....	85
18	Bijlage I: Resultaten voorbereidende experimenten .....	86
19	Bijlage J: Waarnemingen cellen voorbereiden .....	87
20	Bijlage K: Opwarmen kookplaat .....	89
21	Bijlage L: Temperatuursverloop ICR, INR en IFR .....	90
22	Bijlage M: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen in stappen .....	96
23	Bijlage N: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen bij hoge temperatuur ....	97
24	Bijlage O: Cel temperatuur – Opwarmen bij hoge temperatuur .....	98
25	Bijlage P: Cel temperatuur – Opwarmen in stappen .....	99
26	Bijlage Q: Tijd en temperatuur bij wegvallen spanning’ .....	100

# Figurenlijst

Figuur 1 Stadia thermal runaway lithium-ion, ontbrekende x-as.....	10
Figuur 2 Opbouw Li-ion energiedragers .....	13
Figuur 3 Verschillende configuratie Li-ion cellen.....	13
Figuur 4 Opbouw cilindrische cel .....	13
Figuur 5 Vergelijking van de zes meest voorkomende lithium-ion cellen. ....	14
Figuur 6 Schematische weergave van het opladen en ontladen een LI-ion cel.....	16
Figuur 7 Solid Electrolyte Interphase .....	16
Figuur 8 Verschillende oorzaken een thermal runaway.....	17
Figuur 9 Volgorde van materiaal afbraak voorafgaande aan de TR .....	17
Figuur 10 Werking drie-laagse separator .....	19
Figuur 11 Opbouw 18650 Li-ion cel.....	19
Figuur 12 Schematisch dwarsdoorsnede van de 'Cap' .....	19
Figuur 13 CID voor- (a) en na (b) activatie.....	20
Figuur 14 Route van het gas gedurende 'venting' .....	20
Figuur 15 Bottom vent .....	20
Figuur 16 BSE ICR18650 met isolatiedraad .....	24
Figuur 17 Schakelaar 'uit' .....	24
Figuur 18 Schakelaar 'aan' .....	24
Figuur 19 Cel met thermokoppel en ingekort installatiedraad .....	25
Figuur 20 Plaatsing van de cel in de 'veiligheidsbak' .....	25
Figuur 21 BSE ICR18650.....	25
Figuur 22 Samsung INR18650-35E .....	25
Figuur 23 BSE IFR18650.....	25
Figuur 24 Nummering cellen .....	26
Figuur 25 soldeerstrip vast solderen .....	26
Figuur 26 Kortsluiting tussen de plus- en minpool.....	27
Figuur 27 Cellen verpakt en gereed om te vervoeren.....	27
Figuur 28 Plaatsing thermokoppels.....	27
Figuur 29 Testopstelling .....	27
Figuur 30 Plaatsing van de cel en thermokoppel 1 binnen deze rode cirkel .....	28
Figuur 31 Berekenen verstreken tijd .....	29
Figuur 32 Voorbeeld gloeiplug .....	30
Figuur 33 Ongecontroleerde bewegingen ICR 1.....	31
Figuur 34 Gedeelte cel uit testopstelling gelanceerd INR 1 .....	31
Figuur 37 Moment van uitgassen IFR 3 .....	34
Figuur 36 Moment van ontbranding .....	34
Figuur 35 Moment van ontbranding ICR 2 .....	34
Figuur 40 IFR 3 na ontbranding .....	35
Figuur 38 ICR 1 na ontbranding .....	35
Figuur 39 INR 6 na ontbranding .....	35

## Grafiekenlijst

Grafiek 1 Zelfverwarmingsgraad ten opzichte van de temperatuur .....	18
Grafiek 2 Interne gebeurtenissen tijdens het ontstaan van een thermal runaway .....	23
Grafiek 3 Resultaten experiment ICR18650 .....	23
Grafiek 4 Temperatuur kookplaat .....	30
Grafiek 5 Standaard brandkromme .....	31
Grafiek 6 Opwarmen kookplaat .....	31
Grafiek 7 Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen in stappen .....	32
Grafiek 8 Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen bij hoge temperatuur .....	33
Grafiek 9 Cel temperatuur – Opwarmen in stappen .....	33
Grafiek 10 Cel temperatuur – Opwarmen bij hoge temperatuur.....	34
Grafiek 11 De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd – INR 4 .....	35
Grafiek 12 De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd – ICR 8.....	35
Grafiek 13 Tijd en temperatuur op het moment dat de spanning wegvalt.....	36
Grafiek 14 Temperatuursverloop Li-ion cellen bij verschillende SoC .....	38

## Tabellenlijst

Tabel 1 Afkortingenlijst .....	9
Tabel 2 Naamgeving zes meest voorkomend Li-ion cellen.....	14
Tabel 3 Gemeten temperatuur van de gloeiplug bij verschillende spanning instellingen. ....	30



# Afkortingenlijst

Li-ion	Lithium-ion
TR	Thermal runaway
SEI	Solid Electrolyte Interphase
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LMO	Lithium Manganese Oxide
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
LFP	Lithium Iron Phosphate
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide
LTO	Lithium Titanate
ICR	Lithium ion Cobalt Round
IMR	Lithium ion Manganese Round
INR	Lithium ion Nickel Round
IFR	Lithium ion Ferro Round
PP	Polypropylene
PE	Polyethylene
BI	Betrouwbaarheidsinterval
SoC	State of Charge
EOS	Energieopslagsysteem
HRR	Heat release rate

Tabel 1 Afkortingenlijst

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 08 januari 2024)

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

“E-bike gaat in vlammen op nadat accu ontploft in Weert.” (NOS, 2021) “Accu’s in het lab: tikkende brandbom.” (Dupa Veiligheidstechniek, 2022) “Jaarlijks tientallen branden in vuilniswagens door batterijen en accu’s.” (van der Bol, 2023) Deze verscheidene nieuwsberichten kunnen de indruk wekken dat elk apparaat met een accu een potentieel gevaar vormt en spontaan kan ontbranden.

De recente toename van apparaten met accu's, variërend van smartphones tot elektrische auto's, roept vragen op bij klanten van Acuro over de veiligheidsrisico's van dergelijke apparaten, die opgeslagen liggen in hun faciliteiten. Deze accu's bestaan uit één of meerdere lithium-ion (Li-ion) cellen. In het geval van interne kortsluiting kan een Li-ion cel een ongecontroleerde thermische reactie ondergaan, die bekend staat als 'thermal runaway' (TR).

Het is echter belangrijk om op te merken dat het risico dat een accu spontaan explodeert, in werkelijkheid aanzienlijk kleiner is dan de media soms doet vermoeden. Zo blijkt bijvoorbeeld uit de cijfers dat een elektrische auto zelfs een kleinere kans heeft op ontbranding dan een auto met een verbrandingsmotor (10 Bijlage A:Ev's are less likely to catch fire.) Ook eerdere experimenten, uitgevoerd door Acuro, met een ICR18650-batterij hebben aangetoond dat overladen of blootstelling aan externe temperatuurverhogingen niet per definitie leiden tot het ontstaan van een TR (Stolte, 2023).

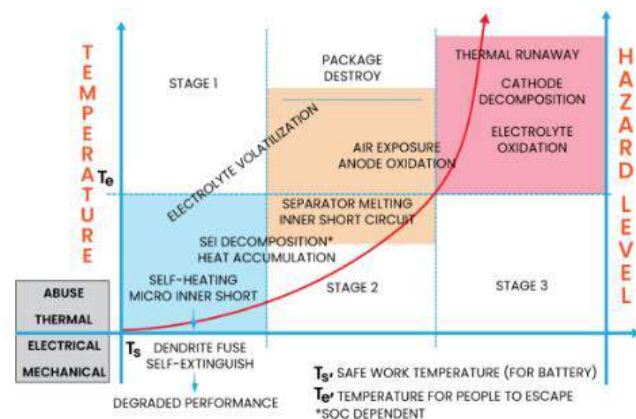
## 1.2 Probleemanalyse

Om een goed beeld te krijgen van het aanwezige risico op TR, ontbreekt enkele informatie omtrent Li-ion cellen.

Voor het geven van een goed, risicogericht, brandveiligheidsadvies aan de klant, rijst de vraag naar de voorwaarden voor het ontstaan van een TR. Daarnaast wordt momenteel vaak in het algemeen gesproken over 'Li-ion batterij', terwijl er verschillende soorten zijn. Acuro wil daarom onderzoeken of de risico's op TR per type variëren.

Om antwoord te kunnen geven op deze vragen, is het noodzakelijk om meer informatie te verkrijgen over de bijbehorende tijdslijn van een TR. Zoals te zien is in Figuur 1, is het algemene verloop van een TR bekend, maar ontbreekt de invulling van de x-as.

Wanneer iets afwijkends aan de cel wordt waargenomen, is bekend dat er een kans bestaat op TR. Hoeveel tijd er echter nog is voordat dit plaatsvindt is daarin tegen onbekend (M. Hardeman, persoonlijke communicatie, 24 augustus 2023). Terwijl juist deze ontbrekende gegevens van belang zijn bij het opstellen van handelingsperspectieven omtrent de opslag van lithium houdende energiedragers.



Figuur 1 Stadia thermal runaway lithium-ion, ontbrekende x-as

(Niclas, 2020)

### 1.3 Doelstelling

Doel van dit onderzoek is om binnen vijf maanden voor het bedrijf Acuro inzicht te krijgen in het verschil in risico tussen de drie, bij klanten van Acuro, meest voorkomende Li-ion cellen. Specifiek gericht op het verschil van de bijbehorende tijdslijn van de thermal runaway.

Om dit doel te bereiken moet de volgende hoofdvraag met bijbehorende deelvragen worden beantwoord.

#### 1.3.1 Hoofdvraag

Wat is het verschil in risico tussen de drie, bij klanten van Acuro, meest voorkomende Li-ion cellen, met betrekking tot de tijdslijn van de thermal runaway?

#### 1.3.2 Deelvragen

- ▶ Wat zijn de drie meest voorkomende lithium-ion cellen bij klanten van Acuro?
- ▶ Wat is in de literatuur bekend over de voorwaarde voor het ontstaan van een thermal runaway?
- ▶ Wat is in de literatuur bekend over de verschillende fases gedurende het ontstaan van een thermal runaway in relatie tot de tijd?
- ▶ Wat is de tijdslijn van de thermal runaway voor elk van deze drie lithium-ion cellen?

### 1.4 Afbakening

Voor dit onderzoek is een periode beschikbaar van vijf maanden, lopend van september 2023 tot en met januari 2024. Aan de opzet en uitvoering van het onderzoek zitten een aantal randvoorwaarden verbonden en zijn er ter afbakening een aantal keuzes gemaakt. Deze keuzes zijn gebaseerd op zowel de beschikbare tijd voor het gehele onderzoek als de twee dagen waarop Peutz zijn laboratorium ter beschikking stelt voor het uitvoeren van experimenteel onderzoek.

In dit onderzoek ligt de specifieke focus op secundaire (oplaadbare) cellen, waarbij de primaire (niet-oplaadbare) cellen buiten beschouwing worden gelaten. Zoals uitgelegd in het theoretisch kader, zijn er verschillende subcategorieën van Li-ion batterijen. Deze subcategorieën ontstaan door variaties in de materialen die worden gebruikt voor de basiscomponenten van de cellen. Dit onderzoek richt zich specifiek op cellen waarvan de kathode bestaat uit lithiumverbindingen. Er zijn weliswaar onderzoeken waarin gevarieerd wordt met het materiaal van de anode en het elektrolyt, maar deze batterijen bevinden zich veelal nog in de ontwikkelingsfase en zijn dus nog niet in gebruik. Ter afbakening wordt er experimenteel onderzoek uitgevoerd met drie Li-ion cellen, gebaseerd op welke het meest worden gebruikt door klanten van Acuro. De Li-ion cellen waarmee de testen worden uitgevoerd, zullen cilindrisch van vorm zijn, omdat deze het meest voorkomend zijn. (Brans, 2023) De cilindrische cellen zijn van het type 18650 (diameter 18mm, lengte 65 mm, 0 = 'rond/cilindrisch' (klantenservice La Kraft, z.d.)). De keuze hiervoor is gemaakt omdat de energieopslagsystemen (EOS) en accupakketten van de klanten van Acuro zijn opgebouwd uit de cellen met deze afmeting (Tesla, 2018).

De keuze is gemaakt om de experimenten uit te voeren met de Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC), Lithium Cobalt Oxide (LCO) en de Lithium Iron Phosphate (LFP). Deze drie behoren tot de zes meest voorkomende Li-ion batterijen (Battery university, 2021).

Op basis van criteria zoals capaciteit, vermogen, veiligheid, prestaties, levensduur en kosten, komen NMC en LFP als de meest geschikte opties naar voren (Miao et al., 2019). Dit is terug te zien in de toepassingsgebieden, wat verder wordt toegelicht in '2.2 Lithium-ion cellen'. In het eerdere onderzoek uitgevoerd door Acuro werd gebruik gemaakt van de ICR18650 (Stolte, 2023), wat een LCO-cel is. Vandaar de keuze om ook deze mee te nemen in het onderzoek, zodat de resultaten vergeleken kunnen worden. Omdat deze cellen veel voorkomend zijn, komen ze ook veelvuldig terug in de literatuur, waardoor er over deze cellen genoeg informatie beschikbaar is.

De experimenten zullen worden uitgevoerd met Li-ion cellen. Accu's of grote energieopslagsystemen zijn opgebouwd uit een veelvoud van deze cellen. Dit onderzoek is dus kleinschalig, maar de resultaten kunnen wel gegeneraliseerd worden. Deze aanpak elimineert een groot deel van de variabelen en maakt het isoleren van de onafhankelijke variabele eenvoudiger. Bovendien is het vanwege de kosten en praktische haalbaarheid niet mogelijk om op grotere schaal te testen. Daarbij komt het feit, dat er vanuit verschillende mogelijke testlocaties weerstand werd geboden voor het uitvoeren van testen met batterijen, vanwege milieutechnische redenen. (F. van der Ploeg, e-mail, 20 september 2023)

Met de afgebakende hoeveelheid Li-ion cellen wordt experimenteel onderzocht of deze in TR kan worden gebracht.

Een TR kan een mechanische-, thermische- of elektrische oorzaak hebben.

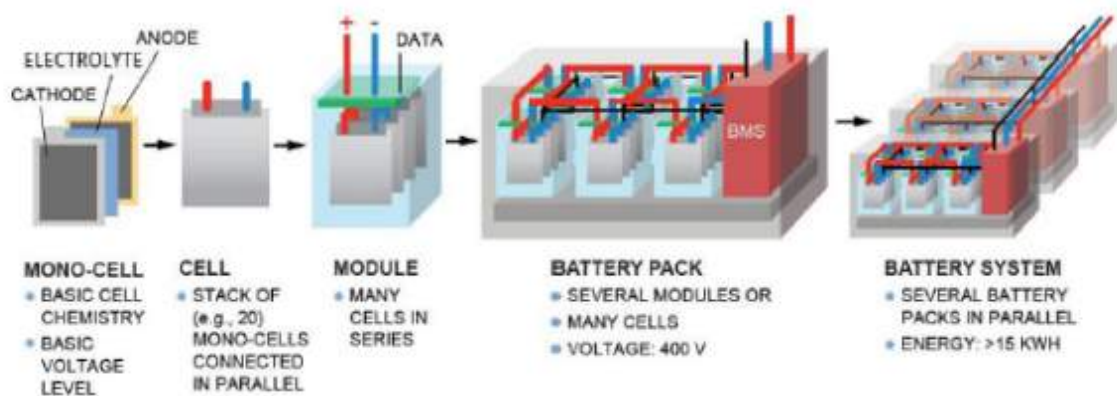
- ▶ In verband met de persoonlijke veiligheid zal een TR niet worden veroorzaakt door een mechanische oorzaak.
- ▶ De thermische oorzaak gaat over het extern verhitten van de Li-ion cel. Dit zal in het experimentele onderzoek worden gedaan door de drie verschillende Li-ion cellen om de beurt te verwarmen op een kookplaat, om te kijken of dit een TR tot stand brengt.
- ▶ De TR kan elektrisch veroorzaakt worden door middel van kortsluiting of overmatig ontladen en overladen. Overladen is een tijdrovend proces, en aangezien er slechts twee dagen beschikbaar zijn voor het uitvoeren van de experimenten, is besloten deze methode buiten beschouwing te laten. Bovendien worden de Li-ion cellen bij de meeste klanten van Acuro enkel opgeslagen en niet gebruikt, waardoor overladen in deze situaties geen mogelijke oorzaak is van TR. Ten slotte leidt overladen tot het opwarmen van de cel, om meer mogelijke variabelen te elimineren is het beter om eerst te begrijpen wat er gebeurt wanneer de cel wordt opgewarmd.

## 2 Theoretisch kader

‘Oplaadbare batterij’, ‘accu’ en ‘cel’ zijn allemaal termen die verwijzen naar de energiedragers, waarop dit onderzoek zich concentreert. Energiedragers zijn verkrijgbaar in verschillende configuraties en groottes. Dit hoofdstuk biedt een overzicht van deze varianten. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de cel om een grondiger inzicht te krijgen in de werking van de cel. Tenslotte wordt specifiek aandacht besteed aan de eigenschappen van lithium, met bijzondere nadruk op het fenomeen TR, waarop dit onderzoek zich richt.

### 2.1 Energiedragers

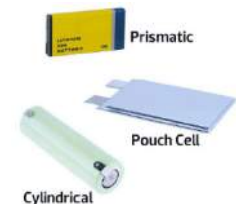
Globaal beschreven is een energiedrager opgebouwd uit een kathode, een anode en het elektrolyt, dat samen een ‘cel’ vormt. Meerdere van deze cellen die met elkaar zijn verbonden, worden aangeduid als een ‘module’. Wanneer deze modules worden geschakeld, ontstaat een ‘battery pack’ of ‘energieopslagsysteem (EOS)’. (Figuur 2)



Figuur 2 Opbouw Li-ion energiedragers (Brans, 2023)

Dit onderzoek focust zich enkel op het cel niveau van de energiedragers. De cellen zijn beschikbaar in de vormen prismatisch, pouch en cilindrisch (Figuur 3), waarvan de cilindrische cel de meest voorkomende is. (Brans, 2023)

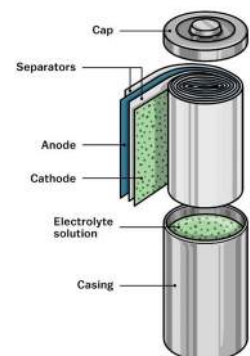
Wanneer deze cilindrische cel wordt 'uitgerold', zijn de basiselementen opgebouwd zoals weergegeven in Figuur 4. De anode en kathode worden fysiek van elkaar gescheiden door een separator en tussen deze elementen bevindt zich het vloeibaar elektrolyt. (Brans, 2023)



Figuur 3 Verschillende configuratie Li-ion cellen (Brans, 2023)

### 2.2 Lithium-ion cellen

Voor de drie basiscomponenten kunnen verschillende materialen worden gebruikt, wat leidt tot diverse subcategorieën. Dit onderzoek concentreert zich op specifieke subcategorieën waarbij de kathode vervaardigd is uit lithiumverbindingen. Aangezien de naamgeving van de cellen gebaseerd is op de chemische samenstelling van de kathode, worden deze aangeduid als 'Li-ion cellen'.



Figuur 4 Opbouw cilindrische cel (Brans, 2023)

De Li-ion worden veelvoudig gebruikt vanwege zijn compacte en krachtige eigenschappen. In vergelijking hebben de cellen die lithium bevatten een veel hogere energiedichtheid. Daarnaast is de cel lichter van gewicht, is hij onderhoudsvrij en gaat hij vele laadcycli langer meer. (Stibat, 2023) (Asecos, z.d.)

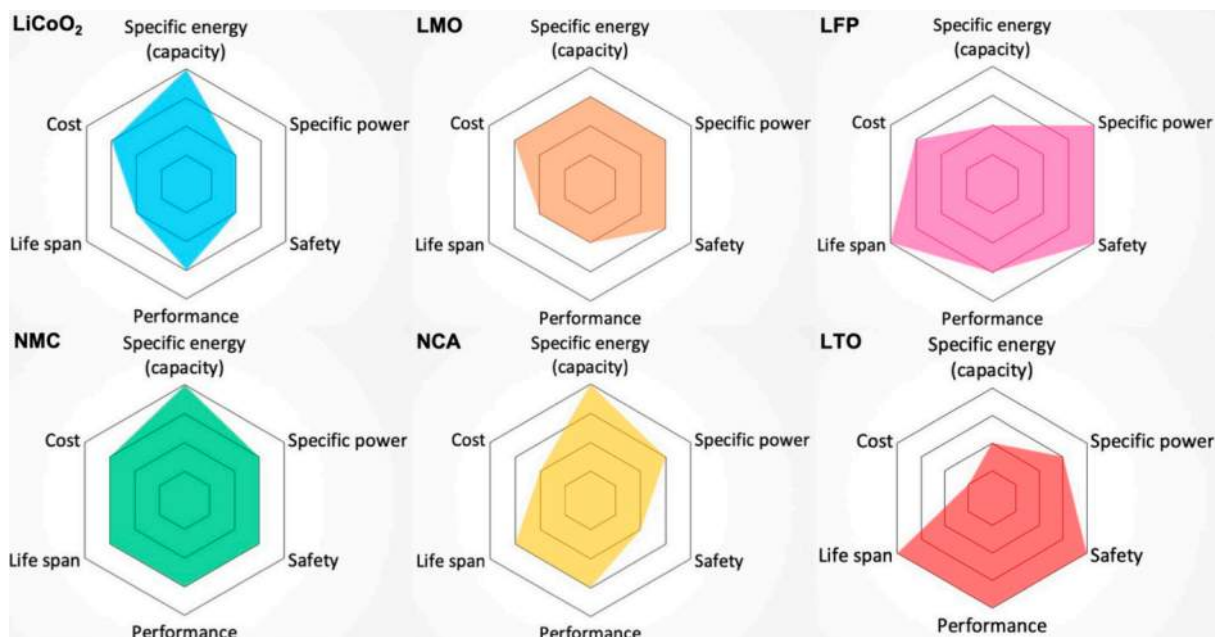
De voorspelling is dat de batterijmarkt tegen 2030 verviervoudigd zal zijn ten opzichte van 2021, waarbij Li-ion zijn dominante positie in de markt zal behouden (Statistica Research Department, 2023).

Li-ion cellen zijn uitgerust met een anode gemaakt van grafiet en een kathode vervaardigd uit lithiumverbindingen. Het elektrolyt bestaat uit een vloeibaar mengsel van lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven. Er worden momenteel batterijen ontwikkeld waarbij het elektrolyt is gemaakt van een vast materiaal (Solid-state batteries), dit maakt het gebruik van een separator overbodig. Bovendien wordt er ook onderzoek gedaan naar variaties in de anode. (Brans, 2023)

De variaties lithiumverbindingen in de kathode resulteren in een verscheidenheid aan subcategorieën Li-ion cellen, waarvan de zes meest voorkomende (Battery university, 2021), zijn vermeld in Tabel 2.

Naam (Battery university, 2021)	Afkorting (Battery university, 2021)	Chemische symbool (Battery university, 2021)	Manufacturing code cilindrische cel (klantenservice La Kraft, z.d.) (Z, 2016)
Lithium Cobalt Oxide	LCO	LiCoO <sub>2</sub>	ICR (Lithium ion Cobalt Round)
Lithium Manganese Oxide	LMO	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	IMR (Lithium ion Manganese Round)
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	NMC	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	INR (Lithium ion Nickel Round)
Lithium Iron Phosphate	LFP	LiFePO <sub>4</sub>	IFR (Lithium ion Ferro (ijzer) Round)
Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	NCA	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	*Manufacturing code onbekend
Lithium Titanate	LTO	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>	*Manufacturing code onbekend

Tabel 2 Naamgeving zes meest voorkomend Li-ion cellen  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 13 november 2024)



Figuur 5 Vergelijking van de zes meest voorkomende lithium-ion cellen.  
(Miao et al., 2019)



Volgens de gegevens in Figuur 5, gebaseerd op criteria zoals capaciteit, vermogen, veiligheid, prestaties, levensduur en kosten, worden NMC, LFP en LMO beschouwd als de meest geschikte opties (Miao, Hynan, Jouanne, & Yokochi, 2019). Uit recente persoonlijke communicatie (T. van Stam & N. Stolte, persoonlijke communicatie, 1 september 2023) blijkt dat NMC en LFP de meest voorkomende Li-ion cellen zijn bij klanten van Acuro.

### 2.2.1 Lithium Cobalt Oxide

LCO was de voornaamste keuze in mobiele telefoons, camera's en andere soortgelijke apparaten, vanwege de hoge capaciteit in combinatie met het lichte gewicht en compacte formaat. Dit type kathode heeft echter een lage thermische stabiliteit en een kortere levensduur. Daarbij komt het feit dat er maar een beperkte voorraad aan kobalt beschikbaar is, wat de winning er van duur maakt. (Miao et al., 2019)

Door gebruik te maken van magnesium in plaats van kobalt is de LMO stabiel en daarmee veiliger. Dit gaat echter ten koste van de capaciteit, die bij de LMO 33% lager is dan de LCO, wat de potentiële groei van de LMO op de markt gelimiteerd maakt. (Miao et al., 2019)

### 2.2.2 Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide

De samenstelling van actieve kathodematerialen heeft geleid tot een van de meest succesvolle Li-ion cellen, namelijk NMC. NMC maakt gebruik van de stabiliserende eigenschappen van magnesium en bereikt tegelijkertijd een aanzienlijke capaciteit dankzij de toevoeging van nikkel. Oorspronkelijk werden gelijke delen nikkel, magnesium en kobalt gebruikt (NMC111). Echter, het winnen van kobalt blijft een uitdaging. Desondanks zijn de voordelen van NMC significant, waardoor het de meest gebruikte batterij is geworden in gereedschappen op stroom en e-bikes. (Battery university, 2021) (Miao et al., 2019)

Ter vermindering van het gebruik van kobalt worden daarom andere verhoudingen toegepast, zoals bij NMC811, wat staat voor 8 delen nikkel, 1 deel magnesium en 1 deel kobalt. Hierdoor dalen de kosten terwijl de hoge capaciteit behouden blijft. Dit heeft dit type batterijen aantrekkelijk gemaakt voor gebruik in accupakketten van elektrische voertuigen en grote energieopslagsystemen. (Battery university, 2021)

Echter, deze aanpassing betekent opnieuw het gebruik van materialen met een hogere energiedichtheid, die een lagere thermische stabiliteit hebben en daardoor veiligheidsproblemen kunnen veroorzaken (Feng et al., 2017).

### 2.2.3 Lithium Iron Phosphate

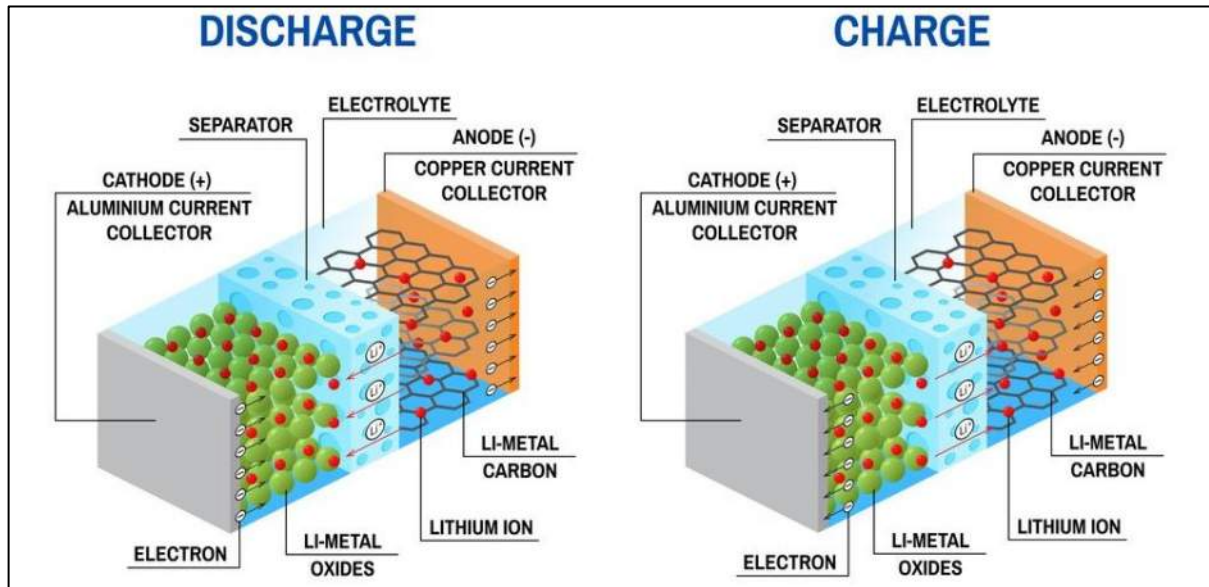
LFP is thermisch gezien het meest stabiel en is goedkoper vanwege een betere beschikbaarheid op de markt (Miao et al., 2019). Hoewel de capaciteit per gram aanzienlijk lager is, voorspelt het doctoraal proefschrift door Xu (2022) dat LFP naar verwachting 60% van de markt zal uitmaken.

Deze overstap ziet ook Acuro terug bij grote klanten zoals Alfen en Tesla, die de overstap van NMC naar LFP beginnen te maken. (C. Huijbregts, Persoonlijke communicatie, 28 december 2023)

Op basis van deze gegevens is de keuze gemaakt de testen uit te voeren met de NMC, de LFP en ter vergelijking met de LCO zoals beschreven in de afbakening.

## 2.3 Op- en ontladen

Binnenin de cel vindt tijdens het op- en ontladen een elektrochemische reactie plaats, zoals schematisch weergegeven in Figuur 6.

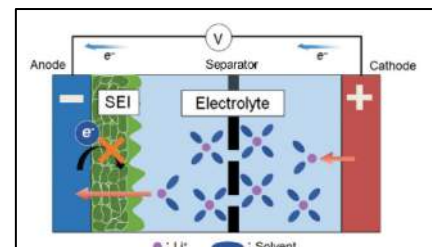


Figuur 6 Schematische weergave van het opladen en ontladen een Li-ion cel  
(FHI federatie van technologiebranches, 2020)

Aan de kathodezijde maakt het lithiatoom (Li) deel uit van een metaaloxide waar het relatief stabiel is. Tijdens het opladen, wanneer een energiebron op de cel is aangesloten, wordt het lithium van het metaaloxide gescheiden. Op dat moment wordt het zeer reactief en splitst het atoom in een positief Li-ion ( $\text{Li}^+$ ) en een negatief elektron ( $e^-$ ). Het elektron wordt aangetrokken door de positieve pool van de energievoorziening. Het elektrolyt laat alleen Li-ionen door en geen elektronen, waardoor de elektronen via de energiebron naar de anode stromen. Omdat de elektronen negatief zijn, worden ook de positieve Li-ionen in de richting van de anode getrokken. Hier worden de opnieuw gevormde lithiatomen opgeslagen tussen het grafiet. De cel is volledig opgeladen wanneer alle Li-ionen de anode hebben bereikt.

Zoals eerder benoemd, zijn deze lithiatomen zeer onstabiel en willen ze zo snel mogelijk terugkeren naar hun stabiele staat tussen het metaaloxide aan de kathodezijde. Zodra er dus een belasting wordt aangesloten op de cel, wordt het proces omgekeerd. (Lesics, 2019)

Gedurende de eerste laadcyclus wordt de Solid Electrolyte Interphase (SEI) gevormd en hecht zich aan de anode. De SEI werkt als een extra microscopisch beschermlaagje en speelt hiermee een belangrijke rol voor de stabiliteit in de cel. Zoals schematisch weergegeven in Figuur 7, zorgt dit laagje ervoor dat ondanks het spanningsverschil de elektronen niet ongecontroleerd overspringen. (Brans, 2023)



Figuur 7 Solid Electrolyte Interphase  
(Takenaka et al., 2021)



## 2.4 Thermal runaway

Li-ion cellen zijn in principe ontworpen om stabiel te zijn. Echter, wanneer het elektrochemische proces verstoord raakt, kan dit leiden tot exotherme chemische reacties. De hierbij vrijkomende warmte kan nieuwe chemische reacties initiëren. Na verloop van tijd kan de hitte, die tijdens deze ongewenste reacties wordt gegenereerd, een punt bereiken waarop het proces zichzelf in stand houdt, wat resulteert in wat bekend staat als een TR.

(Brans, 2023)

Pfrang et al.(2017) beschrijft de TR als volgt: "Thermal runaway describes the rapid self-heating of a cell driven by exothermic reactions of cell materials whereby the stored chemical energy is released."

Zoals afgebeeld in Figuur 8 kan de oorzaak van een TR mechanisch, elektrisch of thermisch zijn. Door dit 'abuse' van de cel wordt direct- of indirect interne kortsluiting veroorzaakt wat kan leiden tot TR.

De exacte exotherme reactie tijdens een TR varieert afhankelijk van de oorzaak en de chemische samenstelling van de cel. (Lyu et al., 2020)

Over het algemeen kunnen de basisprocessen die achtereenvolgens plaatsvinden als volgt worden beschreven (Figuur 9):

### 1. Oververhitting

Tijdens het opladen en ontladen van de cel ontstaat warmte als gevolg van de elektrochemische reactie.

### 2. Afbraak protective layer(SEI) ( $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

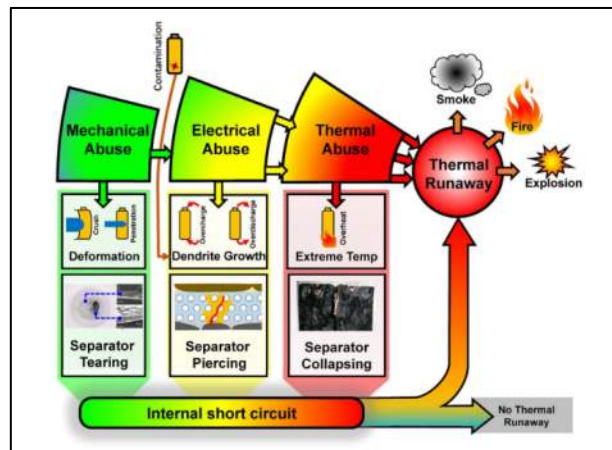
Boven een temperatuur van ronduit 90 graden Celsius begint de afbraak van het SEI. Dit is een exotherm chemisch proces waar brandbare gassen en zuurstof vrijkomen. (Liu et al., 2018)

### 3. Reactie anode (Li) en elektrolyt

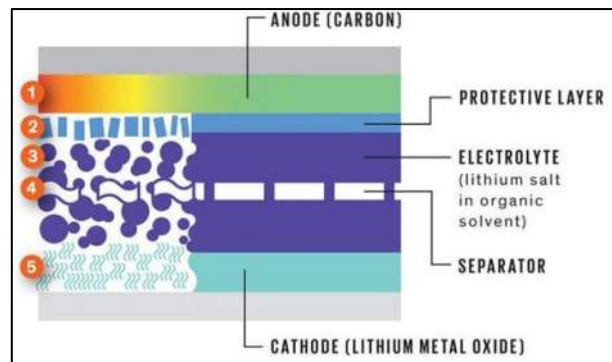
De temperatuurstijging, die optreedt bij de afbraak van het SEI, veroorzaakt een reactie tussen het lithiummetaal in de anode en het organische oplosmiddel in het elektrolyt. Dit is eveneens een exotherme reactie, wat resulteert in een verdere temperatuurstijging en de productie van brandbare koolwaterstofgassen. (Liu et al., 2018)

### 4. Separator smelt ( $T > 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Wanneer de cel een temperatuur van meer dan 130 °C bereikt, zal de polyethyleen (PE) / polypropyleen (PP) separator smelten. Dit leidt tot het verdwijnen van de fysieke afscheiding tussen de anode en de kathode, wat resulteert in interne kortsluiting.



Figuur 8 Verschillende oorzaken een thermal runaway (Feng et al., 2017)



Figuur 9 Volgorde van materiaal afbraak voorafgaande aan de TR (Vrieling, 2023)

Het smelten van de separator is een proces waarbij warmte wordt geabsorbeerd. Echter, leidt de resulterende interne kortsluiting juist tot een zeer exotherme reactie die de TR verder doet voortduren. (Lyu et al., 2020)

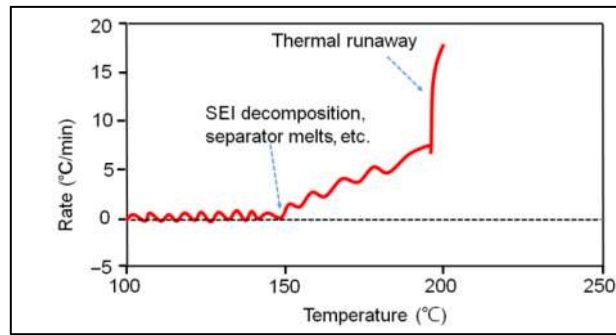
### 5. Kathode afbraak ( $T > 180\text{ °C}$ )

Als gevolg van deze aanzienlijke temperatuurstijging, die hoger is dan  $180\text{ °C}$ , zal de kathode ontleden. Deze reactie is eveneens extreem exotherm, wat leidt tot de vorming van brandbare gassen en een aanzienlijke hoeveelheid zuurstof. (Lyu et al., 2020)

Het vrijkomen van zuurstof maakt de branddriehoek compleet. De opgebouwde hitte, brandbare gassen en zuurstof resulteren in het ontbranden van de Li-ion cel. (Liu et al., 2018) (Lyu et al., 2020) Het blussen van een brand berust op het wegnemen van een van de cruciale factoren die de brand in stand houden (Tromp & van Mierlo, 2013). De uitdaging bij Li-ion cellen is dat ze zelf alle drie deze factoren creëren, waardoor het blussen een complexe opgave is.

De eerder beschreven exotherme reacties die plaatsvinden in aanloop tot het ontstaan van een TR leiden niet allemaal tot een gelijke snelheid waarmee de temperatuur van de cel stijgt.

Tijdens het op- en ontladen van de cel is dit minder dan  $1\text{ °C/min}$ . Gedurende de daaropvolgende reacties stijgt de snelheid tussen de  $1\text{--}10\text{ °C/min}$ . Als resultaat van de interne kortsluiting stijgt de temperatuur met een snelheid van meer dan  $10\text{ °C/min}$ . Vanaf dit moment is er sprake van een TR (Lyu et al., 2020). Dit is terug te zien in Grafiek 1, van Liu et al. (2018) waarin de typische zelfverwarmingsgraad van een Li-ion cel uitgezet is tegenover de temperatuur.



Grafiek 1 Zelfverwarmingsgraad ten opzichte van de temperatuur (Liu et al., 2018)

## 2.5 Beveiliging van energiedragers

De 18650 Li-ion cellen die gebruikt zijn voor dit onderzoek worden verkocht als 'onbeveiligde batterijen'. Toch bevatten deze cellen enkele interne- en externe beveiligingen.

### 2.5.1 Interne beveiliging

Liu et al. (2018) beschrijft de belangrijkste vooruitgang die is geboekt op het gebied van materiaalkeuze voor de veiligheid van Li-ion cellen. In deze review wordt onderscheid gemaakt tussen 'interne' en 'externe beveiliging'. 'Interne beveiliging' richt zich op het gebruik van intrinsiek veilige materialen, wat wordt beschouwd als "the 'ultimate' solution for battery safety." (Liu et al., 2018). Hieronder valt ook de materiaalkeuze van de kathode, zoals beschreven in '2.2 Lithium-ion cellen'.

Naast het gebruik van veiligere kathodematerialen beschrijft Lui et al. (2018) andere innovatieve oplossingen die worden toegepast om de verschillende oorzaken per stadia van een TR aan te pakken. Een van deze oplossingen is het gebruik van een drie-laagse separator. Als de separator wegvalt, kan dit leiden tot kortsluiting, wat op zijn beurt een TR kan veroorzaken.

Door polypropylene (PP) (smeltpunt 165 °C) en polyethene (PE) (smeltpunt 135 °C) te combineren tot een PP/PE/PP drie-laagse separator wordt aanzienlijk meer thermische stabiliteit gecreëerd dan wanneer deze stoffen afzonderlijk als separator worden gebruikt. Bij stijgende temperaturen in deze drie-laagse separator en een bereik van ongeveer 135 °C begint de PE te smelten, wat resulteert in het blokkeren van de ionenstroom (Figuur 10). Op dit punt is de cel 'intern gefaald' oftewel 'defect'. (Liu et al., 2018)



Figuur 10 Werking drie-laagse separator (Li et al., 2018)

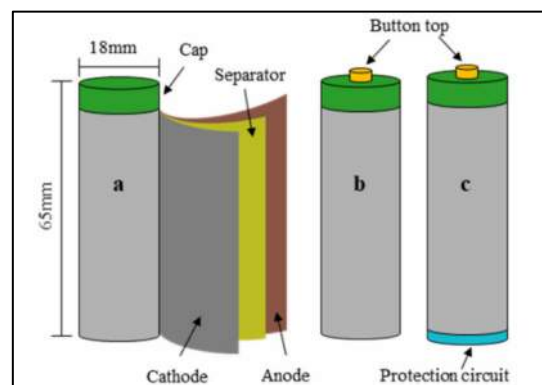
Eveneens kan dit effect worden gerealiseerd door het toevoegen van een laag van 'thermoresponsief PE' of 'paraffine wax microsferen' op de separator. Deze extra laag kan een niet-permeabele barrière vormen zodra een kritieke temperatuur van 130 °C wordt bereikt.

(Liu et al., 2018)

## 2.5.2 Externe beveiliging

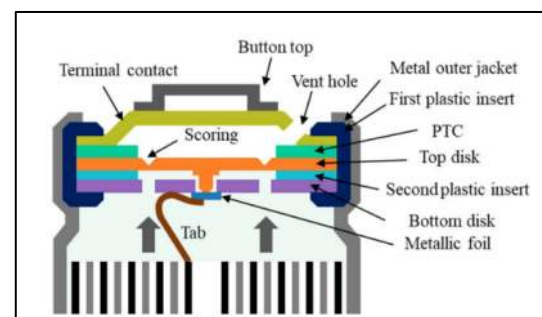
Er zijn 'Button top-' en 'Flat top batterijen'. Dit verwijst naar het al dan niet aanwezig zijn van een 'Button top' boven op de 'Cap' (Figuur 11). Dit dient uitsluitend voor een betere verbinding met een apparaat. (Klantenservice 123accu.nl, telefoongesprek, 29 december 2023) (Xu et al., 2021)

De externe beveiliging bevindt zich in de 'Cap' van een 18650 Li-ion cel en onderaan de cel kan een 'Protection circuit' worden toegevoegd (Xu et al., 2021). (Figuur 11)



Figuur 11 Opbouw 18650 Li-ion cel (Xu et al., 2021)

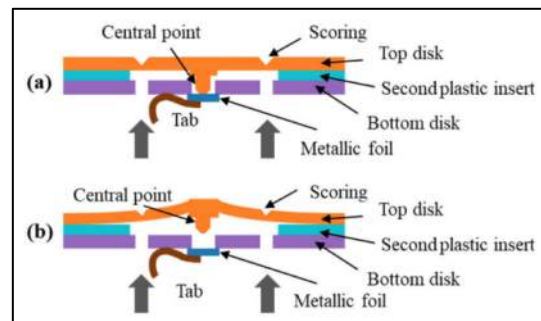
Figuur 12, laat een schematische dwarsdoorsnede zien van de bovenkant van een commerciële 18650 Li-ion cel waarop de verplichte en optionele beveiligingsapparaten zijn gevisualiseerd. '11 Bijlage B: Beveiligingsapparatuur gedemonteerde 18650 Li-ion batterij', laat deze onderdelen zien.



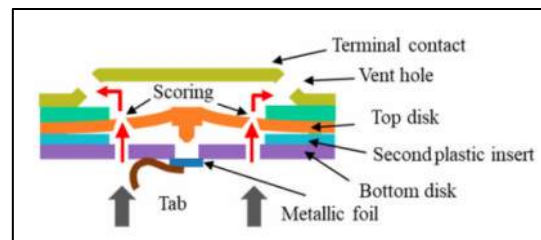
Figuur 12 Schematisch dwarsdoorsnede van de 'Cap' (Xu et al., 2021)

### 2.5.2.1 Verplichte beveiligingsapparaten:

- ▶ **Current interrupt device (CID)**  
De CID bestaat uit de componenten zoals weergegeven in Figuur 13. Deze onderdelen zijn met elkaar verbonden en faciliteren geleiding. Echter, wanneer er drukopbouw in de cel ontstaat door vrijgekomen gassen, zal de 'Top disk' omhoog worden geduwd. De verbinding tussen het 'Metallic foil' en het 'Central point' is zwak en zal daardoor worden verbroken. Hierdoor valt de geleiding weg en stopt de elektrochemische reactie.
- ▶ **Top vent**  
Bij hoge drukopbouw, die niet kan worden gestopt door alleen de CID, is de 'Top vent' een essentieel onderdeel om te voorkomen dat de cel explodeert. Figuur 14 illustreert de route die het gas kan volgen om de cel te verlaten, ook wel 'venting' (ontgassen) genoemd. Dit proces wordt mogelijk gemaakt doordat de 'Top disk' een zwak punt heeft in de vorm van een 'C', dat faalt bij hoge drukopbouw.



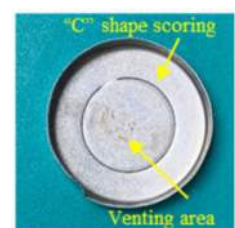
Figuur 13 CID voor- (a) en na (b) activatie  
(Xu et al., 2021)



Figuur 14 Route van het gas gedurende 'venting'  
(Xu et al., 2021).

### 2.5.2.2 Optionele beveiligingsapparaten:

- ▶ **Positive temperature coefficient (PTC)**  
Mogelijk bevat de 'Cap' een positive temperature coefficient (PTC) -ring. Deze ring bestaat uit meerdere lagen, waaronder twee metalen met daartussen een geleidend polymeer. Bij hogere temperaturen zet dit polymeer uit, waardoor de afstand tussen de metalen toeneemt en daarmee de weerstand exponentieel verhoogt. Hierdoor wordt de hoeveelheid stroom die door de batterij loopt naar een veiliger niveau verminderd.
- ▶ **Bottom vent**  
Omdat de 'Top vent' verstopt kan raken of niet afdoende is om de opgebouwde gassen vrij te laten, wordt soms een 'Bottom vent' toegevoegd aan de cel. Deze werkt op een vergelijkbare manier als de 'Top vent' met een 'C'-vormig zwak punt, zoals weergegeven in Figuur 15.
- ▶ **Protection circuit**  
Cellen die worden aangeduid als 'Protected cells' bevatten onderaan een 'Protection circuit board (PCB)' ook wel 'Protection circuit module (PCM)' (Figuur 11). Deze chip bewaakt onder andere het verschil in spanning tussen twee punten. Wanneer deze spanning te hoog of te laag is, schakelt de schakelaar in de chip om, waardoor de cel wordt beschermd tegen diepontladen of overladen. Op dezelfde manier kan de cel met een 'Protection circuit' ook worden beschermd tegen oververhitting.



Figuur 15 Bottom vent  
(Xu et al., 2021)

(Xu et al., 2021)

# 3 Onderzoeksstrategie

## 3.1 Doel

Doel van dit onderzoek is om binnen vijf maanden voor het bedrijf Acuro inzicht te krijgen in het verschil in risico tussen de drie, bij klanten van Acuro, meest voorkomende Li-ion cellen. Specifiek gericht op het verschil van de bijbehorende tijdslijn van de thermal runaway.

## 3.2 Onderbouwing

Om dit doel te bereiken is gekozen voor een vaste onderzoeksopzet, conform de stappen van de wetenschappelijke methode (Ryan & O'Callaghan, 2002). Dit garandeert een gestructureerde aanpak en draagt bij aan de validiteit en betrouwbaarheid van het onderzoek

De onderzoeksstrategie zal verder worden toegelicht aan de hand van de stappen van de wetenschappelijke methode.

### ► Observeren

De aanleiding voor dit onderzoek, zoals eerder beschreven in '1.1 Aanleiding', is het gevaar van Li-ion cellen zoals dat wordt belicht in de media, evenals de tegenstrijdige resultaten van het onderzoek, dat is uitgevoerd door Acuro met een ICR18650-batterij. Dit onderzoek toont aan dat overladen of blootstelling aan externe temperatuurverhogingen niet noodzakelijkerwijs leidt tot het ontstaan van een TR. (Stolte, 2023)

### ► Onderzoeksvraag

Deze observatie roept verschillende vragen op, zoals: waarom is het niet ontstaan? Wat is er precies gebeurd? Welke interne processen hebben hierbij een rol gespeeld? Wat gebeurt er bij blootstelling aan andere temperaturen of bij hogere laadsnelheden? Is deze situatie vergelijkbaar met andere soorten Li-ion cellen?

Concreet heeft dit geleid tot de volgende hoofdvraag: Wat is het verschil in risico tussen de drie, door klanten van Acuro, meest gebruikte Li-ion cellen, met betrekking tot de tijdslijn van de thermal runaway?

### ► Hypothese

Op basis van beschikbare literatuur en bestaande kennis wordt een specifieke verwachting voor het antwoord op deze vraag gevormd, wat resulteert in een hypothese. Zie '3.3 Hypothese'

### ► Experiment

De hypothese zal worden getoetst door middel van experimenteel onderzoek. Een experimentele opzet is bij uitstek geschikt voor het vaststellen van causale verbanden. In dit geval zal het onderzoek zich richten op de effecten van externe verhitting. Alleen de onafhankelijke variabele, namelijk de samenstelling van de kathode, zal worden gemanipuleerd. Hierdoor wordt de invloed van deze onafhankelijke variabele op de TR geïsoleerd en worden externe invloeden geminimaliseerd, wat de interne validiteit van de resultaten versterkt. Het nauwgezet volgen van vastgestelde procedures zal zorgen voor reproduceerbaarheid. Om dit verder te vergroten en de betrouwbaarheid te versterken, zullen de experimenten in triplo worden uitgevoerd.



De keuze om de cellen extern te verhitten is gebaseerd op het feit dat dit onderzoek zich richt op Li-ion cellen die opgeslagen liggen bij klanten van Acuro. Deze cellen ondergaan hier geen laad- of ontladprocessen, waardoor een elektrische oorzaak is uitgesloten. Een mechanische oorzaak is theoretisch mogelijk, bijvoorbeeld door penetratie en verbrijzeling van de cellen door heftrucks in de magazijnen of het laten vallen van een pellet met Li-ion cellen. Echter, dit is om persoonlijke veiligheidsredenen niet toegestaan om uit te voeren. Daarom blijft de thermische oorzaak van een TR over als mogelijke focus van het onderzoek.

Om de experimenten waarbij de cellen extern worden verhit voor te bereiden, zal eerst experimenteel worden onderzocht welke apparatuur het meest geschikt is voor dit doel. De beschikbare opties omvatten verschillende kookplaten of een gloeiplug. Tijdens eerdere experimenten met een ICR18650 trad geen TR op. Tijdens deze experimenten met een oven werd geen temperatuur boven de 200 °C bereikt (Stolte, 2023). Asecos (2023), laat zien dat de exotherme reactie pas plaatsvindt bij een temperatuur van 250 °C. Op basis hiervan is besloten dat onderzocht moet worden of de beschikbare apparatuur een temperatuur ruim boven de 250 °C kan bereiken. Daarbij moet worden onderzocht hoe constant deze maximale temperatuur is, om de betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van de experimenten te kunnen waarborgen.

Het extern verhitten zal worden uitgevoerd op twee manieren:

- Experiment 1: Thermische oorzaak, opwarmen in stappen
- Experiment 2: Thermische oorzaak, opwarmen bij hoge temperatuur

De keuze hiervoor is gebaseerd op de fasen waarin TR ontstaat, zoals beschreven in '2 Theoretisch kader'. Door de cel eerst geleidelijk op te warmen, kunnen verschillende temperaturen worden vergeleken om vast te stellen welke waarnemingen aan de cel overeenkomen met de beschreven fasen in de literatuur. Daarnaast wordt, door de cellen ook direct bij een hoge temperatuur op te warmen, getest of bepaalde 'beveiligingen' kunnen worden omzeild door de snelheid van het opwarmen.

#### ► Resultaten analyseren

De eerste stap na het uitvoeren van de experimenten is het grafisch weergeven van de verkregen data in de vorm van grafieken, om de gegevens te visualiseren. Vervolgens wordt een vergelijkende analyse uitgevoerd waarbij de resultaten van de drie verschillende soorten Li-ion cellen met elkaar worden vergeleken, met specifieke focus op de verschillen in de tijdslijn en het verschil in brandvermogen. De verkregen data zal tot slot onderworpen worden aan een statistische analyse om te bepalen of de waargenomen verschillen statistisch significant zijn.

#### ► Conclusie

Op basis van de resultaten zullen antwoorden worden geformuleerd, op zowel de hoofdvraag als deelvragen, en kan de hypothese worden gefalsificeerd of geverifieerd.

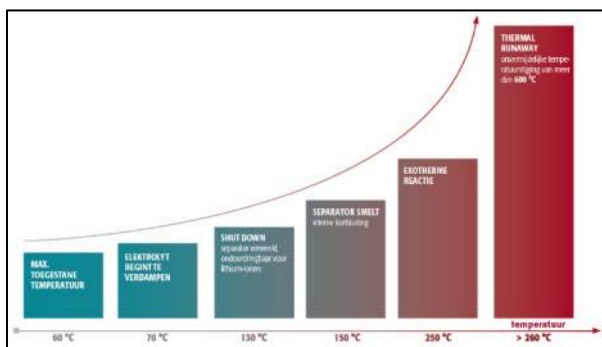
### 3.3 Hypothese

Asecos (2023) visualiseert de verschillende interne gebeurtenissen in relatie tot de temperatuur tijdens het ontstaan van een TR in een Li-ion cel (Grafiek 2). Zoals beschreven in '2.4 Thermal runaway', treedt de TR op wanneer de kathode en anode niet langer fysiek van elkaar gescheiden zijn door de separator. Dit leidt tot interne kortsluiting en initieert het exotherme chemische proces dat bekend staat als 'thermal runaway'.

Zoals afgebeeld in Grafiek 2, wordt er onderscheid gemaakt tussen het 'verweken' en 'smelten' van de separator, waarbij het verweken van de separator resulteert in een 'shutdown' van de cel. Dit treedt op bij een temperatuur van 130 °C (Asecos, 2023).

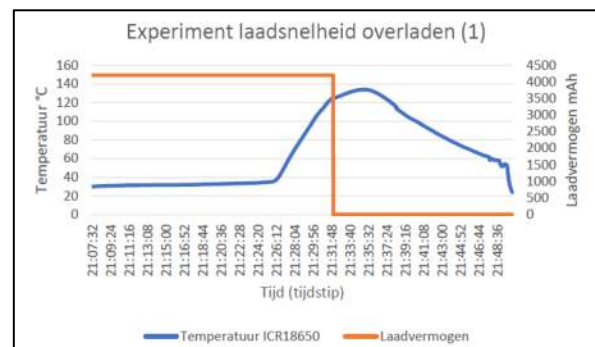
De resultaten van het voorgaande onderzoek uitgevoerd door Acuro met een ICR18650-batterij laat zien dat de stroomtoevoer (laadvermogen) rond een temperatuur van 130 °C wegvalt (Stolte, 2023) (Grafiek 3).

Een mogelijke verklaring voor het uitblijven van een TR zou kunnen zijn dat er een 'shutdown' optreedt, doordat de separator begint te verweken, nog voordat deze volledig smelt (Zoals beschreven in '2.5.1 Interne beveiligingen'). Hierdoor ontstaat geen interne kortsluiting en wordt de TR niet in gang gezet.



Grafiek 2 Interne gebeurtenissen tijdens het ontstaan van een thermal runaway

(Asecos, 2023) (Vergrote versie in '12 Bijlage C: Interne gebeurtenissen TR')



Grafiek 3 Resultaten experiment ICR18650

(Stolte, 2023)

Uit de resultaten van het rapport van Doughty & Pesaran (2012) wordt door Feng et al. (2017) het volgende geconcludeerd: "The order of the thermal stability should be LFP > LMO > NCM111 > NCA > LCO, with the LFP as the most stable cathode material during TR process."

Op basis van de gevisualiseerde interne gebeurtenissen in relatie tot de temperatuur van een cel, zoals beschreven door Asecos (2023), en de beweerde volgorde van thermische stabiliteit door Doughty & Pesaran (2012), is de verwachting dat het verschil in risico tussen de drie meest gebruikte Li-ion cellen, zoals gebruikt door klanten van Acuro, sterk afhankelijk is van de verschillende initiële fasen van een TR. Hierbij wordt het volgende risico verwacht (van laag naar hoog risico): LFP > NMC > LCO.

## 4 Materiaal & methode

De methode illustreert de genomen stappen om de beoogde resultaten te behalen, inclusief de gebruikte materialen. Het onderzoek werd uitgevoerd volgens een experimentele opzet, gebruikmakend van de beschikbare tijdspanne van twee werkdagen in het laboratorium voor brandveiligheid van Peutz. Gezien deze beperkte tijd, zijn voorbereidende stappen getroffen.

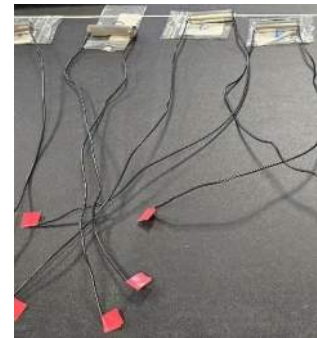
### 4.1 Voorbereidingen

#### 4.1.1 Voorbereidend experiment: Elektrische oorzaak, kortsluiting

Voor de voorbereidende experimenten werden de vier nog beschikbare BSE ICR18650 3.7 V 2600mAh (123accu.nl, gekocht in kwartaal 2 van 2023) voorbereid. Deze waren al ontdaan van het plastic omhulsel.

Met de kniptang werden 8 stukken installatiedraad VD. H07V-U Eca 1,5 mm<sup>2</sup> zwart (XBK-kabel Xaver Bechtold QmbH Unterdorf 101 D-78628 Rottwell Germany ) van 0,5 meter afgeknipt. Aan beide uiteinden van elke kabel werd 1 cm isolatiemateriaal gestript met de striptang. Eén kant van het installatiedraad werd afgedekt met isolatietape (GS quality products WORKLINE).

Vervolgens werden de plus- en minpolen van elke cel licht opgeschuurd met schuurpapier (korrel 240). Een dun laagje soldeervloeistof Flux Décapant (GRIFFON S-39 Universal) werd aangebracht op zowel de plus- als de minpool. Daarna werden aan zowel de plus- als de minpool van elke cel installatiedraad gesoldeerd, met de soldeerbout (VELLEMAN VTSSC50N) en soldeertin (TIN-TUBE 17GR 1,00mm)(Figuur 16)



Figuur 16 BSE ICR18650 met isolatiedraad  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 16 november 2023)

Met een kruiskopschroevendraaier werd de snoerschakelaar (ZJXXDZ 6A250V) geopend. Vervolgens werden er met de kniptang, 2 stukken installatiedraad van 1,5 meter afgeknipt, waarbij aan beide uiteinden 1 cm isolatiemateriaal werd gestript. Deze werden aan de snoerschakelaar bevestigd en daarna werd de schakelaar weer dichtgeschroefd.

Aan de uiteindes van het installatiedraad werden verbindingklemmen bevestigd.

De knop van de multimeter (Hapé MI-6 KM7) werd naar 2000 k $\Omega$  gedraaid en de meetpennen werden in de verbindingklemmen geklemd. Als de multimeter '1' aangaf, stond de schakelaar 'uit'. Een weergave van 0.00 op de multimeter betekende dat de snoerschakelaar 'aan' stond. Deze stand van 'aan' werd genoteerd op de snoerschakelaar met een permanente marker. (Figuur 17 en 18)



Figuur 17 Schakelaar 'uit'  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 13 november 2023)



Figuur 18 Schakelaar 'aan'  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 13 november 2023)



In de cellen werd op 16 november 2023 kortsluiting veroorzaakt, bij een gemiddelde buiten temperatuur van 6.8 °C (Weerstatistieken KNMI, z.d.). Daarnaast was hier altijd een brandweerman bij aanwezig voor het waarborgen van de veiligheid en werd door alle aanwezigen een veiligheidsbril gedragen.

De snoerschakelaar werd 'uit' gezet. Vervolgens werd aan één kant van de ICR18650, met installatiedraad, het isolatietape verwijderd en werd deze bevestigd in een van de verbindingsklemmen die aan de snoerschakelaar waren aangesloten. Deze handeling werd herhaald voor de andere zijde van de cel.

Met behulp van aluminium tape (TETRA TOOLS 50 mm, temperatuurbestendigheid van -40 °C tot +140 °C) werd de thermokoppel (iGrill Mini) bevestigd aan de cel (Figuur 19).

De cel werd geplaatst in de 'veiligheidsbak', zie Figuur 20. De GoPro werd ingeschakeld en op de cel gericht. Met het indrukken van de snoerschakelaar werd het experiment gestart.

Op een veilige afstand werd gewacht tot er iets visueel werd waargenomen en via de gekoppelde app (Weber iGrill) werd de oppervlakte temperatuur van de cel in de gaten gehouden.

Wanneer de temperatuur van de cel terug begon te lopen en de cel een temperatuur onder de 25 °C had bereikt, werd deze losgekoppeld en verwijderd.

Omdat het ruim 3 minuten duurde voordat de cel opgewarmd was van 12 °C naar 40 °C en de gemeten spanning gelijk was aan 0,00 V, werd de keuze gemaakt om het installatiedraad aan de cel in te korten en deze direct te verbinden door middel van een verbindingsklem (WAGO 0.2-2.5 mm<sup>2</sup>) (Figuur 19)

#### 4.1.2 Cellen voorbereiden

Bij Peutz werden twee verschillende experimenten in triplo uitgevoerd met drie verschillende soorten Li-ion cellen. Dit vereiste dus minimaal zes exemplaren van elk type. Voor extra zekerheid werden er tien exemplaren van de volgende drie cellen besteld en voorbereid:

- ▶ BSE ICR18650 3.7 V 2600mAh (123accu.nl) (Figuur 21, blauw)
- ▶ Samsung INR18650-35E 3.7 V 3450mAh (123accu.nl) (Figuur 22, Roze)
- ▶ BSE IFR18650 3.2 V 1500 mAh (EtronixCenter.com) (Figuur 23, Grijs)



Figuur 21 BSE ICR18650  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 17 november 2023)



Figuur 22 Samsung INR18650-35E  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 17 november 2023)



Figuur 23 BSE IFR18650  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 17 november 2023)



Figuur 19 Cel met thermokoppel en ingekort installatiedraad  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 16 november 2023)



Figuur 20 Plaatsing van de cel in de 'veiligheidsbak'  
(N. Stolte, persoonlijke communicatie, 16 november 2023)

De cellen werden te allen tijde bewaard bij kamertemperatuur (21 °C), behalve tijdens het eenmalige vervoer van en naar kantoor (Acuro Utrecht) en richting Peutz (Haps).

Het plastic omhulsel werd verwijderd van de cellen door een kleine snede te maken met een schaar bij de pluspool van de cel. Deze aanpak werd gekozen omdat het omhulsel smelt bij extern verhitten. Dit kan leiden tot de vorming van een beschermende laag rondom de cel, wat de warmteoverdracht naar de cel zou beïnvloeden (Tang et al., 2020).



Figuur 24 Nummering cellen

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 17 november 2023)

Elke categorie werd genummerd van 1 tot en met 10 met een permanente marker, zoals te zien is in Figuur 24. Bovendien werd de extra informatie die op het metaal van de cel aanwezig was, genoteerd.

Daarna werd de knop van de multimeter (DT 5808 DIGITALmultimeter) naar de 20 V gedraaid en ingeschakeld. Door de rode meetpen tegen de positieve pool te houden en de zwarte meetpen tegen de negatieve pool, werd van elke cel de meting afgelezen en genoteerd.

Hierna zijn van de vernikkelde batterijsoldeerstrip van 2 meter (doorsnede 0.15 mm x 0.6 mm) 60 stukjes van 15 mm geknipt met behulp van de kniptang.

Voor het op zijn plaats houden van de cellen, tijdens het solderen, werden in een houten balk, met een 20 mm speedboor, drie gaten geboord. Deze balk werd vervolgens vastgeklemd in een werkbank. Deze keuze is gemaakt omdat dit minder kans geeft op beschadigingen aan de cel, dan wanneer deze in een bankschroef wordt geklemd.

Ter bevordering van de veiligheid werd vóór het solderen een emmer met water naast de werkplek geplaatst en werd een veiligheidsbril gedragen.

De punt van de soldeerbout werd vervangen door een bredere punt (VELLEMAN BITC50N3 soldeerpunt 3 mm), zodat het soldeertin over een groter oppervlak kon worden verwarmd en de cel zo kort mogelijk werd blootgesteld aan warmte. De soldeerbout werd aangezet en ingesteld op een temperatuur van 450 °C.



Figuur 25 soldeerstrip vast solderen

(M. Vermeij, persoonlijke communicatie, 19 november 2023)

Steeds werden er drie cellen geplaatst in de gemaakte houder. Voordat ze werden geplaatst, werd de minpool opgeschuurd met schuurpapier. Daarna werd een dun laagje soldeervloeistof aangebracht op de minpool en op de zijkant van de soldeerstrip met behulp van het bijbehorende kwastje. Vervolgens werd op beide oppervlakken met de soldeerbout een druppel soldeertin aangebracht.

Met een mini-combinatietang werd de soldeerstrip boven de cel vastgehouden, zodat de druppels soldeertin boven elkaar kwamen te zitten. Vervolgens werd de soldeerbout op de soldeerstrip geplaatst. Zodra deze beweeg en het soldeertin dus smolt, werd de soldeerbout verwijderd en werd de soldeerstrip op zijn plaats gehouden totdat deze stevig vastzat. (Figuur 25)

Voor het vast solderen van de soldeerstrip aan de pluspool zijn dezelfde stappen herhaald. Om de cel met de soldeerstrip aan de minpool in de houders te kunnen plaatsen, is de soldeerstrip naar binnen gevouwen. Om kortsluiting tussen de min- en pluspool van de batterij te voorkomen (zie Figuur 26), is de soldeerstrip voor de helft geïsoleerd met isolatietape (zie Figuur 25). Na het solderen is de spanning van alle cellen nogmaals opgemeten en genoteerd.

Om ze te beschermen en om kortsluiting te voorkomen, werden de cellen verpakt in karton, zoals te zien is in Figuur 27. Op deze manier waren ze klaar om vervoerd te worden naar Peutz.

#### 4.1.3 Geschikte apparatuur testen

Er werd onderzocht welke apparatuur het meest geschikt zou zijn voor het extern verhitten van de cellen. Vanwege tijdgebrek zijn deze tests uitgevoerd door een medewerker van het bedrijf Peutz, voorafgaande aan de twee testdagen.

Het eerste experiment omvatte het testen van de temperatuur van een gloeiplug. Deze kon worden ingesteld op een spanning variërend van 1,0 V tot 6,0 V. Een thermokoppel werd tegen de punt van de gloeiplug gehouden. De gloeiplug werd ingesteld op 1,0 V en wanneer de thermokoppel een constante temperatuur aangaf, werd deze genoteerd. Vervolgens werd de gloeiplug ingesteld op 2,0 V en werd ook hiervan de bijbehorende temperatuur genoteerd. Deze stappen zijn herhaald tot en met 6,0 V.

Ten tweede werd de maximale temperatuur en stabiliteit van de kookplaat (DOMO DO311KP) getest door Peutz. Hiervoor werden, zoals te zien is op Figuur 28, op twee plekken (midden en zijkant) een thermokoppel geplaatst. Vervolgens werd de kookplaat ingesteld op 'Max' en aangezet. Met een datalogger werd de gemeten temperatuur van het thermokoppel bijgehouden gedurende de tijd.

## 4.2 Peutz

In het laboratorium voor brandveiligheid van Peutz droegen alle aanwezigen te allen tijde veiligheidsschoenen, een veiligheidsbril en handschoenen. Bovendien was gedurende de testen altijd een veiligheidsman van Peutz aanwezig.

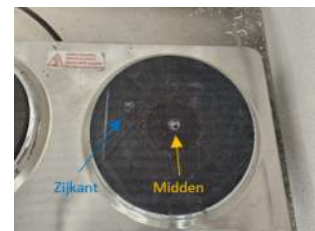
De testopstelling werd voorbereid in een, door aanwezige afzuiging, voldoende geventileerde ruimte. Zoals te zien is op Figuur 29, bestond de opstelling uit de kookplaat (DOMO DO311KP), omringd door cellen beton blokken en aan de voorkant afgeschermd met een ijzeren gaasplaat. Aan de bovenkant werd dit gedurende de experimenten afgedekt met een gipsplaat. Op een halve meter afstand werd op een statief een GoPro (6 3023 en 7 3136, Peutz) geplaatst. Ongeveer drie meter verder stond een bureau, waar de aanwezigen tijdens de test achter moesten blijven staan.



Figuur 26 Kortsluiting tussen de plus- en minpool  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 19 november 2023)



Figuur 27 Cellen verpakt en gereed om te vervoeren  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)



Figuur 28 Plaatsing thermokoppels  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)



Figuur 29 Testopstelling  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023).

Hier bevond zich ook de datalogger (GRAPHTEC midi LOGGER GL220, Peutz ID 2422), die met verlengkabels was aangesloten op de thermokoppel (Draadthermokoppel 6m, Peutz ID 3265), dat met behulp van een statief op zijn plek werd gehouden op de kookplaat. '13 Bijlage D: Testopstelling' toont extra foto's en in '14 Bijlage E: Kalibratie rapporten' zijn de kalibratie rapporten van de gebruikte apparatuur terug te vinden.

#### 4.2.1 Experiment 1: Thermische oorzaak, Opwarmen in stappen

De tweede thermokoppel werd met aluminium tape midden op de cel bevestigd. Krokodillenklemmen waren aangesloten op de meetpennen van de multimeter. De rode klem werd aan de soldeerstrip van de positieve pool bevestigd, terwijl de zwarte klem aan de soldeerstrip van de negatieve pool werd bevestigd. Vervolgens werd de multimeter aangezet en ingesteld op 20 V, werd gecheckt of er een spanning werd gemeten en vervolgens werd de cel geplaatst binnen de rode cirkel, zoals weergegeven in Figuur 30



Figuur 30 Plaatsing van de cel en thermokoppel 1 binnen deze rode cirkel  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 24 november 2023)

Na het instellen van de kookplaat op 'Max' werd de opstelling afgesloten met de gipsplaat en werd de GoPro ingeschakeld. Ten slotte werd de stekker van de kookplaat in het stopcontact gestoken, waarmee het experiment begon.

De veiligheidsman trok voor de veiligheid de stekker uit het stopcontact bij het horen van een knal of het waarnemen van vonken of ontgassing. Daarna werd de ruimte tien minuten verlaten om te voorkomen dat vrijgekomen gassen werden ingeademd.

Na deze periode werd de gipsplaat verwijderd en werd de situatie gefotografeerd. Voor de zekerheid werd de cel met een tang overgeplaatst in een dompelbad.

De bovengenoemde stappen werden in triplo herhaald voor elke soort. Het experiment werd telkens pas hervat wanneer de kookplaat was afgekoeld tot een temperatuur onder de 30 °C.

#### 4.2.2 Experiment 2: Thermische oorzaak, opwarmen bij hoge temperatuur

De kookplaat werd opnieuw ingesteld op 'Max', waarna de stekker in het stopcontact werd gestoken. Op de datalogger werd in de gaten gehouden wanneer de kookplaat zijn piektemperatuur had bereikt en de temperatuur begon te stabiliseren.

Ondertussen werd de tweede thermokoppel met aluminium tape midden op de cel bevestigd en werden de krokodillen klemmen op dezelfde wijze als bij experiment 1 gekoppeld aan de soldeerstrip van de cel. Vervolgens werd de multimeter aangezet en ingesteld op 20 V en werd er gecheckt of er een spanning werd gemeten.

Op het moment dat de temperatuur van de kookplaat was gestabiliseerd, werd gewacht tot deze licht begon toe te nemen, waarna de cel binnen de rode ring (Figuur 30) op de kookplaat werd geplaatst. Hierna werd de opstelling weer direct afgesloten met de gipsplaat en namen de aanwezigen zo snel mogelijk plaats achter het bureau.

De veiligheidsman trok voor de veiligheid de stekker uit het stopcontact bij het horen van een knal of het waarnemen van vonken of ontgassing. Daarna werd de ruimte tien minuten verlaten om te voorkomen dat vrijgekomen gassen werden ingeademd.



Na deze periode werd de gipsplaat verwijderd en werd de situatie gefotografeerd. Voor de zekerheid werd de cel met een tang overgeplaatst in een dompelbad.

De bovengenoemde stappen werden in triplo herhaald voor elke soort. Voor de exacte volgorde waarin de testen zijn uitgevoerd zie '15 Bijlage F: Volgorde van testen bij Peutz'.

### 4.3 Resultaten verwerken

De data van de thermokoppels werd ingeladen in Microsoft Excel 365. Met behulp van het commando 'CTRL + H', 'zoeken en vervangen' werd op ieder blad gezocht naar '.' en vervangen door ','. De gegevens waren nu gereed om te verwerken in grafieken.

Vervolgens werd deze data vergeleken met de GoPro-beelden om het begin van het experiment te bepalen (tijd 00:00). Voor 'Experiment 1: opwarmen in stappen' kwam dit overeen met het moment waarop het lampje van de kookplaat begon te branden. Voor 'Experiment 2: opwarmen bij een hoge temperatuur' was dit gelijk aan het moment waarop de cel op de kookplaat werd geplaatst.

=AB2+(AA3-AA2)		
AA	AB	A
Tijd Go Pro	Verstreken tijd (hh:mm:ss)	Waarneming
00:05:36	00:00:00	Start experiment
00:07:18	00:01:42	Thermokoppel laat los
00:09:02	00:03:26	Soldeerstrip laat los
00:09:02	00:03:26	Uitgassen start
00:09:23	00:03:47	knal, vonken
00:09:27	00:03:51	Uitgedoofd

Figuur 31 Berekenen verstreken tijd  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 21 december)

Door dit vast te stellen kon voor elke waarneming de tijd van de GoPro worden ingevoerd, om zo de verstreken tijd vanaf het begin van het experiment te laten berekenen (Figuur 31).

Op het moment dat in de data werd teruggezien dat de temperatuur van de kookplaat begon op te lopen, werd dit moment gelijkgesteld aan 00:00 voor 'Experiment 1'. Voor 'Experiment 2' daarentegen werd gekeken naar het moment waarop de temperatuur van de cel begon op te lopen om 00:00 te bepalen.

Nadat 00:00 was vastgesteld, werd ook de gemeten spanning toegevoegd door elke 10 seconden de waarde op de multimeter van de GoPro-beelden af te lezen.

De waarnemingen, zoals te zien in '16 Bijlage G: Resultaten per cel', werden geïntegreerd in de gemaakte grafieken met behulp van het programma Bluebeam (versie 2021).

Aan het tijdstip waarop een zintuiglijke waarneming, zoals horen of zien, werd vastgelegd op de GoPro-beelden, werd de term 'eerste waarneming' toegekend. Het eerste tijdstip waarop de spanning significant lager is dan 10 seconden ervoor, werd gedefinieerd als 'spanning valt weg'.

Van de berekende gemiddelden is de standaarddeviatie tot slot berekend met behulp van Formule 1. Ter bepaling van  $t_{\alpha/2}$  werd gebruik gemaakt van de tabel in '17 Bijlage H: Bepaling  $t_{\alpha/2}$ ' (rij n-1, kolom  $t_{0,5}$ )

$$\mu_x = \bar{x} \pm t_{\alpha/2} \times \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

# 5 Resultaten

Dit hoofdstuk presenteert de behaalde resultaten, die zijn onderverdeeld in twee secties: de bevindingen verkregen tijdens de voorbereidende stappen en de resultaten van de uitgevoerde experimenten in het brandveiligheidslaboratorium van Peutz.

## 5.1 Voorbereidingen

### 5.1.1 Voorbereidend experiment: Elektrische oorzaak, Kortsluiting

In vier BSE ICR18650 (3.7 V 2600mAh) cellen werd kortsluiting veroorzaakt. Tijdens deze experimenten werd een maximale temperatuur van 87 °C gemeten. Er werden geen andere waarnemingen gedaan aan de cellen, behalve het horen van een knal bij cel 4.

'18 Bijlage I: Resultaten voorbereidende experimenten', geeft de gemeten spanning weer voorafgaand aan de experimenten, inclusief foto's van de pluspool na uitvoering van de experimenten. Ook nadat de cellen aan het afkoelen waren werd de spanning van de cellen opgemeten. Op dat moment werd er nauwelijks tot géén spanning meer gemeten in de cellen.

### 5.1.2 Cellen voorbereiden

Ter voorbereiding aan de twee test dagen bij Peutz, waren tien exemplaren gereedgemaakt zoals beschreven in '4 Materiaal & methode', onder het kopje '4.1.2 Cellen voorbereiden'. De spanning van deze cellen werd gemeten na ontvangst en na het solderen. Tevens werden overige gegevens van de cel genoteerd. Dit is allen opgenomen in '19 Bijlage J: Waarnemingen cellen voorbereiden'.

### 5.1.3 Geschikte apparatuur testen

Er werd onderzocht welke apparatuur het meest geschikt zou zijn voor het extern verhitten van de cellen.

Per in te stellen spanning van de gloeiplug werd de volgende temperatuur gemeten zoals weergegeven in Tabel 3. Hierin is af te lezen dat de gloeiplug een maximale temperatuur kan bereiken van 604 °C.

Een gloeiplug ziet er uit zoals te zien is op Figuur 32. Nadeel van een gloeiplug is dat deze maar een klein oppervlakte van de cel verhit. Dit is niet te vergelijken met het scenario waarin de cel extern wordt verhit bij een brand.

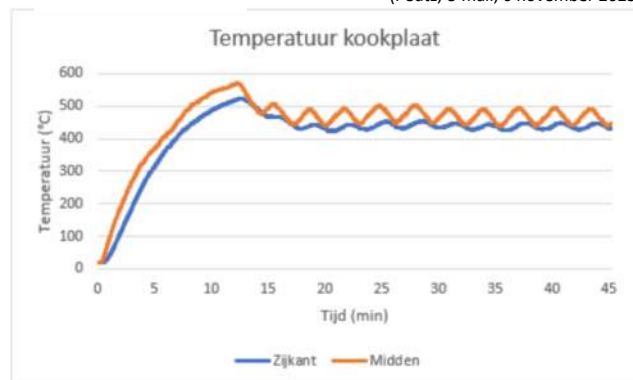
De temperatuur van de geplaatste thermokoppels op het 'midden' en op de 'zijkant' van de kookplaat (DOMO DO311KP) wordt weergegeven in Grafiek 4. Af te lezen is dat de kookplaat eerst een piektemperatuur bereikt, waarna deze stabiliseert. Op de 'zijkant' is deze temperatuur stabielere dan op het 'midden'. De temperatuur op de 'zijkant' van de kookplaat schommelt rond een temperatuur rond de 430 °C.

Spanning (V)	Stroomsterkte (A)	Temperatuur gloeiplug (°C)
1,0	1,03	47
1,2	1,26	64
1,4	1,48	79
1,6	1,69	96
1,8	1,89	114
2,0	2,10	135
2,2	2,27	153
2,4	2,46	175
2,6	2,64	198
2,8	2,81	221
3,0	2,98	242
3,2	3,16	267
3,4	3,33	291
3,6	3,44	315
3,8	3,60	341
4,0	3,75	370
5,0	4,56	491
6,0	5,25	604



Figuur 32 Voorbeeld gloeiplug (Autodoc, z.d.)

Tabel 3 Gemeten temperatuur van de gloeiplug bij verschillende spanning instellingen. (Peutz, e-mail, 6 november 2023)

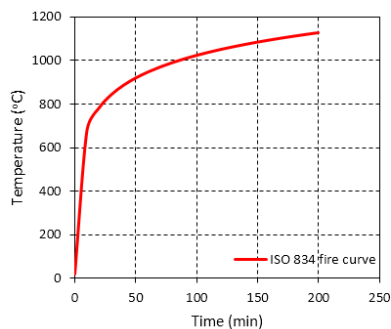


Grafiek 4 Temperatuur kookplaat (Peutz, e-mail, 14 november 2023)

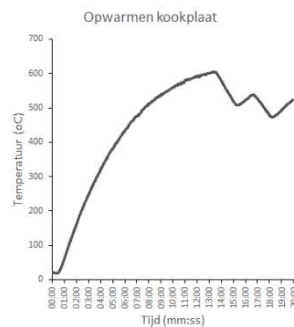
De ISO 834- 11(2014) definieert genormaliseerde brandprotocollen, inclusief de duur en temperatuurveranderingen over een gestandaardiseerde brandcurve. Deze aangeduide 'standaard brandkromme' (Grafiek 5) vormt de basis in deze internationale norm voor het beschrijven van specifieke methoden en richtlijnen om de brandweerstand van diverse bouwelementen te bepalen.

Gebaseerd op deze ISO 834 standaard brandkromme kan worden gezegd dat een gemiddelde brand in 10 minuten een temperatuur heeft bereikt van 600 °C. Zoals weergegeven in Grafiek 6, bereikt de kookplaat deze temperatuur na 13 minuten.

Op grond van deze gegevens is geconcludeerd dat deze opwarmingsmethode het meest realistisch is in vergelijking met het scenario waarbij een cel wordt blootgesteld aan brand.



Grafiek 5 Standaard brandkromme  
(Normcommissie Brandveiligheidsaspecten  
bouwproducten en bouwdelen, 2014)



Grafiek 6 Opwarmen kookplaat  
(T. Hogeterp, persoonlijke  
communicatie, 23 november, 2023)

## 5.2 Peutz

In '16 Bijlage G: Resultaten per cel' worden de resultaten van twee afzonderlijke experimenten gepresenteerd, genaamd 'Experiment 1: Thermische oorzaak, Opwarmen in stappen' en 'Experiment 2: Thermische oorzaak, Opwarmen bij hoge temperatuur'. De bijlage omvat grafieken die de spanning- en temperatuurmetingen per cel illustreren. Deze grafieken tonen de veranderingen in spanning en temperatuur van zowel de kookplaat als de cel in relatie tot de tijd. Bovendien verschaffen ze inzicht in de tijdstippen waarop specifieke waarnemingen zijn vastgesteld.

In de gedocumenteerde waarnemingen van de experimenten is een opmerkelijk patroon naar voren gekomen. Het blijkt dat de cel tweemaal ontgast, en in het geval dat er ontbranding plaatsvindt, dit pas gebeurt na de tweede ontgassing.

Bij twee cellen werd opgemerkt dat tijdens de ontbranding een deel van de cel uit de testopstelling werd gelanceerd. Zoals geïllustreerd in Figuur 33 en 34, vertoonde de cel tijdens de ontbranding ongecontroleerde bewegingen. Deze observatie suggereert dat de ontbranding van de cel gepaard gaat met aanzienlijke druk.



Figuur 33 Ongecontroleerde bewegingen ICR 1  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)



Figuur 34 Gedeelte cel uit testopstelling gelanceerd INR 1  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)

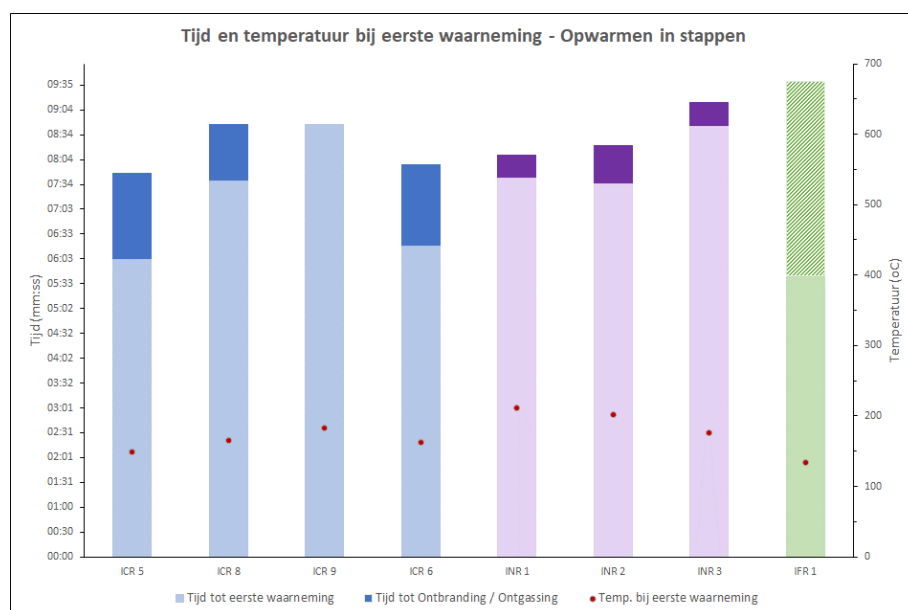
## 5.2.1 Tijdslijn

De grafieken in '21 Bijlage L: Temperatuursverloop ICR, INR en IFR' illustreren het temperatuursverloop per subcategorieën Li-ion cellen.

Grafiek 7 en 8, illustreren de tijdsduur tot ontbranding, of in het geval van de IFR, de tijd tot het volledig ontgassen per cel. Voor experiment 1, waarbij opwarmen in stappen plaatsvond, bedraagt de gemiddelde tijd 08:33 (mm:ss) (90% betrouwbaarheidsinterval (BI)[08:03; 09:04]). Tijdens experiment 2, waarbij opwarmen bij hoge temperatuur werd toegepast, bedraagt de gemiddelde tijd tot ontbranding 04:00 (90% BI [03:13; 04:46]).

De grafieken tonen tevens het tijdstip waarop de eerste zintuiglijke waarneming (in dit geval horen of zien) plaatsvond. Dit moment markeert het eerste punt waarop, zonder de aanwezigheid van geautomatiseerde detectie, mensen kunnen vaststellen dat er een probleem is met de cel. Voor experiment 1, waarbij opwarmen in stappen plaatsvond, bedraagt de gemiddelde tijd 07:19 (90% BI [06:32; 08:06]). Tijdens experiment 2, waarbij opwarmen bij hoge temperatuur werd toegepast, bedraagt de gemiddelde tijd tot ontbranding 03:40 (90% BI [03:05; 04:15]).

De betreffende grafieken zijn voorzien van een secundaire as waarop de temperatuur van de cel wordt weergegeven op het moment van de eerste waarneming. In experiment 1, waarbij opwarmen in stappen plaatsvond, bedraagt de gemiddelde temperatuur op dat moment 172,9 °C (90% BI [155,5 °C; 190,2 °C]). Tijdens experiment 2, waarbij opwarmen bij hoge temperatuur werd toegepast, bedroeg de gemiddelde temperatuur op hetzelfde tijdstip 186,7 °C (90% BI [169,6 °C; 203,9 °C]).



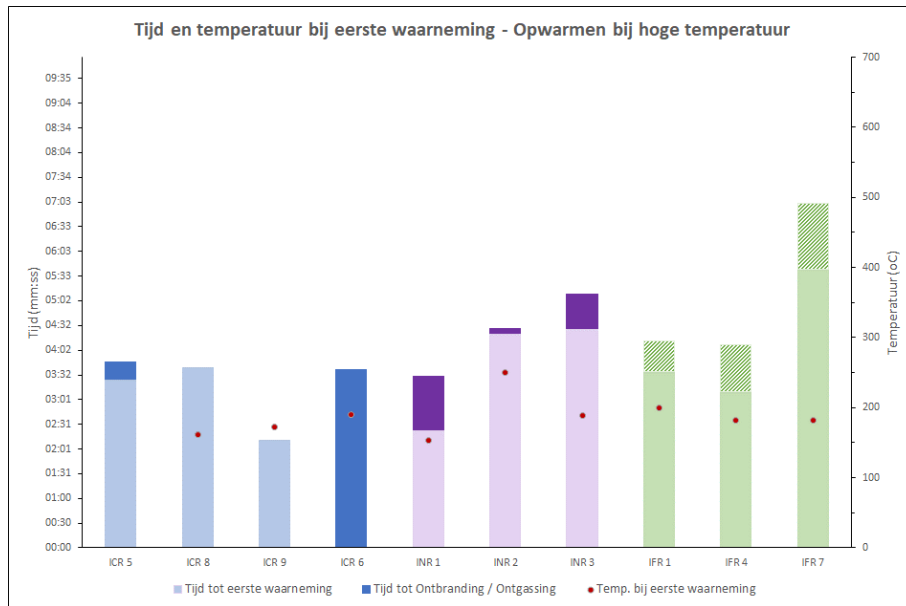
Grafiek 7 Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen in stappen

Lichte kleur = tijd tot eerste waarneming, Donkere kleur = tijd tot ontbranding / ontgassing, Rode stip = Temp. bij eerste waarneming.

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 8 december 2023)

(Grote versie in '22 Bijlage M: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen in stappen')





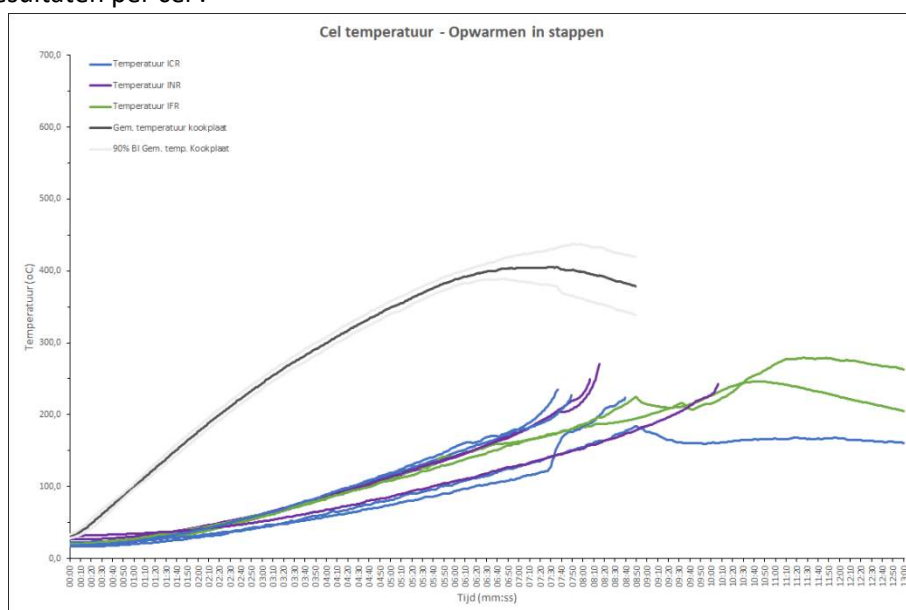
Grafiek 8 Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen bij hoge temperatuur  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 8 december 2023)

(Grote versie in '23 Bijlage N: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming– Opwarmen bij hoge temperatuur')

Deze resultaten tonen aan dat, ongeacht de snelheid waarmee een cel extern wordt verhit, de temperatuur op het moment dat de eerste zintuiglijke waarneming plaatsvindt relatief dicht bij elkaar ligt dan wanneer de tijd waarop dit plaatsvind met elkaar wordt vergeleken.

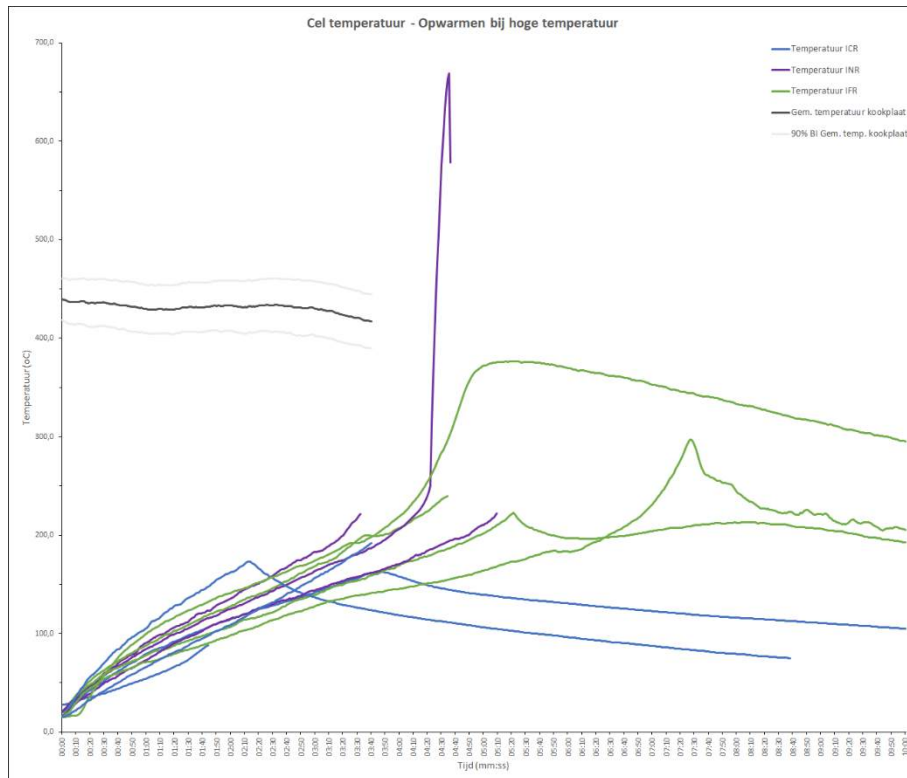
### 5.2.2 Verschillen tussen de cellen

Bij het vergelijken van de tijdslijnen van de ICR, INR en de IFR kan geen consistente conclusie worden getrokken dat één van deze systematisch altijd eerder ontbrandt dan de ander. In de Grafiek 9 en 10 zijn de temperaturen van verschillende celtypen en de gemiddelde kookplaattemperatuur (inclusief BI) tegen de tijd uitgezet. Het is echter belangrijk op te merken dat de piektemperatuur van de cel niet altijd overeenkomt met het moment van ontbranding. In enkele gevallen is dit het moment waarop de thermokoppel al vroegtijdig van de cel is los gekomen (zie opmerkingen per cel in '16 Bijlage G: Resultaten per cel'.



Grafiek 9 Cel temperatuur – Opwarmen in stappen

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 04 januari 2024) (Grote versie in '24 Bijlage O: Cel temperatuur – Opwarmen in stappen')



Grafiek 10 Cel temperatuur – Opwarmen bij hoge temperatuur

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 04 januari 2024) (Grote versie in '25 Bijlage P: Cel temperatuur – Opwarmen bij hoge temperatuur')

In grafiek 9 en 10 is te zien dat de temperaturen van de verschillende cellen parallel aan elkaar stijgen. Opvallend is dat de ICR gemiddeld als eerste zijn piektemperatuur bereikt, terwijl de IFR er gemiddeld het langst over doet om deze piektemperatuur te bereiken.

Tijdens de ontbranding werden opvallende visuele verschillen waargenomen tussen de drie geteste celtypen. Een opmerkelijk kenmerk is dat bij de IFR geen vonken of vlammen optreden. In plaats daarvan vindt er alleen ontgassing plaats. In vergelijking met de andere twee geteste cellen komt er ook aanzienlijk meer gas vrij. Bij de ICR zijn talrijke vonken zichtbaar. Wat betreft de INR, naast het harder knallen, wordt er ook een aanzienlijke hoeveelheid gas vrijgegeven voordat deze cel ontbrandt.

Ter visualisatie tonen Figuur 35, 36 en 37 snapshots van de GoPro-beelden op het moment van ontbranding/uitgassing. Indien nodig kunnen de GoPro-beelden worden opgevraagd bij de auteur van dit document.



Figuur 35 Moment van ontbranding

ICR 2

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 24 november 2023)



Figuur 36 Moment van ontbranding

INR 3

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 24 november 2023)



Figuur 37 Moment van uitgassen IFR 3

(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)

Na de ontbranding waren de verschillen ook zichtbaar (Figuur 38, 39 en 40). De ICR vertoonde al meer schade dan de IFR, die veelal nog op dezelfde plek lag als voorafgaand aan het experiment. De INR toonde de meeste schade. Meer voorbeelden zijn te vinden in '16 Bijlage G: Resultaten per cel'.



Figuur 38 ICR 1 na ontbranding  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)



Figuur 39 INR 6 na ontbranding  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)



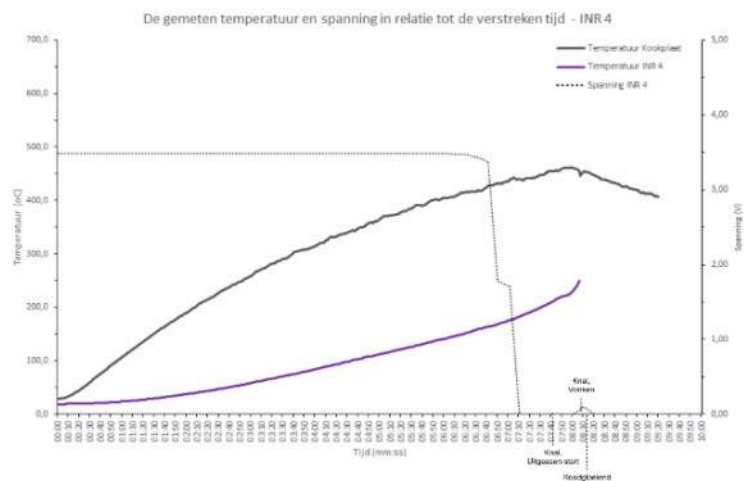
Figuur 40 IFR 3 na ontbranding  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 20 november 2023)

### 5.2.3 Spanning

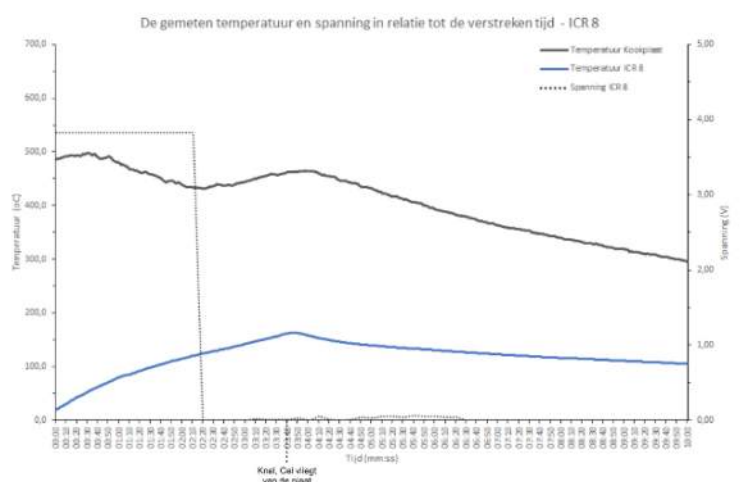
Tijdens de eerste acht experimenten werd de spanning van de cellen gemeten. Vanwege het doorbranden van de kabel van de multimeter tijdens het achtste experiment, kon dit daarna niet meer worden gedaan.

Er werd waargenomen dat de spanning wegviel voordat er enige observatie aan de cel kon worden vastgesteld. Dit is terug te zien in Grafiek 11 en 12.

Wat opviel tijdens het experiment met de ICR 8, was dat de cel bij de eerste knal van de kookplaat weg schoot. Hier ging het verlies van spanning aan vooraf en zodra de externe verhitting van de cel stopte, begon ook de temperatuur van de cel af te nemen.



Grafiek 11 De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd – INR 4  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 01 december 2023)  
(Grote versie in '16 Bijlage G: Resultaten per cel')

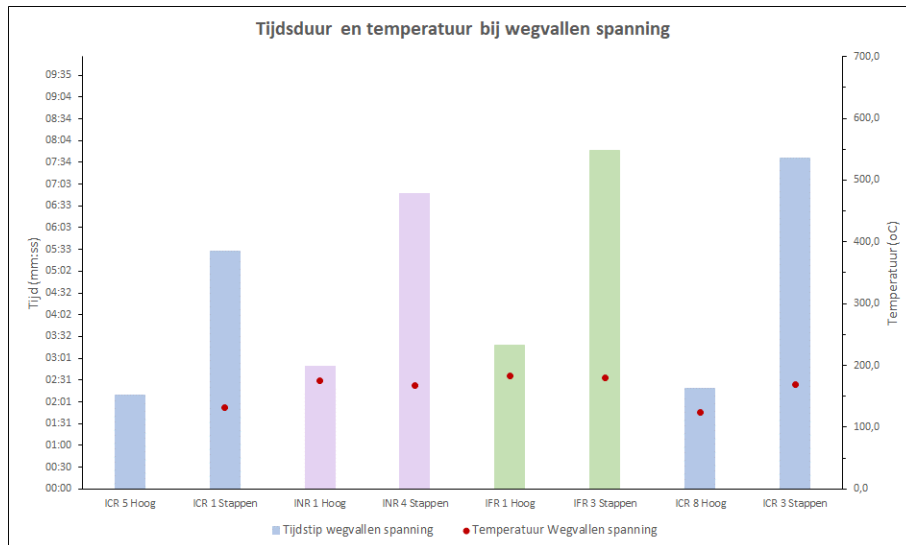


Grafiek 12 De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd – ICR 8  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 01 december 2023)  
(Grote versie in '16 Bijlage G: Resultaten per cel')

Grafiek 13 visualiseert de tijdsduur tot het moment dat de spanning wegvalt inclusief de temperatuur waarbij dit plaatsvindt.

Ook wanneer hier naar de tijdsduur wordt gekeken is dit sterk afhankelijk van de snelheid van extern verhitten. Voor het verwarmen in stappen is de tijdsduur gemiddeld 06:58 (90% BI [05:42; 08:13]) tegenover een gemiddelde van 02:40 (90% BI [02:03; 03:17]) bij het opwarmen bij hoge temperatuur.

De gemiddelde temperatuur waarbij de spanning wegvalt, ongeacht de snelheid van extern verhitten, ligt juist heel dicht bij elkaar. Hierbij is de gemiddelde temperatuur bij het opwarmen in stappen 162,0 °C (90% BI [136,9 °C; 187,0 °C]) vergeleken met 161,0 °C (90% BI [107,5 °C; 214,4 °C]).



Grafiek 13 Tijd en temperatuur op het moment dat de spanning wegvalt  
Bij hoge temperatuur (Hoog) en bij het opwarmen in stappen (Stappen)  
(T. Hogeterp, persoonlijke communicatie, 12 december 2023)  
(Grote versie in '26 Bijlage Q: Tijd en temperatuur bij wegvallen spanning')

### 5.3 Deelconclusie

Uit de beschreven resultaten kan worden geconcludeerd dat de tijd tot ontbranding of het wegvallen van spanning sterk afhankelijk is van de snelheid waarmee de cel extern wordt verhit. Opvallend is dat de gemiddelde temperatuur waarbij dit gebeurt aanzienlijk dicht bij elkaar ligt.

Op basis van de voorbereidende experimenten en de experimenten bij Peutz waarbij de cel van de plaat afviel na de eerste knal kan worden geconcludeerd, dat ondanks de cel al een temperatuur heeft bereikt van 173°C (maximale temperatuur ICR 9), dit alleen niet genoeg is om de TR tot stand te brengen.

Gezien de mate van schade, het ontbreken van vlammen en/of vonken en het feit dat de IFR er gemiddeld langer over doet om zijn piektemperatuur te bereiken kan worden gezegd dat de risico's van dit type Li-ion cel vergeleken met de ICR en de INR het kleinst zijn.

## 6 Discussie

Dit onderzoek heeft zich gefocust op het risico tussen de drie, bij klanten van Acuro, meest voorkomende Li-ion cellen, met betrekking tot de tijdslijn van de TR. Deze zogenoemde tijdslijn wijst op de tijdsduur vanaf het moment van 'abuse' tot het ontstaan van een TR. De resultaten laten zien dat in het geval van twee verschillende snelheden van extern verhitten de gemiddelde tijd (mm:ss) varieert tussen de 04:00 (90% BI[03:13; 04:46]) en de 08:33 (90% BI[08:03; 09:04]). Wat betekent dat er dus geen verband bestaat tussen de tijd en het ontstaan van de TR.

Echter impliceren de resultaten wel een verband tussen de temperatuur en de verschillende initiële fases, zoals het wegvallen van de spanning en het moment dat de eerste zintuigelijk waarnemingen worden gedaan. In het geval van twee verschillende snelheden van extern verhitten, varieert de gemiddelde temperatuur op het moment dat een eerste zintuigelijke waarneming wordt gedaan slechts tussen de 172,9 °C (90% BI[155,5 °C; 190,2 °C]) en de 186,7 °C (90% BI[169,6 °C; 203,9 °C]).

Dit fenomeen kan verklaard worden aan de hand van de theorie, waarin de opeenvolgende basisprocessen worden beschreven, die afhankelijk zijn van de ontledingstemperatuur van de diverse componenten waaruit een cel is opgebouwd.

Bovenstaande is dan ook in lijn met de hypothese die als volgt werd geformuleerd: "Op basis van de gevisualiseerde interne gebeurtenissen in relatie tot de temperatuur van een cel, zoals beschreven door Asecos (2023), en de beweerde volgorde van thermische stabiliteit door Feng et al. (2017), is de verwachting dat het verschil in risico tussen de drie meest gebruikte Li-ion cellen, zoals gebruikt door klanten van Acuro, sterk afhankelijk is van de verschillende initiële fasen van een TR. Hierbij wordt het volgende risico verwacht (van laag naar hoog risico): LFP > NMC > LCO."

Uit de resultaten kon niet worden geconcludeerd dat één van de drie cellen systematisch altijd eerder in een TR gaat dan de andere. Dit resultaat staat niet in lijn met het verwachte risico van de drie verschillende soorten Li-ion cellen. Echter, de mate van schade en het wel of niet waarnemen van vlammen en/of vonken, komt hier wel mee overeen.

Een mogelijke verklaring voor het uitblijven van vlammen en/of vonken bij de LFP is het feit dat de vrijgekomen zuurstof hecht aan  $P^{5+}$  en zo  $PO_4^{3-}$  vormt (Liu et al., 2018). Er komt dus als het ware geen zuurstof vrij (Doughty & Pesaran, 2012), die kan reageren met het vloeibare elektrolyt, waardoor een ontbranding zou worden veroorzaakt.

Liu et al. (2018) beschrijft verschillende interne beveiligingen die zijn toegepast om de thermische stabiliteit te verbeteren, zoals 'atom doping' en 'surface protective layers'. Zo resulteert bijvoorbeeld de toevoeging van Ni en Mn aan  $LiCoO_2$  in een verhoogde ontledingstemperatuur. Dit is terug te zien in de resultaten, waar de gemiddelde ontbrandingstemperatuur van de NMC ( $LiNiMnCoO_2$ ) hoger ligt dan die van de LCO ( $LiCoO_2$ ). Echter, de precieze toegepaste methoden op de kathodes van de gebruikte cellen tijdens de experimenten zijn niet bekend. Bovendien waren de gebruikte NMC-cellen van het merk SAMSUNG, terwijl de overige twee van de fabrikant BSE afkomstig waren. De mogelijkheid van verschillende toegepaste methoden kan extra onbekende variabelen introduceren, die verklaren waarom het verschil in ontbrandingstemperatuur niet duidelijk naar voren komt.

Ongeacht een mechanische, thermische of elektrische oorzaak, vind er uiteindelijk altijd interne kortsluiting plaats voorafgaande aan een TR. Vandaar de gedachtegang om als voorbereidend experiment interne kortsluiting te veroorzaken in de cel om de kans op een TR zo groot mogelijk te maken. Echter werd er géén van de vier keer een TR waargenomen. Er werd wel een temperatuur stijging gemeten, wat aantoonde dat er in de cel een reactie plaatsvond.

Zoals beschreven in '2.4 Thermal runaway' verschilt de snelheid waarmee de cel zichzelf opwarmt afhankelijk van de temperatuur van de cel. Tot ongeveer 150 °C gaat dit niet sneller dan 1 °C per minuut. Met een gemiddelde buitentemperatuur van 6,8 °C (Weerstatistieken KNMI, z.d.) is de snelheid waarmee de cel afkoelt waarschijnlijk groter dan de snelheid waarmee deze opwarmt.

Dit kan worden bevestigd met de volgende uitspraak uit de PGS 37-2:2023 versie 1.0: "Een thermal runaway is een ongecontroleerde toename in temperatuur, als gevolg van een grotere warmteproductie dan warmteafvoer." (PGS 37-2 team, 2023).

In de praktijk komen de cellen veelal voor in de vorm van een 'battery pack'. Dit is een veelvoud van deze cellen met een behuizing er om heen. In die situatie zal de temperatuur veel minder snel dalen, waardoor TR wel tot stand kan komen. Van dit fenomeen wordt ook gebruik gemaakt door bijvoorbeeld de Fike Blue (2023), die de cellen weet te koelen tot onder de 100 °C waarmee een TR wordt voorkomen.

Daarbij is na verloop van tijd de energie 'op' (spanning 0 V) waardoor de temperatuur stijging niet kan worden doorgezet. Tenzij, er extra energie wordt toegevoegd in de vorm van bijvoorbeeld overladen of extern verhitten, zoals in de experimenten. Hierbij werd ook duidelijk dat wanneer deze vorm van energie niet langer werd toegevoegd, doordat de cel van de plaat afschoot, de temperatuurstijging niet werd doorgezet.

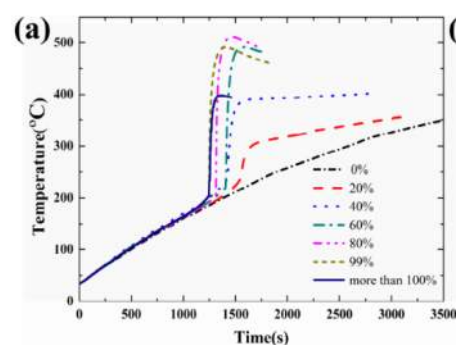
De uitgevoerde experimenten simuleren een situatie waarin een cel extern wordt verhit door een brand. Ten behoeve van de validiteit van het onderzoek werd gedurende 'Experiment 1: Opwarmen in stappen' de cel verhit met een snelheid vergelijkend aan de ISO 834 standaard brandkromme, waarbij de spreiding van het BI van de gemiddelde temperatuur van de kookplaat minimaal was. Gedurende 'Experiment 2: Opwarmen bij hoge temperatuur' liep deze spreiding meer uiteen. Daarbij kan een daadwerkelijk brand temperaturen aan nemen van ruim boven de 1000 °C (Normcommissie Brandveiligheidsaspecten bouwproducten en bouw delen, 2014). Dit is, ten nadelen van de validiteit van dit onderzoek, veel hoger dan de gemiddelde 604,7 °C (Grafiek 6 Opwarmen kookplaat) die de kookplaat maximaal kon aannemen.

De onderzochten cellen werden na ontvangst niet ontladen of bijgeladen vanwege mogelijke veranderingen aan de SEI-laag. Daarom werden cellen geselecteerd met een minimale spannings spreiding.

De LFP en LCO hadden een State of Charge (SoC) groter of gelijk aan 100% (LFP: Gemiddeld 3.80 V van 3.7 V, LCO: gemiddeld 3.24 V van 3.2 V). Op basis van de gemeten spanning voorafgaand aan de experimenten kan worden geconcludeerd dat de gemiddelde spanning van de NMC-cellen lager was dan 100% SoC (gemiddeld 3.49 V van de 3.7 V).

Grafiek 14 toont het temperatuurverloop van 18650 Li-ion cellen (LCO, 2600mAh) die experimenteel extern zijn verhit door Liu et al. (2017), waarbij verschillende SoC werden toegepast.

Hiermee wordt aangetoond dat de SoC effect heeft op de tijd tot het ontstaan van een TR en de bereikte piektemperatuur.



Grafiek 14 Temperatuursverloop Li-ion cellen bij verschillende SoC (Liu et al., 2017)



Dat de cellen gedurende de experimenten niet dezelfde SoC hadden kan dus van invloed geweest zijn op de gemeten tijden. Opvallend in Grafiek 14, is echter dat de initiële temperatuur van de TR ongeacht de SoC rond de 200 °C ligt.

Ook He et al. (2022) concludeert dat de temperatuur bepalend is ongeacht SoC: “We observed three voltage drops during self-heating ignition. The cell temperature when the first drop happens is always 133°C due to separator melting, which is independent of either the SoC and the number of cells”

De betrouwbaarheid van de bevindingen wordt versterkt door de herhaling van de experimenten in triplo. Niettemin kon de derde herhaling van het 'opwarmen in stappen' met de LFP niet worden uitgevoerd vanwege tijdsbeperkingen in het brandveiligheidslaboratorium en de bijbehorende kosten.

Om de diepgaande inzichten te vergroten en de bevindingen verder te verfijnen, wordt aanbevolen om vervolgonderzoek uit te voeren met een groter aantal herhalingen van de uitgevoerde experimenten. Door het aantal herhalingen te verhogen kan de spreiding worden verkleind en kunnen significante verschillen, die mogelijk wijzen op nog onbekende variabelen worden geïdentificeerd.

## 7 Conclusie

In dit onderzoek is het verschil in risico tussen de LCO, NMC en LFP cellen vergeleken, met een specifieke focus op de tijdslijn van de TR.

Literatuur wijst uit dat de verschillende fases gedurende het ontstaan van een TR gebaseerd zijn op de afbraak van de lagen waaruit de cel is samengesteld. Een voorwaarde voor het ontstaan van deze exotherme reacties is het bereiken van een specifieke cel temperatuur.

Dit correspondeert met de resultaten die aangeven dat, ongeacht de opwarmingsnelheid, de temperatuurhoogte cruciaal is voor het initiëren van reacties in de cel.

Interne en externe beveiligingen kunnen de elektrochemische reactie onderbreken. Voorwaarde voor het ontstaan van een TR is dan de toevoeging van externe energie. Eveneens moet de warmteproductie groter zijn dan de warmte afvoer.

Het uitgevoerde experimentele onderzoek toont aan dat de tijdslijn van de TR afhankelijk is van de snelheid waarmee de cel extern wordt opgewarmd. Statistisch gezien liggen de gemiddelde tijdsintervallen waarin een TR optreedt te ver uit elkaar om op basis van deze bevindingen specifieke tijdslijnen te benoemen voor elk van deze drie typen Li-ion cellen.

Wel kan geconcludeerd worden dat de tijdspanne tussen de eerste zintuiglijke waarneming en het moment van ontbranding, variërend van 00:00 tot 01:44, te kort is om te adviseren dat menselijke interventie na een eerste visuele waarneming van een TR nog mogelijk is.

Vanwege het ontbreken van geconcludeerde resultaten die aantonen dat één van de drie cellen systematisch altijd eerder in een TR belandt dan de andere, kan er met betrekking tot de tijdslijn van de TR geen uitspraak worden gedaan over het verschil in risico tussen de drie bij klanten van Acuro, meest voorkomende Li-ion cellen.

Gezien de mate van schade, het ontbreken van vlammen en/of vonken en het feit dat de IFR-cel er gemiddeld langer over doet om zijn piektemperatuur te bereiken kan wel worden geconcludeerd dat het risico van de LFP-cellen lager is dan die van de LCO- en NMC- cellen. Dit komt overeen met de verwachting, het risico als volgt van laag naar hoog aan te kunnen geven: LFP > NMC > LCO.

Uit dit onderzoek kan de conclusie worden getrokken dat in plaats van het bijhouden van de verstreken tijd vanaf het moment van 'abuse', het nauwlettend monitoren van de cel temperatuur meer inzicht kan bieden in het stadium van de TR waarin de Li-ion cel zich bevindt, waardoor er beter invulling gegeven kan worden aan het handelingsperspectief. Met als voorbeeld het veiligstellen en bewaken van de Li-ion cellen.



## 8 Aanbevelingen

Op basis van de verkregen resultaten zijn de volgende aanbevelingen opgesteld:

- ▶ **Cel temperatuur monitoren**  
Uit het onderzoek komt naar voren dat het nauwlettend monitoren van de cel temperatuur meer inzicht kan bieden in het stadium van de TR waarin de Li-ion cel zich bevindt. Het advies aan klanten van Acuro is dan ook om de temperatuur op cel niveau te monitoren bij opslag van lithium houdende energiedragers. Wanneer een temperatuur stijging boven de 1°C/min wordt gemeten moeten er direct maatregelen worden genomen om verder temperatuur stijging te voorkomen. Daarbij is bij de opslag van lithium houdende energiedragers en het treffen van maatregelen, het advies rekening te houden met het feit dat een TR kan worden voorkomen als de warmte afvoer groter is dan de warmte toevoer.
- ▶ **Vervolgonderzoek temperatuur**  
Door Acuro zal ingezet moeten worden op een verdiepende studie met betrekking tot welke cel temperatuur overeenkomt met welke stadium van de TR, zodat bij monitoring van de cel temperatuur nauwkeuriger kan worden onderbouwd bij welke temperatuur welke maatregelen ondernomen kunnen worden.  
Daarbij zou onderzoek gedaan kunnen worden naar de mogelijkheid om de interne cel temperatuur te kunnen meten, aangezien deze nauwkeuriger is dan de oppervlakte temperatuur.
- ▶ **Effect State of Charge onderzoeken**  
Onderzoek, zoals het onderzoek van Liu et al. (2017), toont aan dat de SoC effect heeft op het risico van Li-ion cellen. In de luchtvaart geldt zelf een internationaal standaard (IATA), waarin staat dan de SoC van Lithium houdende energiedragers die worden getransporteerd maximaal 30% mag zijn. Voor opslag bestaan alleen losse richtlijnen die een SoC tussen de 30% en 50% aangeven. (NIPV, 2023)  
Geadviseerd wordt aan Acuro om dezelfde onderzoeksopzet te herhalen, waarbij de cellen zijn opgeladen/ontladen tot verschillende SoC. Bijvoorbeeld 0%, 30%, 50%, 80% en 100%. Hiervoor is het advies onder andere het artikel “Experimental study of the effect of the state of charge on self-heating ignition of large ensembles of lithium-ion batteries in storage” te bestuderen, geschreven door He et al. (2022). Hierin wordt onder andere geconcludeerd dat er alleen vlammen ontstaan bij een SoC van 80% of hoger. Dit is een belangrijk statement met betrekking tot de opslag van lithium houdende energiedragers en het bijbehorende risico.
- ▶ **Verschil tussen Pouch- en cilindrische cel onderzoeken**  
Het huidige onderzoek is uitgevoerd met een cilindrische cel. Bij klanten van Acuro komt ook de pouch cel steeds vaker voor (M. Hardeman, persoonlijke communicatie, 22 december 2023). Doordat apparaten steeds dunner worden, wordt deze vorm al veelal toegepast in apparaten zoals smartphones en laptops. Experts verwachten ook voor andere gebruikstoepassingen een toename van de Pouch cel, omdat de kosten tegenwoordig nagenoeg vergelijkbaar zijn met die van de cilindrische. Daarbij zijn ze door de vorm beter te stappelen en kan er dus een hogere capaciteit per vierkante meter worden bereikt. (Battery University, 2019)

Advies aan Acuro is dan ook om dezelfde onderzoekopzet te herhalen, alleen dan voor zowel de pouch als de cilindrische cel om het risico op TR met elkaar te kunnen vergelijken.

► Het effect van de gassen die vrijkomen onderzoeken

In dit onderzoek is het effect gebaseerd op de visuele waarnemingen die werden gedaan. Zo werd er waargenomen dat de LFP niet tot ontbranding kwam, waarop is gebaseerd dat het effect van de LFP het laagst is. Echter kwam er wel een aanzienlijke hoeveelheid gas vrij. Het is bekend dat de gassen giftig zijn, maar stel dat het gas van de LFP nog veel giftiger is, dan kunnen deze net zo gevaarlijk zijn als een ontbranding. Advies aan Acuro is dan ook om een literatuurstudie op te zetten om te onderzoeken wat het effect is van de gassen die vrijkomen.

► Heat release rate meten

Uit gesprekken bij Peutz kwam naar voren dat zij gaan investeren in apparatuur die de Heat Release Rate (HRR) kan bepalen. De HRR is een belangrijke parameter die informatie geeft over de intensiteit van de vrijgekomen warmte (Garche & Brandt, 2018). Advies aan Acuro is daarom om dezelfde onderzoekopzet te herhalen, wanneer de apparatuur om de HRR te meten beschikbaar is, om ook dit mee te kunnen nemen in de vergelijking van het risico van de verschillende Li-ion cellen.

► Ander oorzaken van de TR onderzoeken

Naast externe kortsluiting en extern verhitten zijn er andere oorzaken van een TR. Advies aan Acuro is dan ook om dezelfde onderzoekopzet te herhalen en een veilige manier te zoeken om de cel mechanisch te beschadigen en een manier waarop de cel overladen kan worden. Zo kan worden onderzocht wat voor effect dit heeft op de TR.

► Onderzoek uitvoeren in veelvoud

Aan Acuro wordt geadviseerd het uitgevoerd onderzoek te herhalen met een steekproef grote van minimaal 30. Vanaf dit aantal kunnen significante verschillen en verbanden pas statistisch worden aangeduid (Remco, z.d.).

Wanneer dit wordt gedaan is het advies om de volgende verbeterpunten in acht te nemen:

- De keuze voor het gebruiken van de kookplaat is bewust gemaakt en onderbouwd in eerdere hoofdstukken. Toch bracht deze keuze een aantal limitaties met zich mee. Zo werd met deze kookplaat een maximale temperatuur van 604,7 °C bereikt en kon de snelheid van opwarmen niet volledig handmatig worden ingesteld. Daarbij was deze snelheid en temperatuur niet volledig constant. Voor vervolgonderzoek zou ten behoeve van de betrouwbaarheid van de resultaten apparatuur gebruikt moeten worden, waarmee constante temperaturen bereikt kunnen worden boven de 1000 °C en waarbij de snelheid van opwarmen bij iedere herhaling identiek is. Om de gehele oppervlakte van de cel gelijkmatig te verhitten, in plaats vanaf één zijde zoals op de kookplaat, zou een oven beter geschikt zijn.
- Als door beschikbaarheid en kosten in de toekomst weer de keuze wordt gemaakt om de testen uit te voeren op de kookplaat, wordt er aanbevolen één plek op de plaat te markeren en de cellen vast te klemmen. Zo ligt de cel elke keer exact op dezelfde plek en kan deze niet verplaatsen. Bij de manier van klemmen moet wel rekening gehouden worden dat dit minimaal effect heeft op de warmte- en drukopbouw.

Wanneer de cel stil ligt heeft dit ook voordelen voor de metingen met de thermokoppel. Zodra de cel rolt komt de thermokoppel dichterbij de kookplaat te liggen, waardoor een onnauwkeurigheid in de meting ontstaat.

- Tijdens het vastplakken van de thermokoppel aan de cel is het advies om bij elke cel een dunne strook met aluminium tape minimaal één keer volledig om de batterij te wikkelen. Het is gebleken dat de kans op vroegtijdig loslaten hiermee verkleint.
- Door de veiligheidsman van Peutz werd de stekker van de kookplaat voor de veiligheid uit het stopcontact getrokken bij het horen van een knal of het waarnemen van vonken of ontgassing. Als dit met oog op de veiligheid mogelijk is, dan is het advies om dit pas te doen wanneer de temperatuur van de cel uit zichzelf begint terug te lopen. In het scenario waarbij de cel extern wordt verhit door brand zal de temperatuurstijging ook niet op dit moment stoppen.
- De keuze om de nikkel soldeer strips zelf aan de cellen te solderen, was gemaakt omdat niet van elke subcategorie, cellen beschikbaar waren met al een soldeerstrip er aan vast. Als dit in de toekomst wel beschikbaar is, zou hier uiteraard de voorkeur naar uit gaan zodat de cellen niet voortijdig aan de experimenten in aanraking komen met de soldeerbout. Daarbij is het advies de soldeer strips langer te maken zodat de krokodillenklemmen en kabels van de multimeter verder weg liggen van de warmtebron.

► **Onderzoek aan module of battery pack**

Dit onderzoek focust zich enkel op het cel niveau van de energiedragers, echter komen deze cellen vaak gebundeld voor in de vorm van een 'module' of 'battery pack'. Tot slot is daarom het advies aan Acuro om een onderzoek op te zetten waarin de invloed van gebundelde cellen, inclusief de behuizing, op de warmteproductie en de warmteafvoer wordt onderzocht.

## 9 Bibliografie

- Asecos. (2019). *Lithiumbatterijen niet zo onschuldig als ze lijken*. Leimuiden: Asecos.
- Asecos. (2023). *Lithium batterijen niet zo onschuldig als ze lijken*. Leimuiden: Asecos.
- Asecos. (z.d.). *Whitepaper Veilig opslaan en laden van: Lithium-accu's*. Leimuiden: Asecos.
- Autodoc. (z.d.). *BERU GV835 Gloeibougje*. Opgehaald van Autodoc:  
[https://www.autodoc.nl/beru/991346?utm\\_medium=cpc&utm\\_source=google&tb\\_prm=18631378973&gshp=1&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiA1-6sBhAoEiwArqlGPmH8TKwltJY7y4flEsi67ks8Wuqurkx\\_bYa1FJbL8KFQ11psVG5-FxoCWWoQAvD\\_BwE](https://www.autodoc.nl/beru/991346?utm_medium=cpc&utm_source=google&tb_prm=18631378973&gshp=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA1-6sBhAoEiwArqlGPmH8TKwltJY7y4flEsi67ks8Wuqurkx_bYa1FJbL8KFQ11psVG5-FxoCWWoQAvD_BwE)
- Battery University. (2019, april 24). *BU-301a: Types of Battery Cells*. Opgehaald van Battery University: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>
- Battery university. (2021, oktober 22). *BU-205: Types of Lithium-ion*. Opgehaald van Battery university: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- Brans, H. (2023). *Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid*. Arnhem: Nederlands Instituut Publieke Veiligheid.
- Doughty, D. H., & Pesaran, A. A. (2012). *Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance*. Denver: National Renewable Energy Laboratory.
- Dupa Veiligheidstechniek. (2022, maart 18). *Accu's in het lab, tikkende brandbom*. Opgehaald van Dupa Veiligheidstechniek: <https://www.dupa.nl/accus-in-het-lab-tikkende-brandbom/>
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2017). *Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review*. Beijing: Elsevier B.V.
- FHI federatie van technologiebranches. (2020, januari 23). *Welke oplaadbare lithium-ion batterij kies ik voor mijn applicatie?* Opgehaald van FHI: <https://fhi.nl/energystorage/nieuws/welke-oplaadbare-lithium-ion-batterij-kies-ik-voor-mijn-applicatie/>
- Fike Blue. (2023). *The Only Solution Proven to Stop Thermal Runaway*. Opgehaald van Fike Blue: <https://fikeblue.com/>
- Garche, J., & Brandt, K. (2018). Chapter 12 - Li-Secondary Battery: Damage Control. In J. Garche, & K. Brandt, *Li-Battery Safety* (pp. 507-629). G: Elsevier B.V.
- He, X., Hu, Z., Restuccia, F., Fang, J., & Rein, G. (2022). *Experimental study of the effect of the state of charge on self-heating ignition of large ensembles of lithium-ion batteries in storage*. Hefei: Elsevie Ltd.
- klantenservice La Kraft. (z.d.). *Batterij Veiligheid Lithium-Ion*. Opgehaald van La Kraft: <https://www.lakraft.com/catalog/category/view/s/batterij-veiligheid-lithium-ion/id/314/>
- Lesics. (2019, april 12). *Lithium-ion battery, How does it work?* Opgehaald van YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U>
- Li, Z., Xiong, Y., Sun, S., Zhang, L., Li, S., Liu, X., . . . Xu, S. (2018). *Tri-layer nonwoven membrane with shutdown property and high robustness as a high-safety lithium ion battery separator*. Beijing: Elsevier B.V.

- Liu, J., Wang, Z., Gong, J., Liu, K., Wang, H., & Guo, L. (2017). *Experimental Study of Thermal Runaway Process of 18650 Lithium-Ion Battery*. Jiangsu: Materials.
- Liu, K., Liu, Y., Lin, D., Pei, A., & Cui, Y. (2018). *Materials for lithium-ion battery safety*. Stanford: American Association for the Advancement of Science.
- Lyu, P., Liu, X., Qu, J., Zhao, J., Huo, Y., Qu, Z., & Roa, Z. (2020). *Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage*. Xuzhou: Energy Storage Materials.
- Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A. v., & Yokochi, A. (2019). *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles an Opportunities for Advancements*. Basel: Energies.
- Niclas. (2020, oktober 28). *Stages of The Thermal Runaway Process in Lithium Batteries*. Opgehaald van Sino Voltaics: <https://sinovoltaics.com/energy-storage/batteries/stages-of-the-thermal-runaway-process-in-lithium-batteries/>
- NIPV. (2023, juni). *Brand in opslag van Li-ion accu's*. Opgehaald van NIPV: <https://scenarioboeken.nipv.nl/brand-in-opslag-van-li-ion-accus/>
- NIPV. (2023, augustus 17). *Thermal runaway in een lithium-ion batterijpakket*. Opgehaald van NIPV: [https://nipv.nl/thermal-runaway-in-een-lithium-ion-batterijpakket/?utm\\_source=NIPV+Nieuws++31+augustus+2023&utm\\_medium=email](https://nipv.nl/thermal-runaway-in-een-lithium-ion-batterijpakket/?utm_source=NIPV+Nieuws++31+augustus+2023&utm_medium=email)
- Normcommissie Brandveiligheidsaspecten bouwproducten en bouwdelen. (2014). *ISO 834-11*. Delft: NEN.
- NOS. (2021, september 15). *NOS*. Opgehaald van E-bike gaat in vlammen op nadat accu ontploft in Weert: <https://nos.nl/artikel/2397931-e-bike-gaat-in-vlammen-op-nadat-accu-ontploft-in-weert>
- Pfrang, A., Kriston, Á., Ruiz, V., Lebedeva, N., & Di Persio, F. (2017). *Safety of rechargeable energy storage systems with a focus on li-ion technology* (Vol. pp. 253-290). Elsevier eBooks. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-42977-1.00008-x>
- PGS 37-2 team. (2023, december). *372 Lithiumhoudende energiedragers: Opslag*. Opgehaald van Publicatiereeksgevaarlijkstoffen: <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffen.nl/publicaties/online/pgs-37-2/2023/1-0-december-2023#2-1-2>
- Remco. (z.d.). *Omvang van een steekproef*. Opgehaald van Skoledo: <https://www.skoledo.com/kennisartikelen/omvang-van-een-steekproef/#~:text=De%20foutmarge%20van%20de%20steekproef,je%20uitkomsten%20zullen%20nauwkeuriger%20zijn.&text=Een%20vuistregel%20die%20je%20kunt,30%20tot%2040%20moet%20zijn>
- Ryan, M., & O'Callaghan, A. (2002). *The Scientific Method*. Opgehaald van Extension: <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=4239>
- Statistica Research Department. (2023, oktober 19). *Size of the global battery market from 2018 to 2021, with a forecast through 2030, by technology*. Opgehaald van Statistica: <https://www.statista.com/statistics/1339880/global-battery-market-size-by-technology/>
- Stibat. (2023, mei 12). *Lithium batterijen: werking, veiligheid, opslag en transport*. Opgehaald van Stibat:

<https://www.stibat.nl/kennisbank/lithiumbatterijen/#:~:text=De%20voordelen%3A%20meer%20kracht%20en,wel%20zeven%20keer%20langer%20mee>

Stolte, N. (2023). *Eerste indicaties thermal runaway - EOS*. Utrecht: Acuro.

Takenaka, N., Bouibes, A., Yamanda, Y., Nagaoka, M., & Yamada, A. (2021). *Frontiers in Theoretical Analysis of Solid Electrolyte Interphase Formation Mechanism*. Wiley-VCH GmbH.

Tang, W., Tam, W. C., Yuan, L., Dubaniewicz, T., Thomas, R., & Soles, J. (2020). *Estimation of the critical external heat leading to the failure of lithium-ion batteries*. Pittsburgh: Elsevier Ltd.

Tesla. (2018). *Lithium-Ion Battery Emergency Response Guide Tesla Powerpack System, Powerwall, and Sub-assembly, All Sizes*.

Tromp, I., & van Mierlo, I. (2013). *Fire Safety Engineering* (Vol. P. 45). Delft: Efectis Nederland BV.

van der Bol, B. (2023, augustus 4). *Jaarlijks tientallen branden in vuilniswagens door batterijen en accu's*. Opgehaald van NOS: <https://nos.nl/artikel/2485439-jaarlijks-tientallen-branden-in-vuilniswagens-door-batterijen-en-accu-s>

Vrieling, E. (2023, december 30). *Boeing's Battery Blues*. Opgehaald van IEEE Spectrum: <https://spectrum.ieee.org/boeings-battery-blues>

Weerstatistieken KNMI. (z.d.). *Weerstatistieken De Bilt - november 2023*. Opgehaald van Weerstatistieken: <https://weerstatistieken.nl/de-bilt/2023/november>

Xu, B., Kong, L., Wen, G., & Pecht, M. G. (2021). *Protection Devices in Commercial 18650 Lithium-Ion Batteries*. IEEE Access.

Xu, C. (2022). *Lithium-ion batteries and the transition to electric vehicles: environmental challenges and opportunities from a life cycle perspective*. Leiden: Leiden University.

Z, I. (2016, juli 19). *What's the difference? IMR, ICR and INR18650*. Opgehaald van linkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/whats-difference-imricr-inr18650-iris-zhong/>



# 10 Bijlage A :EV's are less likely to catch fire

evfiresafe.com

## GLOBAL ELECTRIC VEHICLE BATTERY FIRES

as of 11th July 2022

EVs are less likely to catch fire than internal combustion vehicles...here's what we know

### Why EV FireSafe?

Transport emissions account for:

25%

of global greenhouse gas emissions, which has led to the rapid electrification of vehicles

EV battery fire incidents have led to concerns about emergency responder safety when attending

EV lithium ion traction battery fires

To enhance emergency responder safety, we researched plug-in (BEV & PHEV) passenger electric vehicle battery fires from

2010 - 2022


breaking down our findings here & at [evfiresafe.com](http://evfiresafe.com)

### How many EV battery fires?

Since 2010, the EV FireSafe research team found:

246
+ 27
+ 40

verified\* EV traction battery fires globally    unverified - from a reliable source, waiting on further info    investigating - online rumour, tip off, clickbait

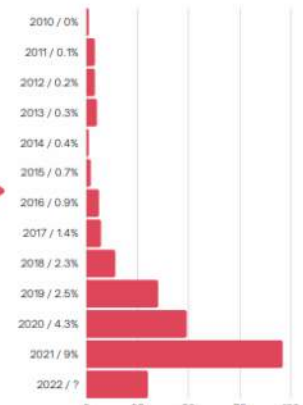


In the world of clean energy, few areas are as dynamic as the electric car market. We estimate there are now around 16 million electric cars on the road worldwide...!

International Energy Agency, January 2022

### When did they occur?

By year & EV global market share:



Year	EV Global Market Share	EV Battery Fires
2010	0%	0
2011	0.1%	0
2012	0.2%	0
2013	0.3%	0
2014	0.4%	0
2015	0.7%	0
2016	0.9%	0
2017	1.4%	1
2018	2.3%	2
2019	2.5%	3
2020	4.3%	5
2021	9%	9
2022	?	7

EV battery fires are rare, but present new risks & challenges for emergency responders when they do occur. From these verified incidents, we found:

### Cause

Battery cell abuse, leading to thermal runaway & ignition or explosion, caused by:

- Unknown
- Collision / debris
- OEM battery fault
- Arson / malicious
- External fire
- Workshop / repair
- Overheating
- Submersion

### Location\*

\*20.32% unknown

- 24.39% Underground / enclosed spaces
- 23.58% Outside & parked
- 31.71% Outside & driving

### Ignition vs explosion

- 94.72% Ignition  
Jet like, directional flames
- 5.28% Vapour cloud explosion  
Violent deflagration

### Vapour cloud explosion

Of total vapour cloud explosion incidents:

- 71.43% Underground / enclosed space
- 28.57% Open air

### Charging

Of total incidents:

- 18.70% EV connected to energised charging
- 2.44% EV disconnected from energised charging within 60 minutes

### Electrocution

We found NO reports or evidence of electrocution or near miss of emergency responders from:

- Direct stream of water on HV
- Submersion
- Extraction of occupants
- Stranded energy

But electrocution is still a risk!

© All information remains the property of EV FireSafe & any misuse will result in our taking necessary steps to assert ownership of our intellectual property. Content is given for information purposes only and is not intended to be used as a substitute for professional advice. The information is provided for informational purposes only and is not intended to be used as a substitute for professional advice. The information is provided for informational purposes only and is not intended to be used as a substitute for professional advice.

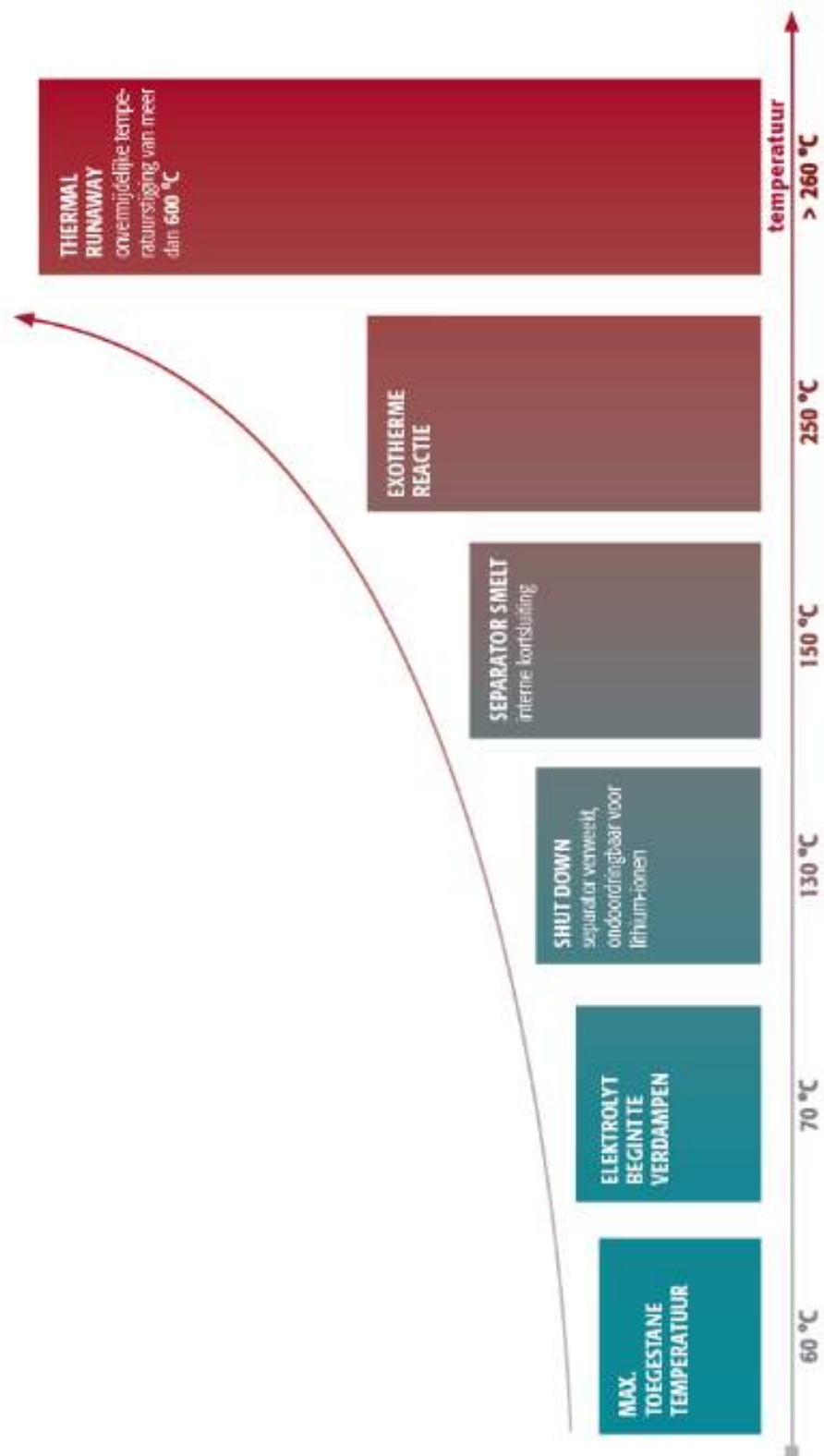
(EV FireSafe, 2022)

# 11 Bijlage B: Beveiligingsapparatuur gedemonteerde 18650 Li-ion batterijen

	Button top	Metal outer jacket	First plastic insert	Terminal contact	PTC	Top disk	Second plastic insert	Button disk	Bottom vent	Protection circuit
Sony VTC5	×				×				×	×
Samsung 26F									×	×
Sony VTC5D	×				×					×
Protected Samsung 30Q					×				×	

(Xu, Kong, Wen, & Pecht, 2021)

## 12 Bijlage C: Interne gebeurtenissen TR



(Asecos, 2023)

## 13 Bijlage D: Testopstelling





# 14 Bijlage E: Kalibratie rapporten

 POLSKIE CENTRUM AKREDYTACJI WZDRZOWANIE AP 201		Guenther Polska Sp. z o.o. Ul. Wroclawska 27C 55-095 Dlugoleka  Calibration laboratory accredited by Polish Centre for Accreditation, a signatory to EA MLA and ILAC MRA that include recognition of calibration certificates. Accreditation No AP 201	 Technologie pomiaru temperatury Niezawodne . Dokladne . Certyfikowane
<b>CALIBRATION CERTIFICATE NO. : PA2203045a</b>			
Release date: 11.04.2022			
APPLICANT	Langkamp Technology BV 3961 MV Wijk bij Duurstede Molenvliet 22		
PLACE OF CALIBRATION	Guenther Polska Sp. z o.o. ul. Wroclawska 27c 55-095 Dlugoleka		
EXTERNAL ORDER NO.	142200334		
INTERNAL ORDER NO.	ZS 123/03/2022/P		
OBJECT OF CALIBRATION	Name: Thermocouple	Type: 1xNiCr-Ni/K	
	Article code: 22059878	Registration No.: From PA2203045/1 To PA2203045/200	
	Charge: 0101018202204	Manufacturer/ Model: Guenther	
DATE OF CALIBRATION	11.04.2022		
TYPE OF CALIBRATION	Initial		
CALIBRATION METHOD	The calibration has been performed in accordance with procedure QMV9.01.01 Calibration of the thermocouple by the comparison method ver.3.0 from 12.10.2021 (based on the ASTM E220-19).		
MEASUREMENT TRACEABILITY	The certificate provides traceability of measurement results with of the International System of Units (SI).		
MEASUREMENT UNCERTAINTY	The measurement uncertainty has been determined in accordance with EA-4/02 M: 2013. Provided uncertainty values are expanded uncertainties with a probability of extension of about 95% and a expansion factor of k = 2.		
COMMENTS	Calibration results apply only calibrated object. This certificate may be presented or copied as a whole document only.		

## REFERENCE PROBES AND MEASURING DEVICES

### *Cold junction 0°C*

WIKA	2021-993-PT-1	L-Z-0005	14-11-2022
------	---------------	----------	------------

### *Measuring instrument*

Keysight	1511/2021	L-M-0007	12-04-2022
----------	-----------	----------	------------

### *Temperature source*

T ≤ 20°C	Fluke	immersion depth = 150 mm	L-H-0002
T > 20°C	Fluke	immersion depth = 200 mm	L-H-0006

### *Reference probes*

PIRh10-P/S	0831/PWT/2021	L-T-0021	21-07-2022
------------	---------------	----------	------------

---

## ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Ambient temperature (21,5 ÷ 21,5) °C

Humidity (24,5 ÷ 25,2) %

---



### RESULTS OF CALIBRATION

SENSOR TYPE	TEMPERATURE			THERMOVOLTAGE	MEASUREMENT ERROR	MAXIMUM PERMISSIBLE ERROR	MEASUREMENT UNCERTAINTY	COMMENTS
	NOMINAL	REFERENCE	CALCULATED					
	[°C]			[mV]	[°C]	± [°C]	± [°C]	
K	20,0	21,5	21,7	0,868	0,2	1,5	0,7	thermocouple roll start
	100,0	99,3	99,5	4,078	0,2	1,5	0,7	
	150,0	149,1	149,4	6,114	0,3	1,5	0,7	
	200,0	201,1	200,9	8,173	-0,2	1,5	0,7	
K	20,0	21,5	21,7	0,869	0,2	1,5	0,7	thermocouple roll end
	100,0	99,3	99,5	4,078	0,2	1,5	0,7	
	150,0	149,1	149,4	6,113	0,3	1,5	0,7	
	200,0	201,1	200,8	8,172	-0,3	1,5	0,7	

### COMMENTS

- Nominal temperature: set point specified in the order.
- Reference temperature: average value of the measurements read from the reference standard.
- Calculated temperature: calculated temperature value on the basis of the PN-EN 60584-1:2014-04 from the measured thermovoltage of the calibrated object.
- Measurement error = Calculated temperature - Reference temperature
- Maximum permissible error: maximum permissible measurement error according to the PN-EN 60584-1 : 2014-04 pt 5.1. for class 1.
- Length of the thermocouple coil represented by the calibrated object = 1200 m.
- Compliance with a given specification made on the basis of the principles of the simple acceptance according to the ILAC-G8 list: 09/2019.
- Average measurement error of calibrated objects.

SENSOR TYPE	NOMINAL TEMPERATURE	AVERAGE MEASUREMENT ERROR
	[°C]	
K	20,0	0,2
	100,0	0,2
	150,0	0,3
	200,0	-0,3

### CONFORMITY WITH REQUIREMENTS

Conformance with PN-EN 60584-1:2014-04 pt 5.1 class 1 was found on the basis of all calibration results.

Made by: Z-ca Kierownika Laboratorium  
 Deputy Head of Laboratory

Signature:

*mgr inż. Anna Więcek*  
 mgr inż. Anna Więcek

Approved:

Kierownik Laboratorium  
 Head of Laboratory

Signature:

*mgr inż. Elwira Słocka*  
 mgr inż. Elwira Słocka

END



## Certificate of Calibration Fluke Nederland B.V.

<b>Certificate Number:</b>	SA01200805	<b>Date of Calibration:</b>	26 Sep 2023
<b>Receive Condition:</b>	OUT OF TOLERANCE	<b>Date of Recalibration:</b>	26 Sep 2024
<b>Return Condition:</b>	IN TOLERANCE AFTER REPAIR/ADJUSTMENT	<b>Place of Calibration:</b>	Eindhoven
<b>Manufacturer:</b>	FLUKE	<b>Temperature within:</b>	(23.0 ± 1) °C
<b>Model:</b>	FLUKE-726	<b>Humidity within:</b>	(45 ± 10) %rh
<b>Serial Number:</b>	5534591		
<b>Description:</b>	PRECISION CALIBRATOR		
<b>Procedure:</b>	Fluke_Fluke-726_Cal_RS232_17025_CAL (v4.8F)		

<b>Customer:</b>	PEUTZ BV MOLENHOEK
<b>Customer Asset ID:</b>	3203
<b>RMA Number:</b>	606313492

The measurements have been executed using standards for which the traceability to (inter)national standards has been demonstrated towards the Raad voor Accreditatie.

The Raad voor Accreditatie is member of the European Co-operation for Accreditation (EA) and is one of the signatories to the EA Multilateral Agreement (MLA) and to the ILAC Mutual Recognition Arrangements (MRA) for the mutual recognition of calibration Certificates. Reproduction of the complete certificate is allowed. Parts of the certificate may only be reproduced with written approval of the calibration laboratory. This certificate is issued provided that neither the Raad voor Accreditatie nor Fluke Nederland B.V. assumes any liability. Fluke Nederland B.V. is accredited by the RvA (Dutch Accreditation Council) based on an assessment against the requirements as laid down in ISO/IEC 17025.

Measurement uncertainties at the time of calibration are given where applicable. They are calculated in accordance with the method described in the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (EA-4/02). The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by a coverage factor  $k=2$ , such that the coverage probability corresponds to approximately 95%. In case a '#' is reported, no expanded uncertainty could be calculated.

This certificate of calibration may contain data that is not covered by the Scope of Accreditation. The unaccredited test points, where applicable, are indicated by the # symbol or confined to clearly marked sections.



**Issue Date:** 26 Sep 2023

Electronically signed

**Authorized By**

W.A.J. van den Eijnden

Fluke Nederland B.V.

E-mail

Telephone

Rev 230623

Brainport Industries Campus 1, 5657 BX, Eindhoven

service.nl@fluke.com

+31 40 267 5300

Page 1 of 9

## Certificate of Calibration

**Certificate Number:** SA01200805

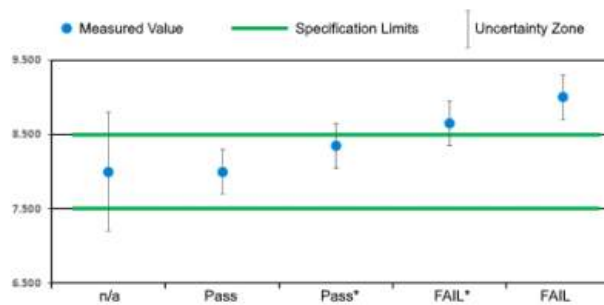
### Conformance with Specification

The following pages contain the calibration results with two further columns indicating the instrument performance relative to the stated specifications. To determine conformance with specification the 'ILAC-G8:09/2019, APPX B, example 2' guideline was used as a reference.

The column headed '% of Tol' is the measured error as percentage of the stated limits with no allowance being made for the calibration uncertainty.

The column headed 'Status' indicates conformance or otherwise with specification taking into account the measurement uncertainty. The possible conditions are indicated as follows:

Indicator	Explanation
Pass	The equipment conforms with the stated specification at the measured points, due allowance having been made for the uncertainty of the measurements, if available.
Pass*	The measurement result is within the specification limit by a margin less than the measurement uncertainty; it is therefore not possible to state conformance based on the stated level of confidence. However the results indicate that conformance is more probable than non-conformance with the specification limit.
FAIL*	The measurement result is outside the specification limit by a margin less than the measurement uncertainty; it is therefore not possible to state non-conformance based on the stated level of confidence. However the results indicate that non-conformance is more probable than conformance with the specification limit.
FAIL	The equipment does not conform with the stated specification at the measured points, due allowance having been made for the uncertainty of the measurements, if available.
n/a	It is not possible to determine conformance with specification.





## Certificate of Calibration

Certificate Number: SA01200805

---

### Remarks

- The calibration status found in this certificate on the top of each results page must be interpreted as:
  - As Found : Data collected before the unit was adjusted and / or repaired
  - As Left : Data collected after the unit has been adjusted and / or repaired
  - Found / Left : Data collected without any adjustment and / or repair performed
- Based on the chosen guardbanding strategy (if applicable) it is possible that one or more tests only conditionally passed or conditionally failed. Please review the Summary Report(s) at the end of each result set (As Found, As Left or Found / Left) for a complete status overview of all tests performed.
- The calibration interval (due date) is the responsibility of the end user.
- According to the European norm 'Operation of electrical installations' NEN-EN 50110-1 release 2013 and the Dutch norm NEN 3140 release 2015 paragraph 5.102.12 through 5.102.16, a safety test is not required. Therefore not performed.
- Temperature conversions (if applicable) are performed according to ISO/IEC 60584:2013 for thermocouples, and ISO/IEC 60751:2022 for resistance temperature devices.

### Standards and test-equipment used

Inventory No	Model	Serial No
SL0346	3458A	2823A15712
SL0516	5520A-PQ/1G	8430013
SL1096	8508A	368071717





## Calibration Results As Found

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 25 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status	
DUT Specification Source: 726___umeng0000.pdf - User's manual - September 2005									
Firmware version : 1.52.									
<b>DC Voltage calibration (MEASURE)</b>									
<b>lower display</b>									
90.0000	mV	90	89.990	-0.010	±0.019	mV	53	2.3E-06 V Pass	
6.0000	V	20	5.999	-0.001	±0.003	V	39	5.8E-04 V Pass	
12.0000	V	20	11.998	-0.002	±0.003	V	63	5.9E-04 V Pass	
18.0000	V	20	17.997	-0.003	±0.004	V	79	6.1E-04 V Pass	
<b>upper display</b>									
9.0000	V	30	8.999	-0.001	±0.003	V	35	5.9E-04 V Pass	
18.0000	V	30	17.998	-0.002	±0.004	V	53	6.1E-04 V Pass	
27.0000	V	30	26.997	-0.003	±0.005	V	64	6.4E-04 V Pass	
<b>Frequency calibration (MEASURE)</b>									
50.00	Hz	2 Vpp	1000	50.0	0.0	±0.1	Hz	0	5.8E-02 Hz Pass
1000.00	Hz	2 Vpp	1000	1000.0	0.0	±0.6	Hz	2	6.2E-02 Hz Pass
10.000	kHz	2 Vpp	15	10.00	0.00	±0.02	kHz	0	5.8E+00 Hz Pass
15.000	kHz	2 Vpp	15	15.00	0.00	±0.02	kHz	0	5.8E+00 Hz Pass
<b>DC Current calibration (MEASURE)</b>									
<b>lower display</b>									
3.9998	mA	24	3.999	-0.001	±0.002	mA	33	5.8E-07 A Pass	
7.9996	mA	24	7.998	-0.002	±0.003	mA	57	5.9E-07 A Pass	
11.9994	mA	24	11.997	-0.002	±0.003	mA	77	8.1E-07 A Pass	
15.9992	mA	24	15.996	-0.003	±0.004	mA	90	8.7E-07 A Pass*	
19.9990	mA	24	19.995	-0.004	±0.004	mA	100	9.3E-07 A Pass*	
23.9988	mA	24	23.995	-0.004	±0.004	mA	87	1.0E-06 A Pass	
<b>upper display</b>									
3.9998	mA	24	3.999	-0.001	±0.002	mA	29	6.3E-07 A Pass	
7.9996	mA	24	7.999	-0.001	±0.003	mA	21	5.9E-07 A Pass	
11.9994	mA	24	11.998	-0.001	±0.003	mA	45	8.1E-07 A Pass	
15.9992	mA	24	15.998	-0.001	±0.004	mA	33	8.7E-07 A Pass	
19.9991	mA	24	19.997	-0.002	±0.004	mA	51	9.3E-07 A Pass	
23.9989	mA	24	23.997	-0.002	±0.004	mA	43	1.0E-06 A Pass	
<b>4W Resistance calibration (MEASURE)</b>									
<b>lower display</b>									
350.000	Ω	400	349.99	-0.01	±0.10	Ω	6	1.1E-02 Ω Pass	
3500.00	Ω	4000	3500.0	0.0	±1.0	Ω	0	1.1E-01 Ω Pass	
<b>4W RTD calibration (MEASURE)</b>									
<b>PT100-385</b>									
-180.000	°C	800	-180.02	-0.02	±0.15	°C	13	3.9E-02 °C Pass	
0.000	°C	800	-0.01	-0.01	±0.15	°C	9	3.9E-02 °C Pass	
200.000	°C	800	199.98	-0.02	±0.25	°C	7	7.0E-02 °C Pass	
450.000	°C	800	449.99	-0.01	±0.35	°C	4	9.3E-02 °C Pass	
630.000	°C	800	629.98	-0.02	±0.45	°C	4	9.3E-02 °C Pass	
<b>3W RTD calibration (MEASURE)</b>									

## Calibration Results As Found

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 25 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status	
<b>PT100-385</b>									
-180.000 °C	800	-179.99	0.01	±0.27	°C	3	3.9E-02 °C	Pass	
0.000 °C	800	0.01	0.01	±0.28	°C	2	3.9E-02 °C	Pass	
200.000 °C	800	200.00	0.01	±0.39	°C	1	7.0E-02 °C	Pass	
450.000 °C	800	449.99	-0.01	±0.50	°C	3	9.3E-02 °C	Pass	
630.000 °C	800	630.01	0.01	±0.61	°C	2	9.3E-02 °C	Pass	
<b>Temperature calibration (MEASURE)</b>									
<b>type J (CJC On / ITS 90)</b>									
-180.00 °C	1200	-180.0	0.0	±0.6	°C	0	4.2E-01 °C	Pass	
0.00 °C	1200	0.0	0.0	±0.4	°C	0	2.2E-01 °C	Pass	
1200.00 °C	1200	1199.9	-0.1	±0.5	°C	22	3.6E-01 °C	Pass	
<b>type K (CJC On / ITS 90)</b>									
-180.00 °C	1372	-179.9	0.1	±0.8	°C	11	5.2E-01 °C	Pass	
0.00 °C	1372	0.0	0.0	±0.5	°C	0	2.5E-01 °C	Pass	
950.00 °C	1372	949.9	-0.1	±0.5	°C	20	4.1E-01 °C	Pass*	
1300.00 °C	1372	1299.8	-0.2	±0.7	°C	29	6.2E-01 °C	Pass*	
<b>Temperature calibration (SOURCE)</b>									
<b>type J (CJC On / ITS 90)</b>									
-180.00 °C	1200	-180.0	0.0	±0.6	°C	6	4.2E-01 °C	Pass	
0.00 °C	1200	0.0	0.0	±0.4	°C	1	2.2E-01 °C	Pass	
1200.00 °C	1200	1200.1	0.1	±0.5	°C	28	3.6E-01 °C	Pass	
<b>type K (CJC On / ITS 90)</b>									
-180.00 °C	1372	-180.0	0.0	±0.8	°C	5	5.1E-01 °C	Pass	
0.00 °C	1372	0.0	0.0	±0.5	°C	5	2.5E-01 °C	Pass	
950.00 °C	1372	950.1	0.1	±0.5	°C	24	4.0E-01 °C	Pass	
1300.00 °C	1372	1300.2	0.2	±0.7	°C	27	6.2E-01 °C	Pass*	
<b>DC Voltage calibration (SOURCE)</b>									
50.00 mV	100	50.007	0.007	±0.015	mV	45	8.8E-07 V	Pass	
100.00 mV	100	100.014	0.014	±0.020	mV	70	1.2E-06 V	Pass	
10.000 V	20	10.0022	0.0022	±0.0030	V	74	8.9E-05 V	Pass	
20.000 V	20	20.0044	0.0044	±0.0040	V	110	2.7E-04 V	FAIL	
<b>Frequency calibration (SOURCE)</b>									
50.0 Hz	2.5 V	1000	50.00	0.00	±0.03	Hz	4	5.9E-03 Hz	Pass
1000.0 Hz	2.5 V	1000	999.98	-0.02	±0.50	Hz	4	2.5E-02 Hz	Pass
10.000 kHz	2.5 V	10	9.9998	-0.0002	±0.0250	kHz	1	2.5E-01 Hz	Pass
15.000 kHz	2.5 V	15	15.0373	0.0373	±0.0750	kHz	50	3.4E-01 Hz	Pass
<b>DC Current calibration (SOURCE)</b>									
4.000 mA	24	4.0003	0.0003	±0.0024	mA	15	1.6E-07 A	Pass	
8.000 mA	24	8.0012	0.0012	±0.0028	mA	43	2.3E-07 A	Pass	
12.000 mA	24	12.0019	0.0019	±0.0032	mA	60	1.1E-06 A	Pass	
16.000 mA	24	16.0025	0.0025	±0.0036	mA	71	1.3E-06 A	Pass*	
20.000 mA	24	20.0032	0.0032	±0.0040	mA	81	1.5E-06 A	Pass*	
24.000 mA	24	24.0037	0.0037	±0.0044	mA	85	1.6E-06 A	Pass*	
<b>2W Resistance calibration (SOURCE)</b>									
350.0 Ω	400	349.99	-0.01	±0.10	Ω	6	1.0E-02 Ω	Pass	
1400 Ω	1500	1400.0	0.0	±0.7	Ω	4	6.3E-02 Ω	Pass	
3100 Ω	4000	3100.0	0.0	±1.0	Ω	5	9.7E-02 Ω	Pass	
<b>2W RTD calibration (SOURCE)</b>									





## Calibration Results As Found

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 25 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status
<b>PT100-385</b>								
-150.0 °C	800	-149.99	0.01	±0.15	°C	9	7.2E-02 °C	Pass
0.0 °C	800	0.01	0.01	±0.15	°C	3	7.2E-02 °C	Pass
200.0 °C	800	200.01	0.01	±0.25	°C	2	7.2E-02 °C	Pass
450.0 °C	800	450.00	0.00	±0.35	°C	0	8.0E-02 °C	Pass
630.0 °C	800	630.00	0.00	±0.45	°C	0	8.0E-02 °C	Pass
Pressure module input test								Pass
Loop power test								Pass

~ End of As Found data ~

Summary Report	Total	Pass	Pass*	FAIL*	FAIL	n/a
Number of Tests	73	64	8	0	1	0

## Calibration Results As Left

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 26 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status		
DUT Specification Source: 726_umeng0000.pdf - User's manual - September 2005										
Firmware version : 1.52.										
<b>DC Voltage calibration (MEASURE)</b>										
<b>lower display</b>										
90.0000	mV	90	89.999	-0.001	±0.019	mV	5	2.2E-06 V	Pass	
6.0000	V	20	6.000	0.000	±0.003	V	0	5.8E-04 V	Pass	
12.0000	V	20	12.000	0.000	±0.003	V	0	5.9E-04 V	Pass	
18.0000	V	20	18.000	0.000	±0.004	V	0	6.1E-04 V	Pass	
<b>upper display</b>										
9.0000	V	30	9.000	0.000	±0.003	V	0	5.9E-04 V	Pass	
18.0000	V	30	18.000	0.000	±0.004	V	0	6.1E-04 V	Pass	
27.0000	V	30	27.000	0.000	±0.005	V	0	6.4E-04 V	Pass	
<b>Frequency calibration (MEASURE)</b>										
50.00	Hz	2 Vpp	1000	50.0	0.0	±0.1	Hz	0	5.8E-02 Hz	Pass
1000.00	Hz	2 Vpp	1000	1000.0	0.0	±0.6	Hz	0	5.8E-02 Hz	Pass
10.000	kHz	2 Vpp	15	10.00	0.00	±0.02	kHz	0	5.8E+00 Hz	Pass
15.000	kHz	2 Vpp	15	15.00	0.00	±0.02	kHz	0	5.8E+00 Hz	Pass
<b>DC Current calibration (MEASURE)</b>										
<b>lower display</b>										
3.9998	mA	24	4.000	0.000	±0.002	mA	10	5.8E-07 A	Pass	
7.9996	mA	24	8.000	0.000	±0.003	mA	16	5.9E-07 A	Pass	
11.9992	mA	24	12.000	0.001	±0.003	mA	25	8.1E-07 A	Pass	
15.9990	mA	24	16.000	0.001	±0.004	mA	29	8.7E-07 A	Pass	
19.9988	mA	24	20.000	0.001	±0.004	mA	31	9.3E-07 A	Pass	
23.9986	mA	24	24.000	0.001	±0.004	mA	33	1.0E-06 A	Pass	
<b>upper display</b>										
3.9998	mA	24	4.000	0.000	±0.002	mA	10	5.8E-07 A	Pass	
7.9996	mA	24	8.000	0.000	±0.003	mA	16	5.9E-07 A	Pass	
11.9992	mA	24	12.000	0.001	±0.003	mA	25	8.1E-07 A	Pass	
15.9990	mA	24	16.000	0.001	±0.004	mA	29	8.7E-07 A	Pass	
19.9988	mA	24	20.000	0.001	±0.004	mA	31	9.3E-07 A	Pass	
23.9985	mA	24	24.000	0.002	±0.004	mA	33	1.0E-06 A	Pass	
<b>4W Resistance calibration (MEASURE)</b>										
<b>lower display</b>										
350.000	Ω	400	350.01	0.01	±0.10	Ω	10	1.1E-02 Ω	Pass	
3500.00	Ω	4000	3500.0	0.0	±1.0	Ω	0	1.1E-01 Ω	Pass	
<b>4W RTD calibration (MEASURE)</b>										
<b>PT100-385</b>										
-180.000	°C	800	-180.00	0.00	±0.15	°C	3	3.9E-02 °C	Pass	
0.000	°C	800	-0.01	-0.01	±0.15	°C	7	3.9E-02 °C	Pass	
200.000	°C	800	199.99	-0.01	±0.25	°C	4	7.0E-02 °C	Pass	
450.000	°C	800	450.00	0.00	±0.35	°C	0	9.3E-02 °C	Pass	
630.000	°C	800	630.00	0.00	±0.45	°C	1	9.3E-02 °C	Pass	
<b>3W RTD calibration (MEASURE)</b>										

## Calibration Results As Left

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 26 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status
<b>PT100-385</b>								
-180.000 °C	800	-179.99	0.01	±0.27	°C	3	3.9E-02 °C	Pass
0.000 °C	800	0.01	0.01	±0.28	°C	4	3.9E-02 °C	Pass
200.000 °C	800	200.02	0.02	±0.39	°C	4	7.0E-02 °C	Pass
450.000 °C	800	450.01	0.01	±0.50	°C	3	9.3E-02 °C	Pass
630.000 °C	800	630.02	0.02	±0.61	°C	3	9.3E-02 °C	Pass
<b>Temperature calibration (MEASURE)</b>								
<b>type J (CJC On / ITS 90)</b>								
-180.00 °C	1200	-180.0	0.0	±0.6	°C	0	4.2E-01 °C	Pass
0.00 °C	1200	0.0	0.0	±0.4	°C	0	2.2E-01 °C	Pass
1200.00 °C	1200	1200.0	0.0	±0.5	°C	0	3.6E-01 °C	Pass
<b>type K (CJC On / ITS 90)</b>								
-180.00 °C	1372	-180.0	-0.1	±0.8	°C	6	5.2E-01 °C	Pass
0.00 °C	1372	-0.1	-0.1	±0.5	°C	20	2.5E-01 °C	Pass
950.00 °C	1372	950.0	0.0	±0.5	°C	0	4.1E-01 °C	Pass
1300.00 °C	1372	1300.0	0.0	±0.7	°C	0	6.2E-01 °C	Pass
<b>Temperature calibration (SOURCE)</b>								
<b>type J (CJC On / ITS 90)</b>								
-180.00 °C	1200	-179.8	0.2	±0.6	°C	29	4.2E-01 °C	Pass*
0.00 °C	1200	0.1	0.1	±0.4	°C	13	2.2E-01 °C	Pass
1200.00 °C	1200	1200.0	0.0	±0.5	°C	3	3.6E-01 °C	Pass
<b>type K (CJC On / ITS 90)</b>								
-180.00 °C	1372	-179.7	0.3	±0.8	°C	34	5.1E-01 °C	Pass*
0.00 °C	1372	0.1	0.1	±0.5	°C	22	2.5E-01 °C	Pass
950.00 °C	1372	950.1	0.1	±0.5	°C	24	4.0E-01 °C	Pass
1300.00 °C	1372	1300.2	0.2	±0.7	°C	23	6.2E-01 °C	Pass*
<b>DC Voltage calibration (SOURCE)</b>								
50.00 mV	100	50.002	0.002	±0.015	mV	15	8.8E-07 V	Pass
100.00 mV	100	100.005	0.005	±0.020	mV	27	1.2E-06 V	Pass
10.000 V	20	10.0000	0.0000	±0.0030	V	2	9.0E-05 V	Pass
20.000 V	20	20.0001	0.0001	±0.0040	V	2	2.7E-04 V	Pass
<b>Frequency calibration (SOURCE)</b>								
50.0 Hz 2.5 V	1000	50.00	0.00	±0.03	Hz	4	5.9E-03 Hz	Pass
1000.0 Hz 2.5 V	1000	999.98	-0.02	±0.50	Hz	4	2.5E-02 Hz	Pass
10.000 kHz 2.5 V	10	9.9998	-0.0002	±0.0250	kHz	1	2.5E-01 Hz	Pass
15.000 kHz 2.5 V	15	15.0373	0.0373	±0.0750	kHz	50	3.4E-01 Hz	Pass
<b>DC Current calibration (SOURCE)</b>								
4.000 mA	24	3.9999	-0.0001	±0.0024	mA	3	1.6E-07 A	Pass
8.000 mA	24	7.9997	-0.0003	±0.0028	mA	10	2.4E-07 A	Pass
12.000 mA	24	11.9997	-0.0003	±0.0032	mA	9	1.1E-06 A	Pass
16.000 mA	24	15.9997	-0.0003	±0.0036	mA	9	1.3E-06 A	Pass
20.000 mA	24	19.9999	-0.0001	±0.0040	mA	4	1.5E-06 A	Pass
24.000 mA	24	23.9997	-0.0003	±0.0044	mA	7	1.6E-06 A	Pass
<b>2W Resistance calibration (SOURCE)</b>								
350.0 Ω	400	349.99	-0.01	±0.10	Ω	5	1.0E-02 Ω	Pass
1400 Ω	1500	1400.0	0.0	±0.7	Ω	3	6.3E-02 Ω	Pass
3100 Ω	4000	3100.1	0.1	±1.0	Ω	5	9.6E-02 Ω	Pass
<b>2W RTD calibration (SOURCE)</b>								



## Calibration Results As Left

Certificate Number: SA01200805

Date of Calibration: 26 Sep 2023

Nominal value	Range	Measurement Result	Measurement Error	Permissible Error	Unit	% of Tol	Expanded Uncertainty	Status
<b>PT100-385</b>								
-150.0 °C	800	-149.99	0.01	±0.15	°C	9	7.2E-02 °C	Pass
0.0 °C	800	0.00	0.00	±0.15	°C	3	7.2E-02 °C	Pass
200.0 °C	800	200.00	0.00	±0.25	°C	2	7.2E-02 °C	Pass
450.0 °C	800	450.00	0.00	±0.35	°C	1	8.0E-02 °C	Pass
630.0 °C	800	630.00	0.00	±0.45	°C	1	8.0E-02 °C	Pass
Pressure module input test								Pass
Loop power test								Pass

~ End of As Left data ~

Summary Report	Total	Pass	Pass*	FAIL*	FAIL	n/a
Number of Tests	73	70	3	0	0	0

## Controle Graphtec datalogger



Ref TP  
 Datum 28-09-23  
 Stamkaart ID 2422  
 Serienummer H40623725

### Gebruikte apparatuur:

Fluke precision calibrator ID 3203 Kalibratie geldig tot 26-09-2024  
 Multimeter Fluke 8842A ID163 Kalibratie geldig tot 14-04-2024

### Meetmethode:

Datalogger wordt gecontroleerd op DC op alle ingangen en 1 kanaal op thermokoppel type K en T.  
 Dit ter controle van de koude las.

Voor DC controle:

Spanning aanbieden met Fluke precision calibrator ID 3203 op multimeter Fluke ID163 en datalogger.

Datalogger steeds op juiste range instellen volgens tabel en filter zo instellen dat er een stabiele waarde wordt verkregen.

Voor thermokoppel controle:

Gesimuleerde temperatuur aanbieden met Fluke precision calibrator ID 3203

Waardes aflezen van Fluke multimeter ID163 en Datalogger en invullen in tabel

### DC controle

Input [mV]	Range [mV]	Rating (+/-0,1% of FS)*		1 [mV]	2 [mV]	3 [mV]	4 [mV]	5 [mV]	6 [mV]	7 [mV]	8 [mV]	9 [mV]	10 [mV]	
19,997	20	19,977	20,017	20,013	20,013	20,013	20,012	20,013	20,013	20,013	20,013	20,012	20,013	Voldoet
49,995	50	49,945	50,045	50,02	50,02	50,02	50,02	50,02	50,02	50,02	50,03	50,02	50,02	Voldoet
99,992	100	99,892	100,092	100,05	100,05	100,06	100,05	100,05	100,05	100,06	100,05	100,05	100,05	Voldoet
199,921	200	199,72	200,12	199,93	199,94	199,93	199,93	199,93	199,93	199,94	199,93	199,93	199,93	Voldoet
500,11	500	499,6	500,6	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	Voldoet

Input [V]	Range [V]	Rating (+/-0,1% of FS)*		1 [V]	2 [V]	3 [V]	4 [V]	5 [V]	6 [V]	7 [V]	8 [V]	9 [V]	10 [V]	
0,99987	1	0,9989	1,0009	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	Voldoet
1,9999	2	1,9979	2,0019	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	2,0016	Voldoet
4,9997	5	4,995	5,005	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	5,003	Voldoet
9,9996	10	9,990	10,010	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	10,008	Voldoet
19,9997	20	19,980	20,020	20,004	20,004	20,003	20,004	20,004	20,004	20,004	20,003	20,004	20,004	Voldoet

### Type T:

Input [°C]	Rating (+/-0,1% of rdg+0,5)*		1 [°C]	
10,0	9,49	10,51	9,7	Voldoet
25,0	24,48	25,53	24,8	Voldoet
50,0	49,45	50,55	49,8	Voldoet

### Type K:

Input [°C]	Rating (+/-0,05% of rdg+1,0)*		1 [°C]	
100,0	98,95	101,05	99,8	Voldoet
400,0	398,80	401,20	399,6	Voldoet
800,0	798,60	801,40	800,0	Voldoet

\*specs fabrikant zie user manual.

Datalogger **voldoet**

Paraaf: TP

Data K:\APPLABI\Calibraties\DATA ( filenaam = ID nr ) 2023\2422.ods

## 15 Bijlage F: Volgorde van testen bij Peutz

20-11-2023

1. ICR 5 Hoog
2. ICR 1 Stappen
3. INR 1 Hoog
4. INR 4 Stappen
5. IFR 1 Hoog
6. IFR 3 Stappen
7. ICR 8 Hoog
8. ICR 3 Stappen
9. INR 2 Hoog
10. INR 6 stappen

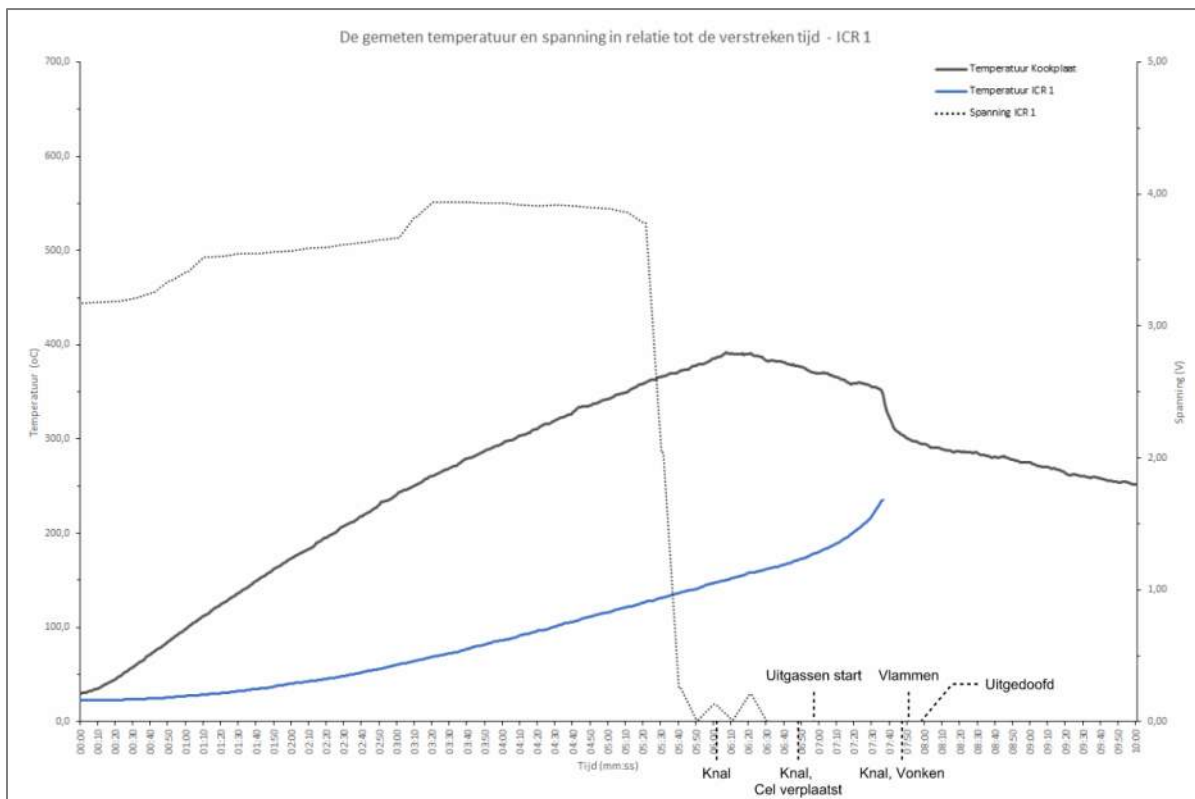
24-11-2023

1. IFR 6 Stappen
2. IFR 5 Hoog
3. ICR 4 Stappen
4. ICR 9 Hoog
5. INR 3 Hoog
6. INR 7 Stappen
7. IFR 4 Hoog
8. IFR 7 Hoog
9. ICR 6 Hoog
10. ICR 2 Stappen



# 16 Bijlage G: Resultaten per cel

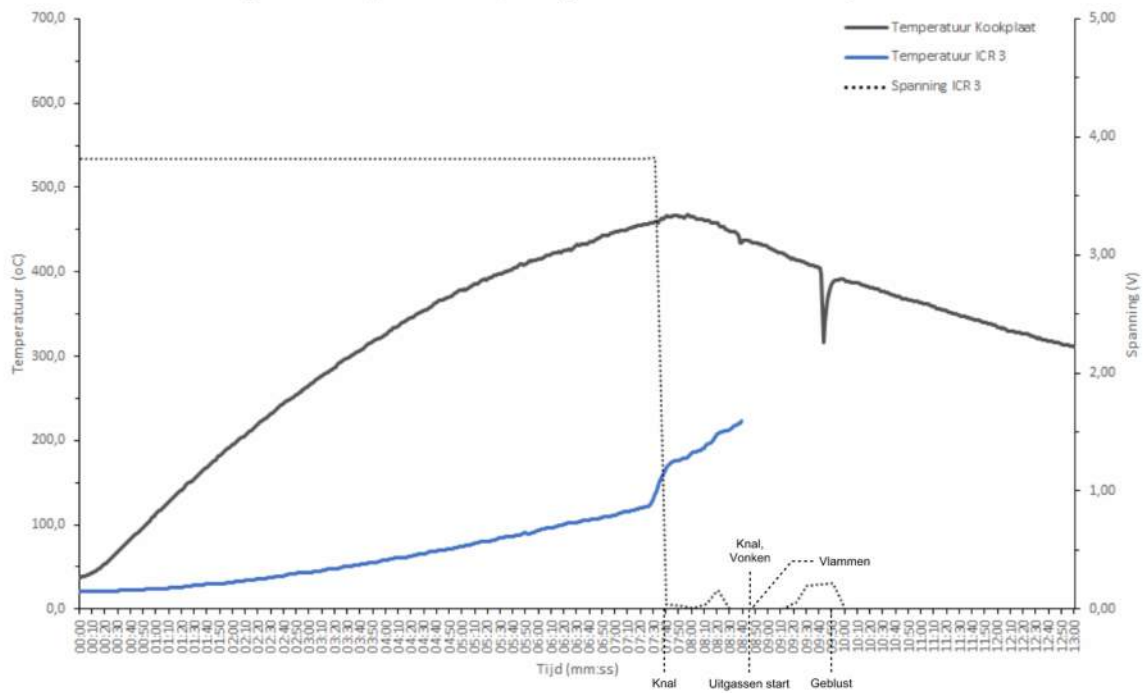
## Experiment 1: Thermische oorzaak, Opwarmen in stappen



Extra waarneming:

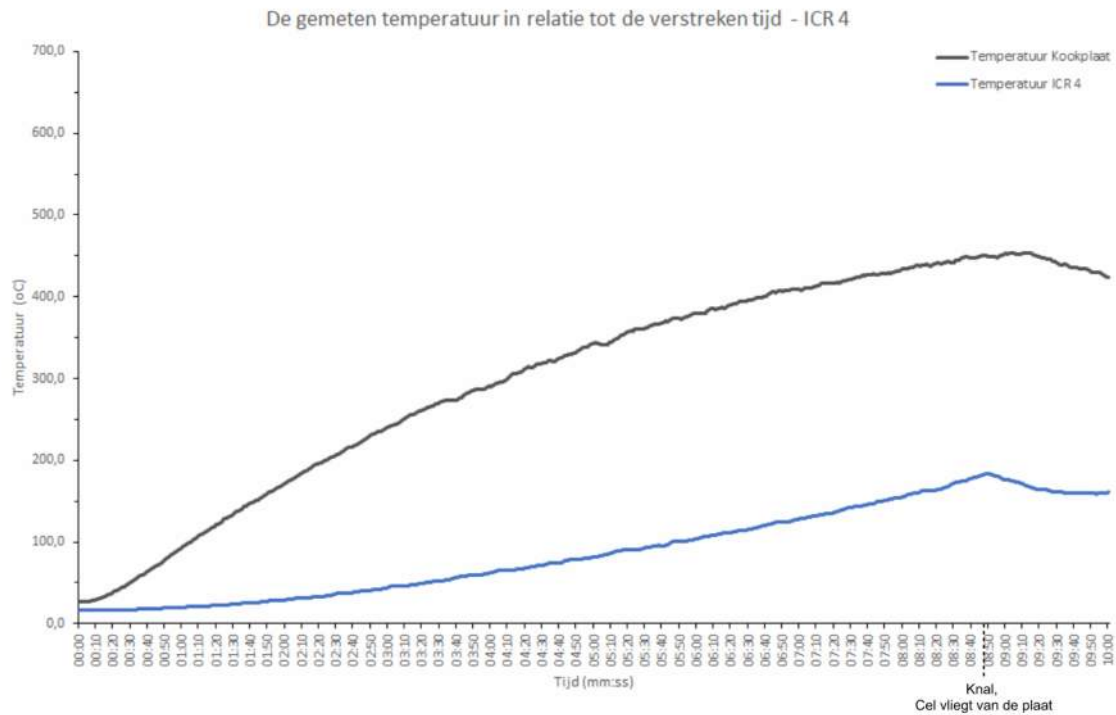
- Thermokoppel is van de cel
- Thermokoppel zit nog op de kookplaat

De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd - ICR 3



Extra waarneming:

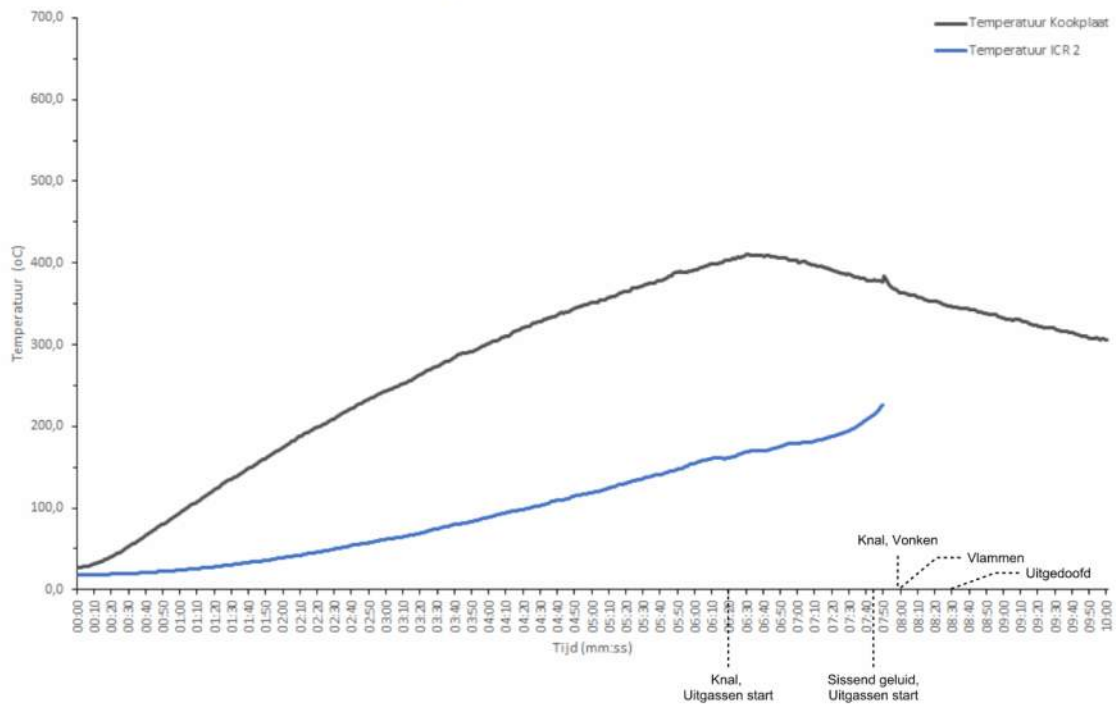
- Thermokoppel is van de cel
- Knop van de kookplaat geblust
- Draad van de multimeter gesmolten



Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

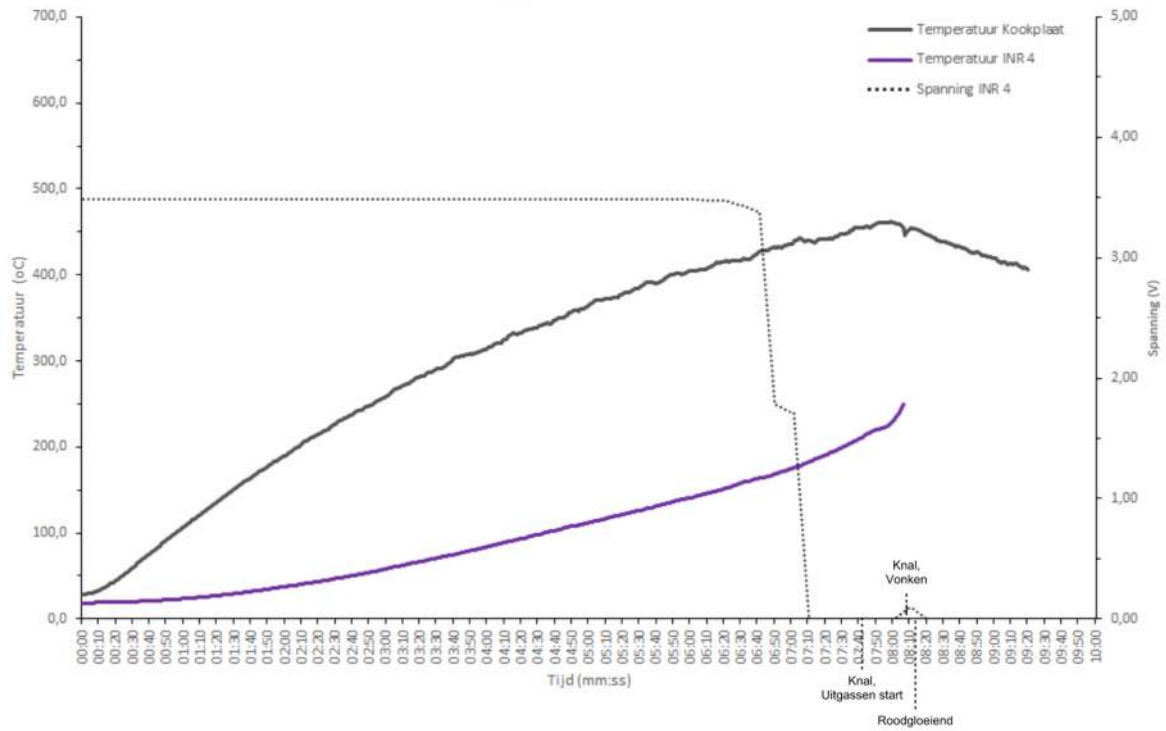
De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - ICR 2



Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd - INR 4

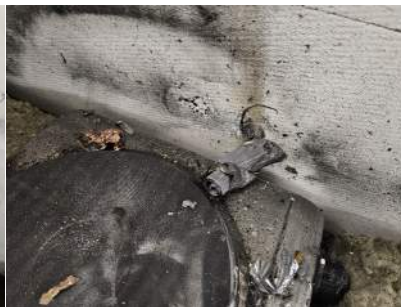
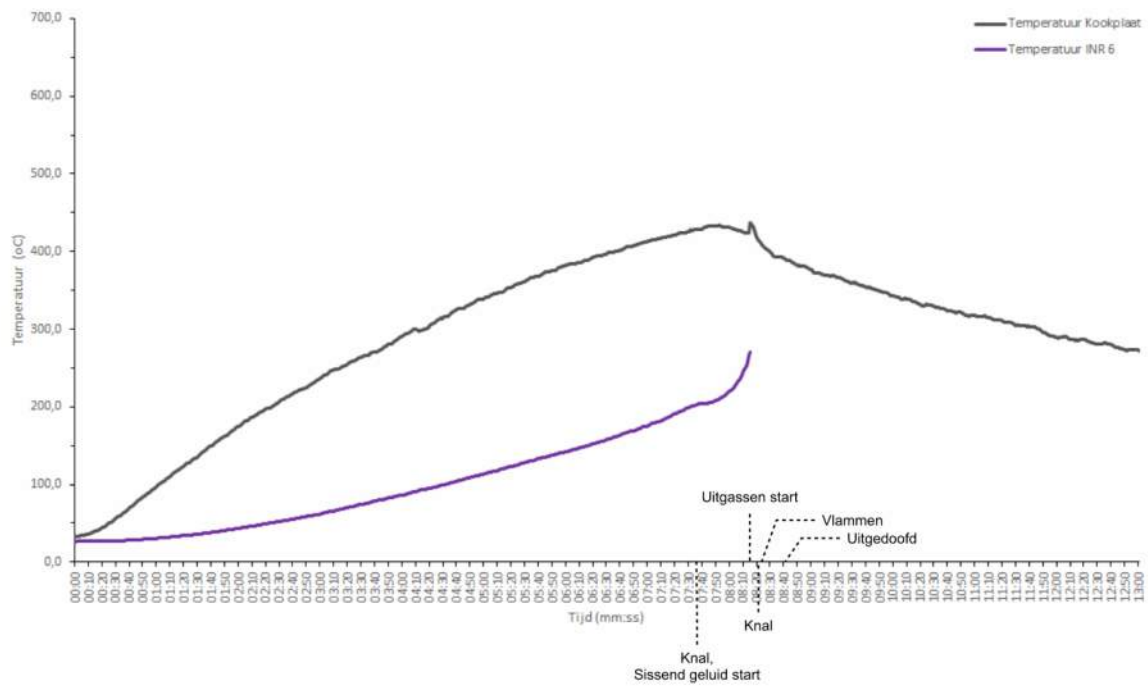


Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel



De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - INR 6

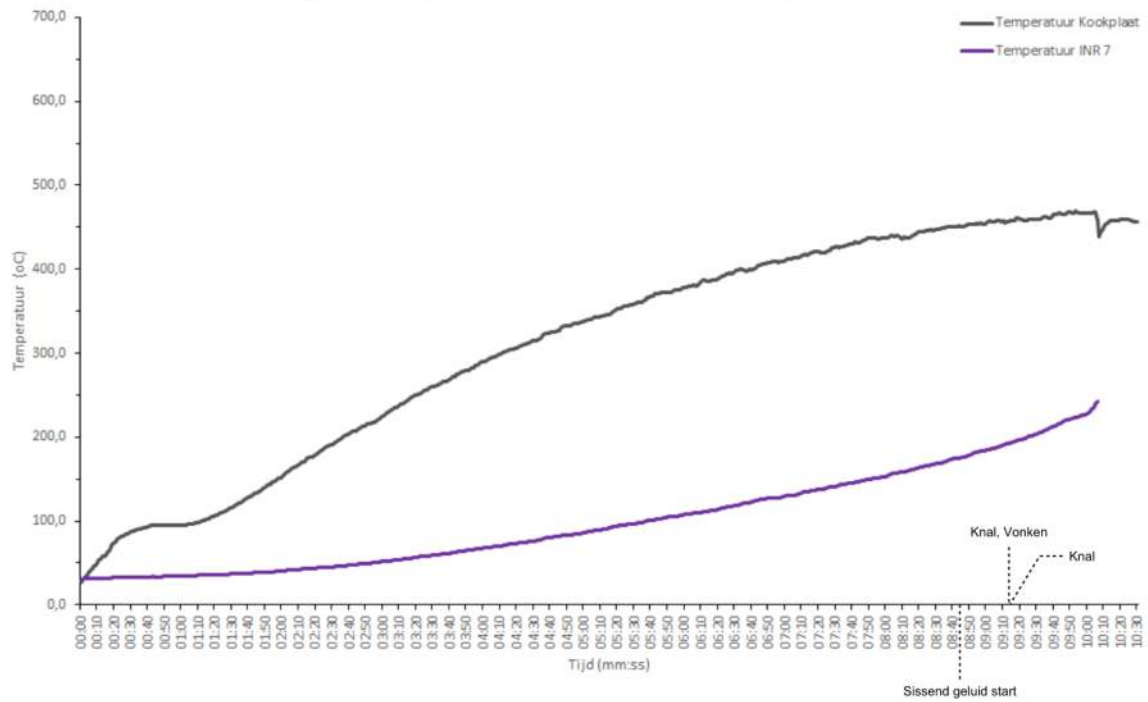


Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel



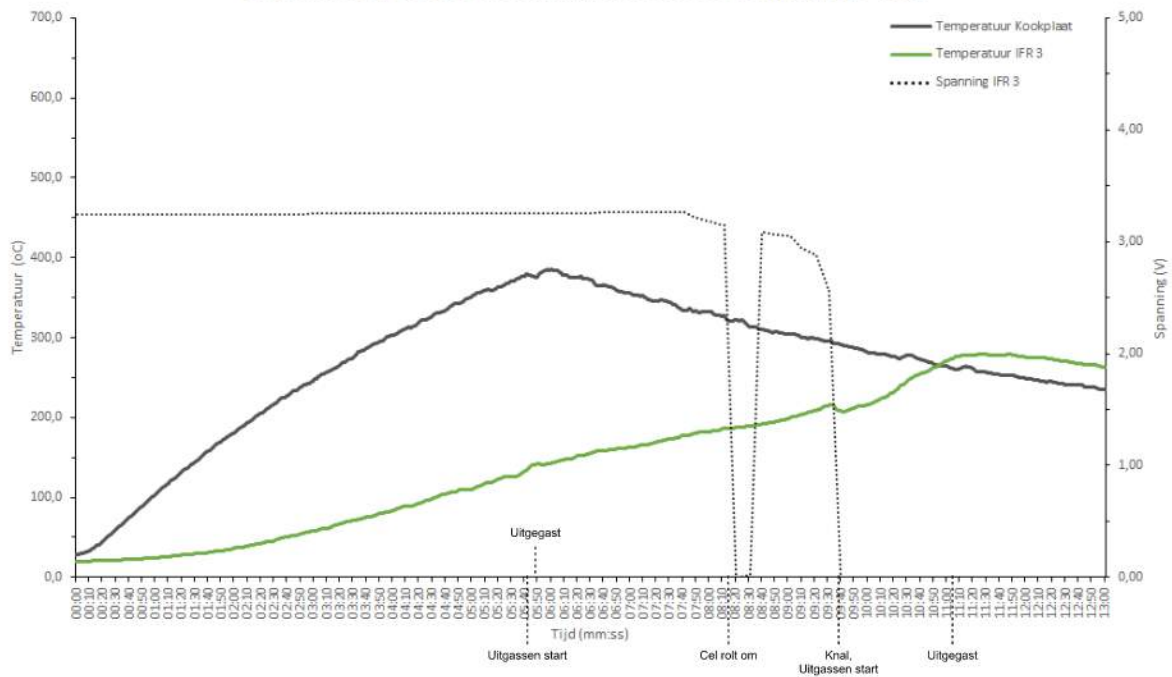
De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - INR 7



Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel

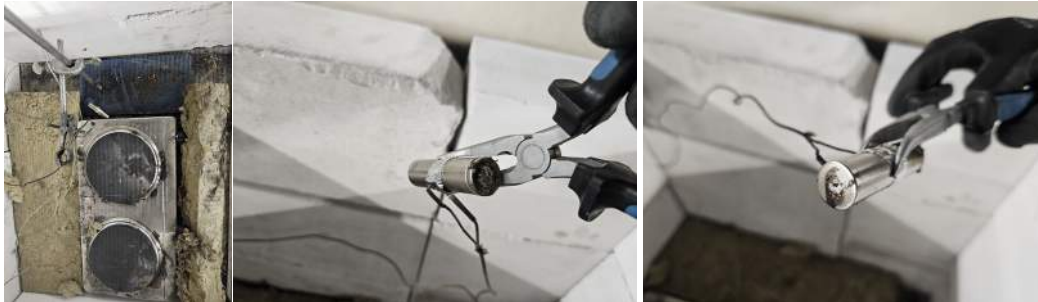
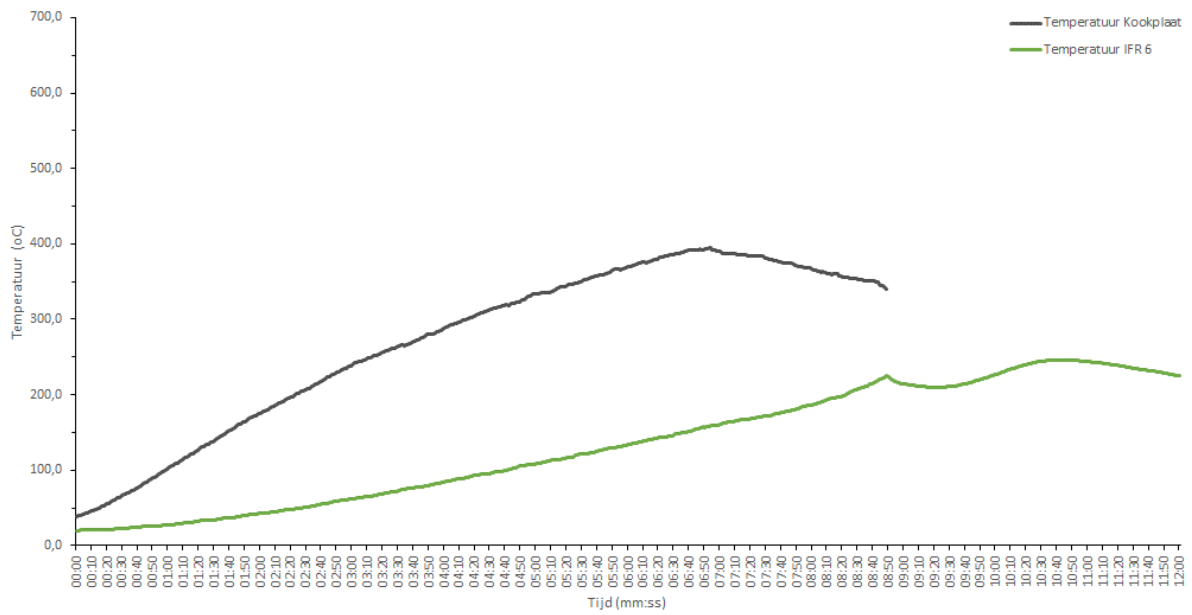
De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd - IFR 3



Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

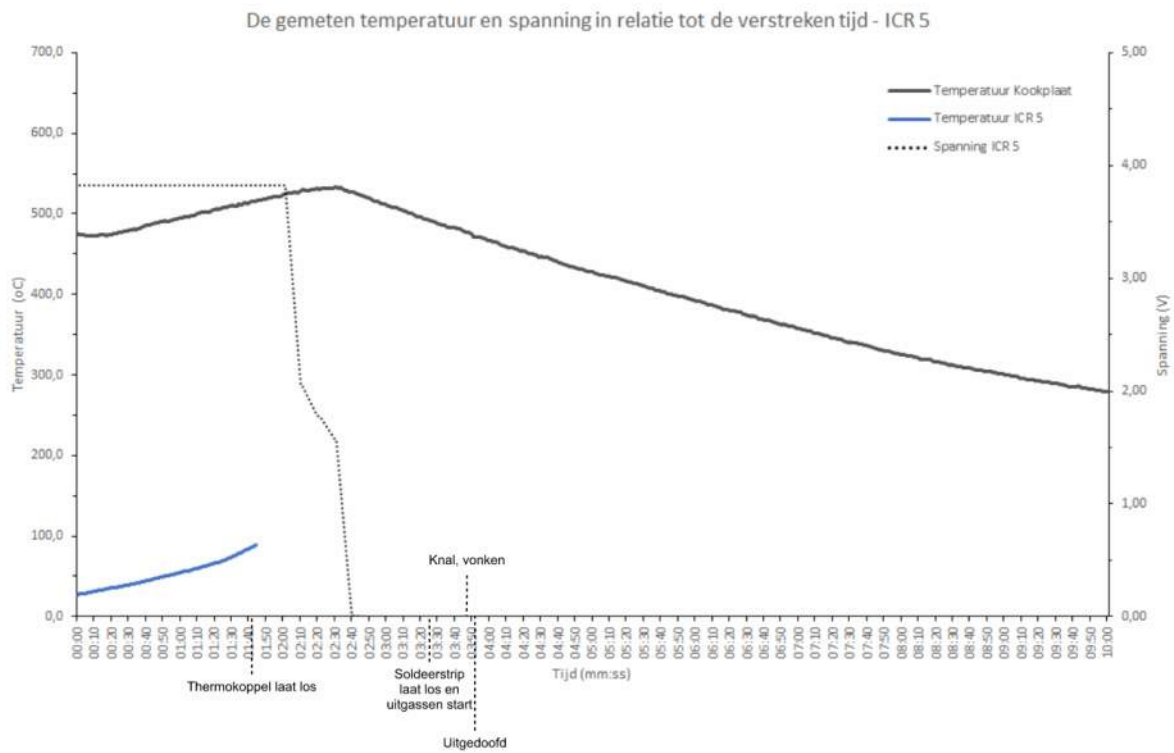
De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - IFR 6



Extra waarneming:

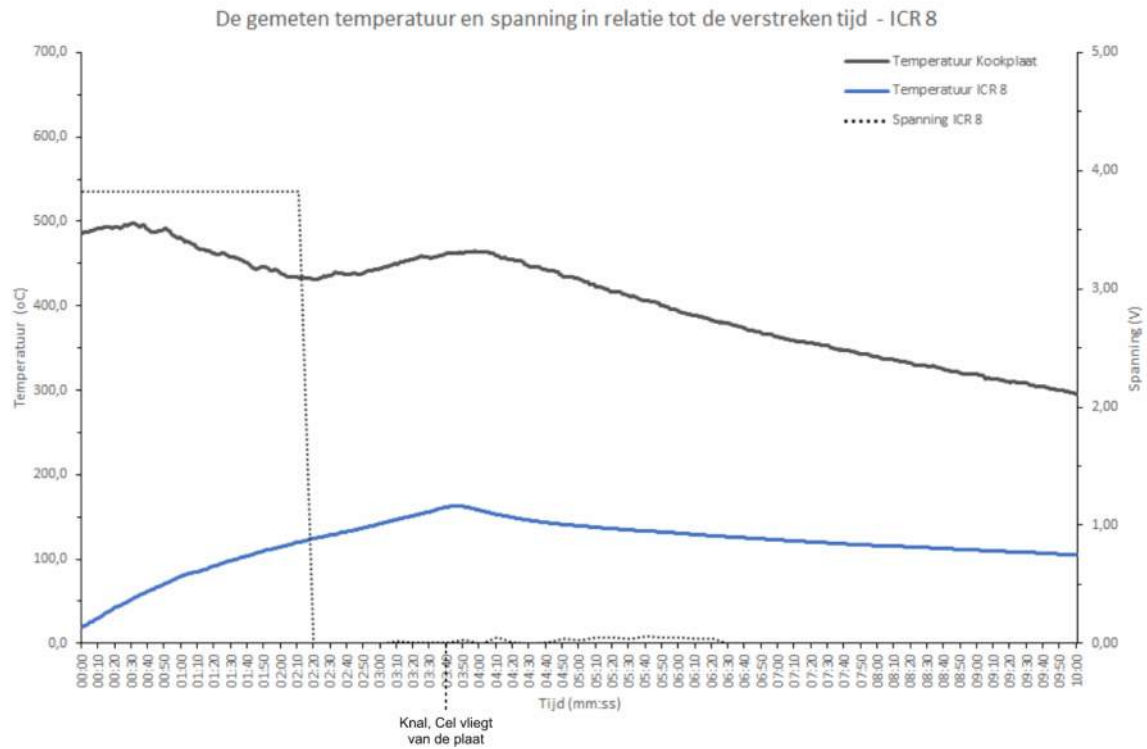
- Thermokoppel zit nog aan de cel
- Thermokoppel is van de kookplaat
- Het lampje van de kookplaat is niet zichtbaar op de beelden

## Experiment 2: Thermische oorzaak, opwarmen bij hoge temperatuur



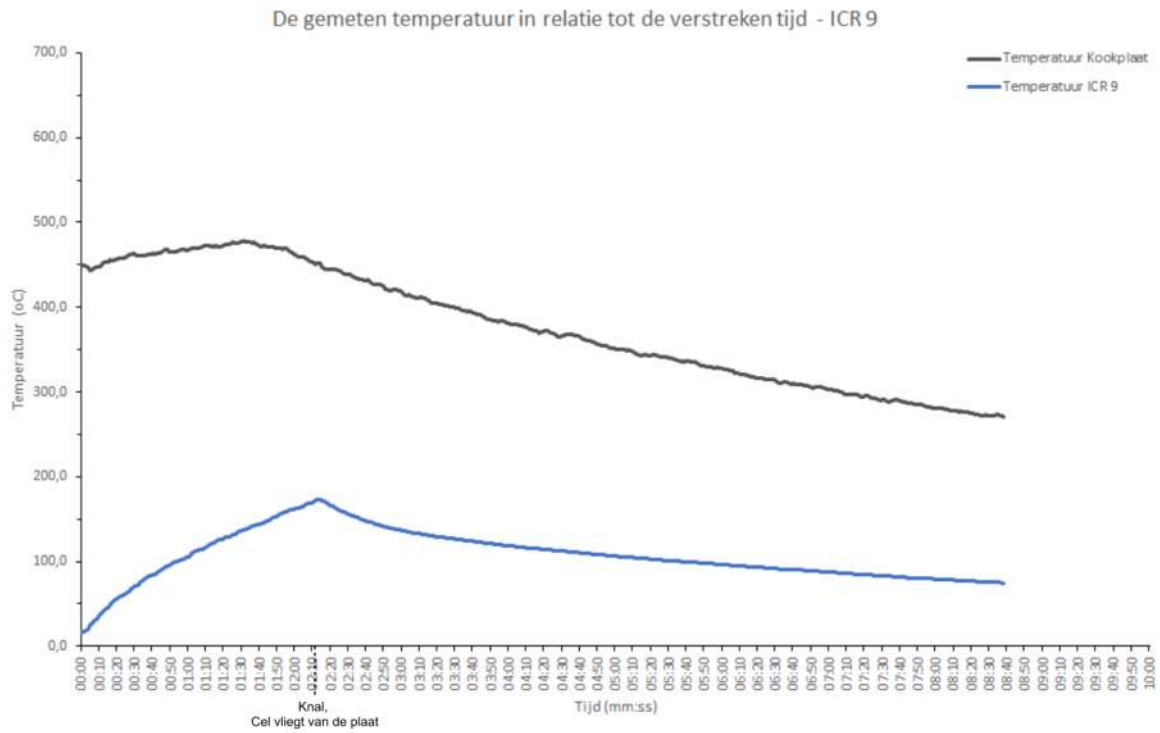
Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel



Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

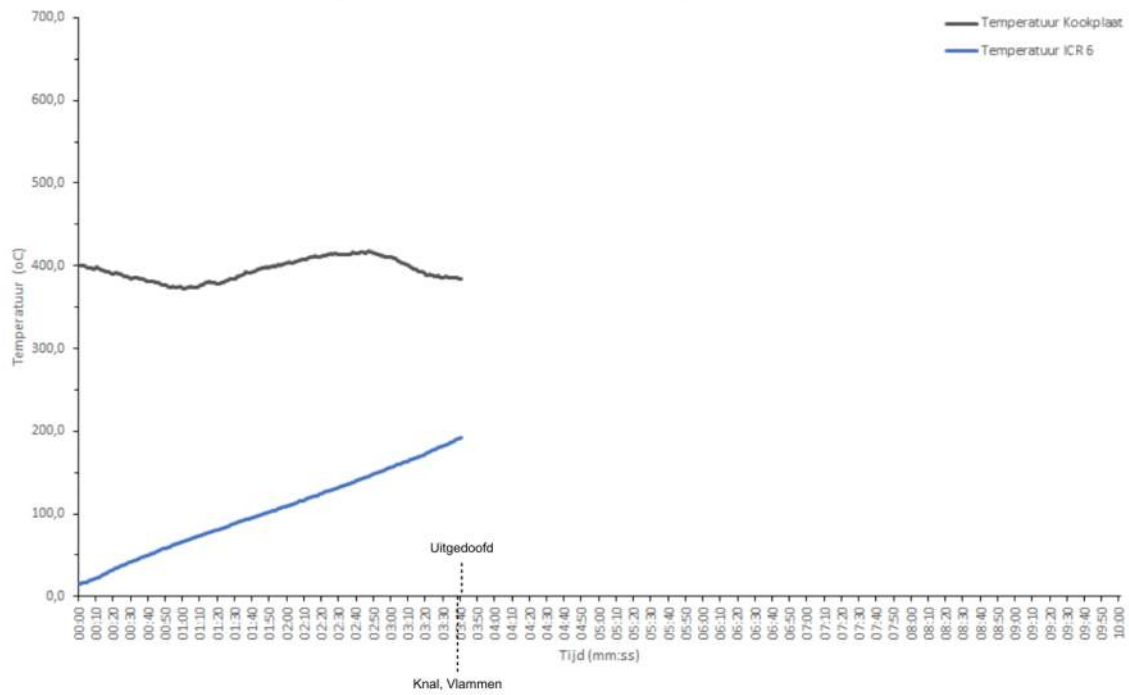


Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

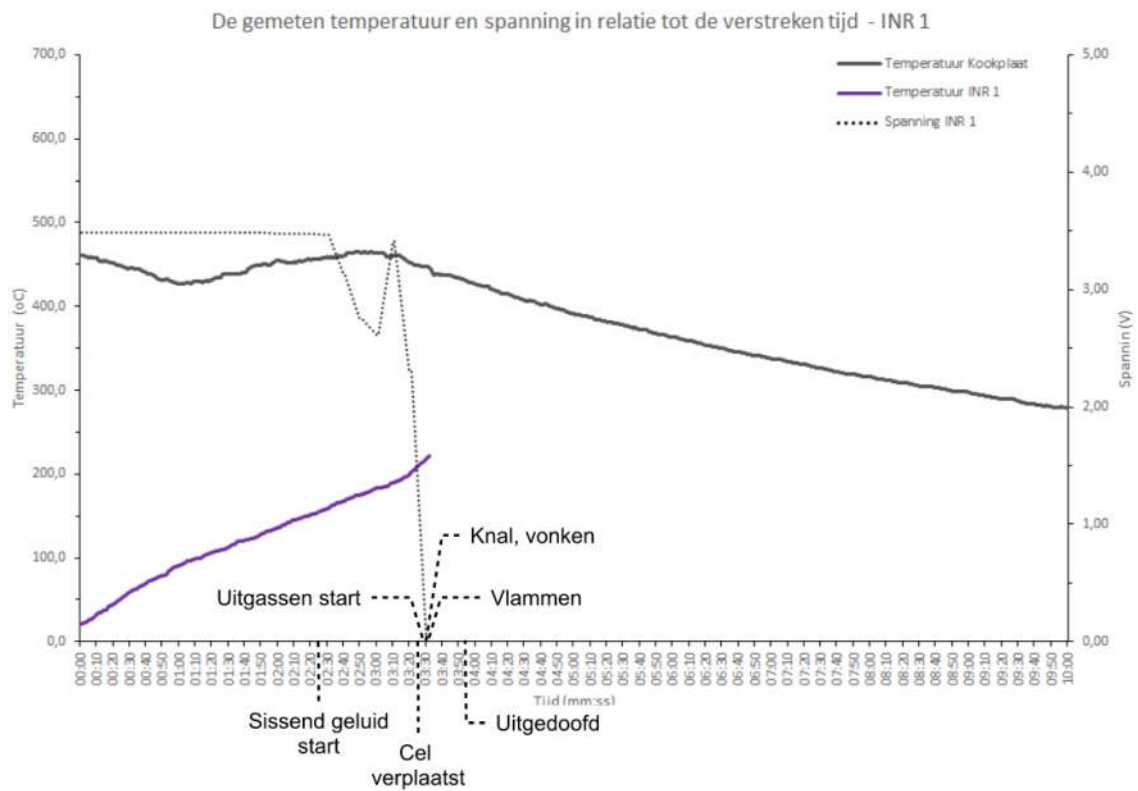


De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - ICR 6



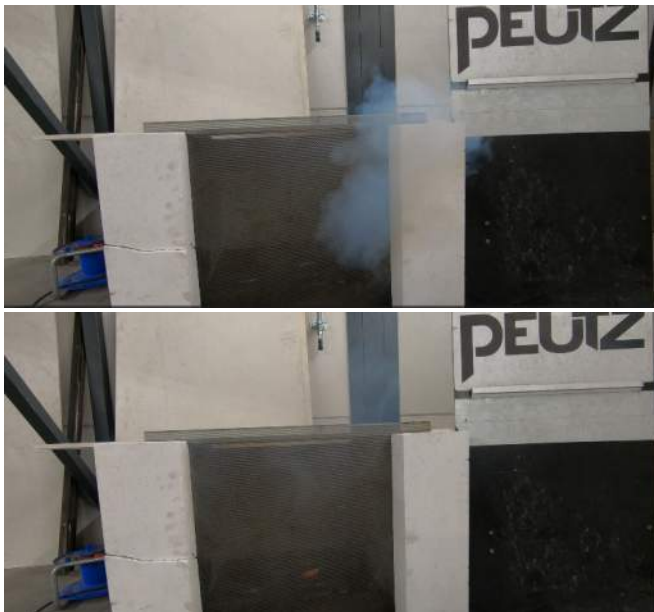
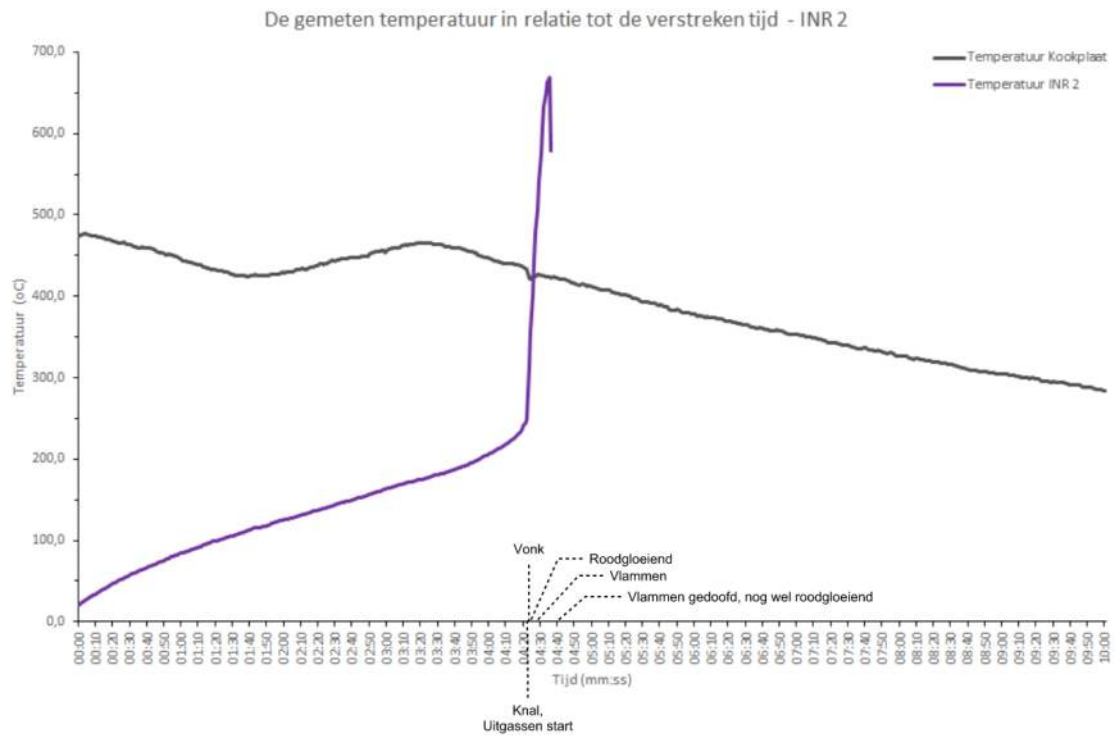
Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel
- Thermokoppel is van de kookplaat



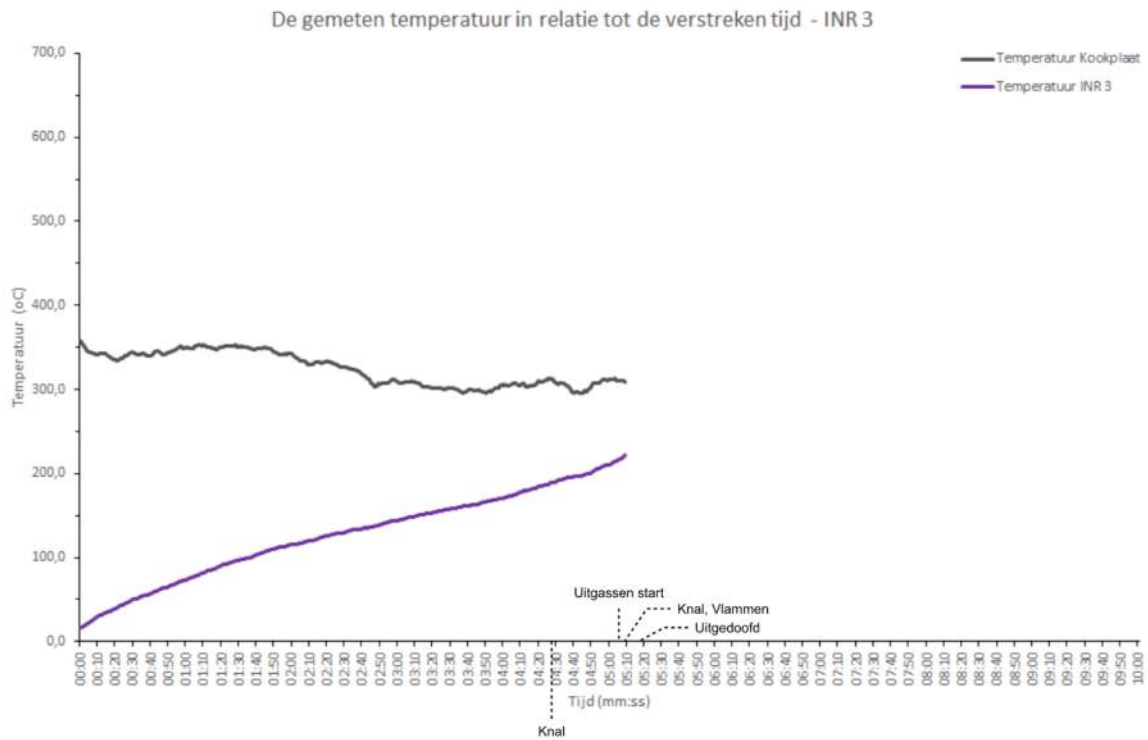
Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel
- GoPro aan na de start van het experiment
- Stuk van de cel weggeschoten door het gas



Extra waarneming:

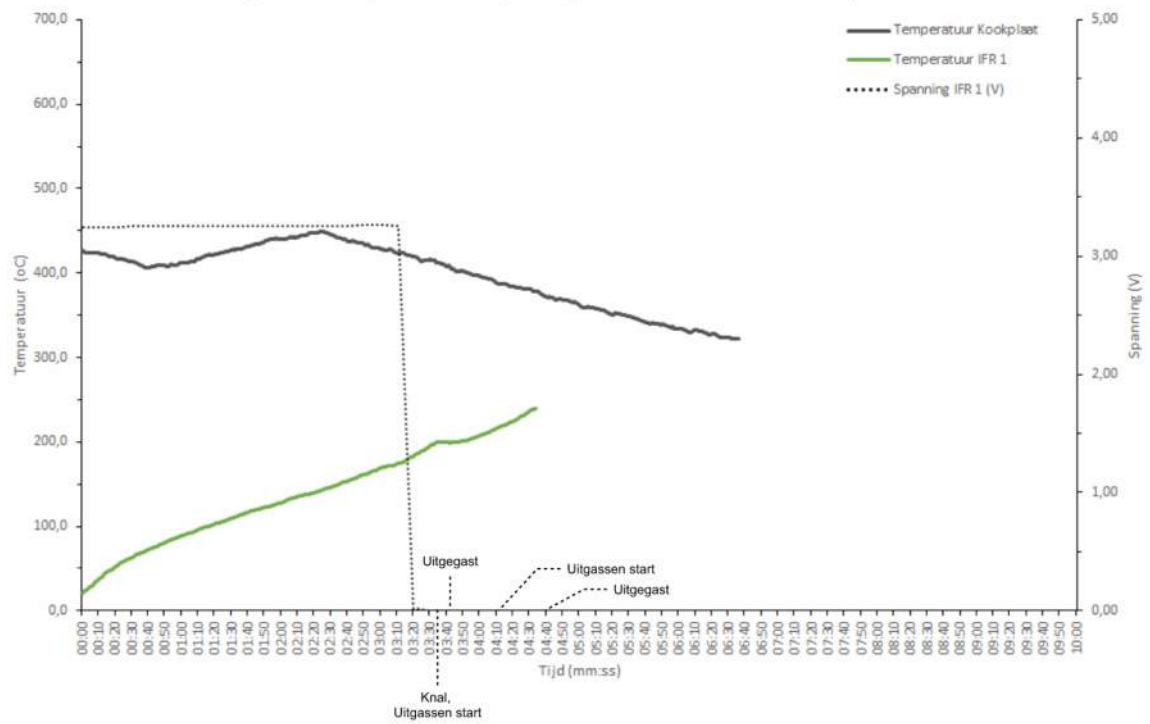
- Thermokoppel stuk (Datalogger gaat aan: Burnout)



Extra waarneming:

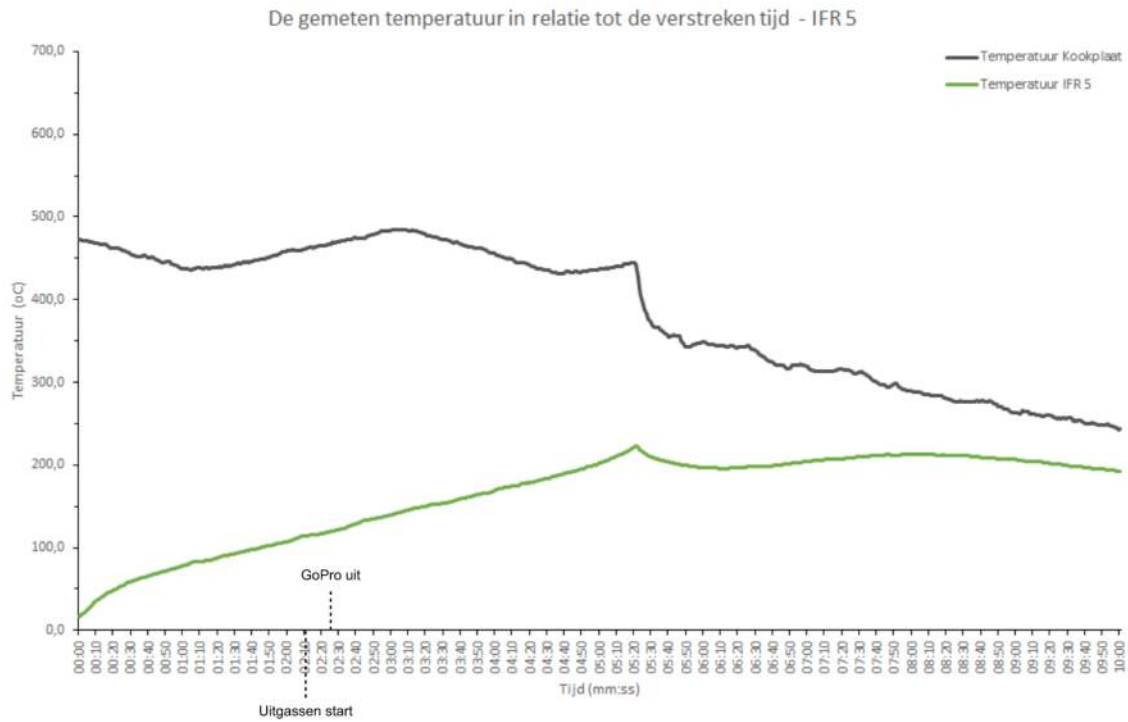
- Thermokoppel is van de cel
- Thermokoppel is van de kookplaat

De gemeten temperatuur en spanning in relatie tot de verstreken tijd - IFR 1



Extra waarneming:

- Thermokoppel is van de cel
- Thermokoppel is van de kookplaat

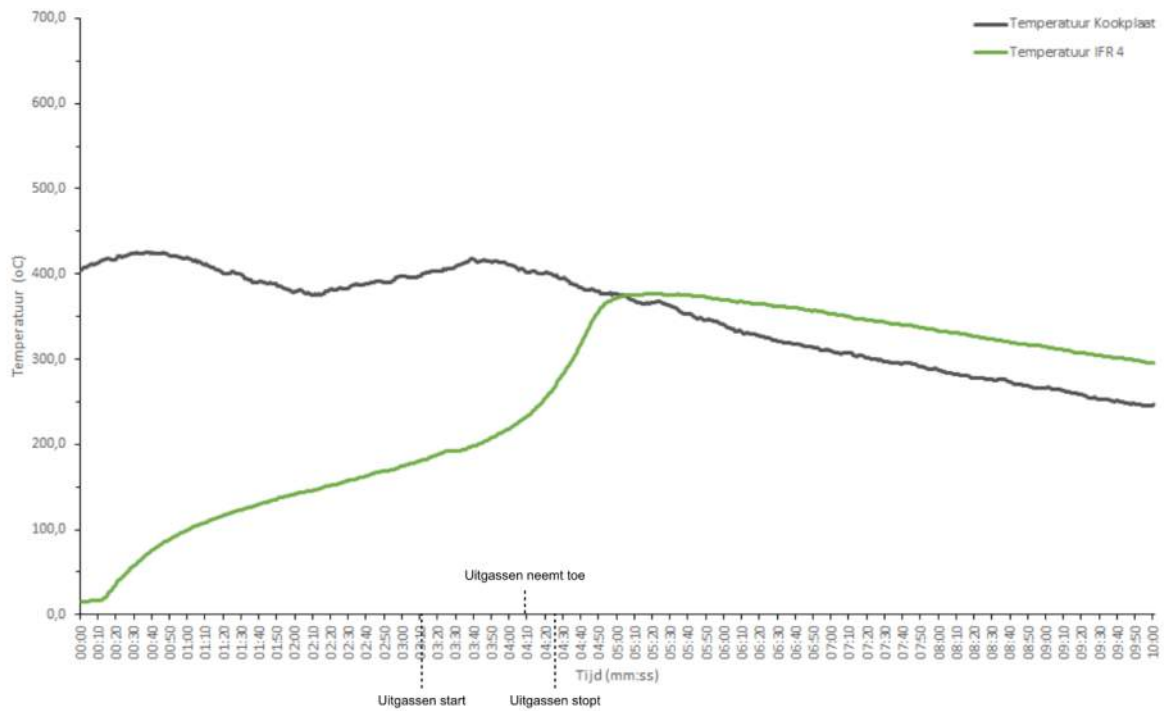


Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel
- GoPro is uitgevallen

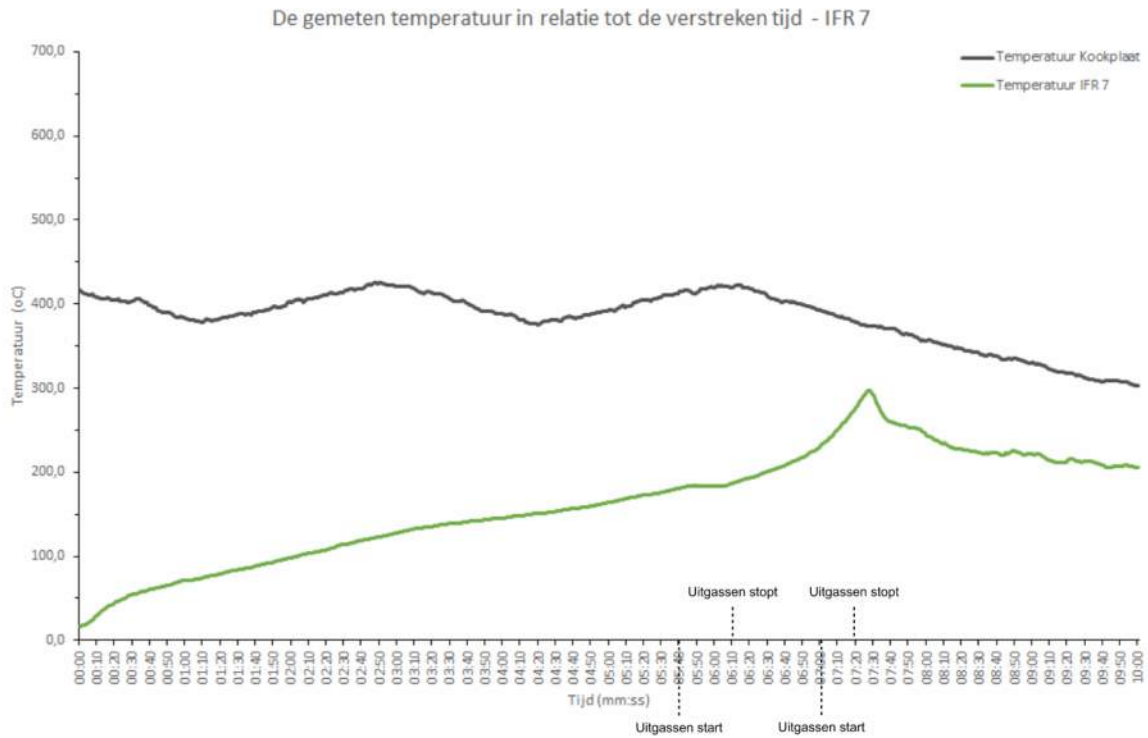


De gemeten temperatuur in relatie tot de verstreken tijd - IFR 4



Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

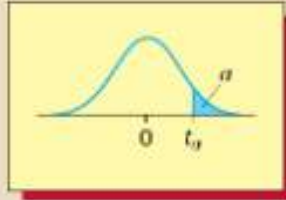


Extra waarneming:

- Thermokoppel zit nog aan de cel

## 17 Bijlage H: Bepaling $t_{\alpha/2}$

TABLE A.4 A  $t$  Table: Values of  $t_{\alpha}$  for  $df = 1$  through 48

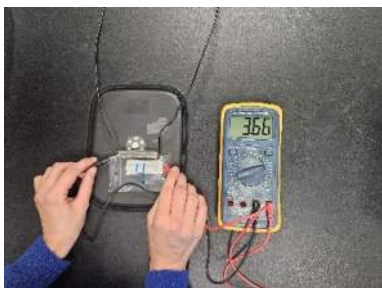
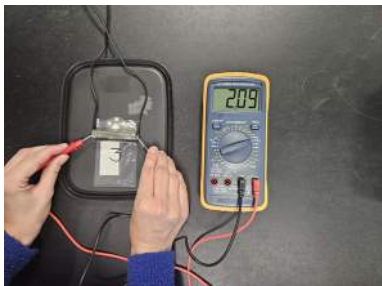
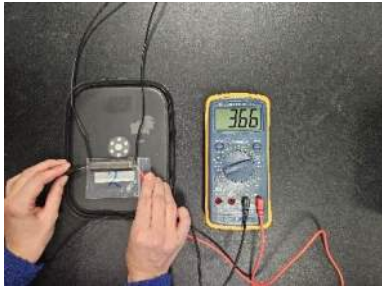
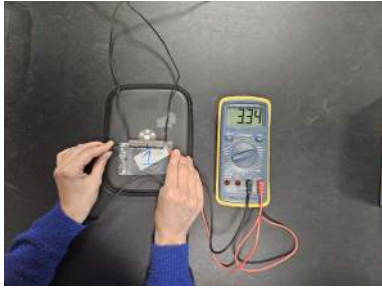


$df$	$t_{100}$	$t_{05}$	$t_{025}$	$t_{01}$	$t_{005}$	$t_{001}$	$t_{0005}$
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587

(Bowerman & O'Connell, 2018)

# 18 Bijlage I: Resultaten voorbereidende experimenten

ICR18650	Begin spanning (V)
1	3.34
2	3.66
3	2.09
4	3.66



## 19 Bijlage J: Waarnemingen cellen voorbereiden

Afgelezen spanning vóór solderen:

Lithium-ion cel	Spanning (V)	Lithium-ion cel	Spanning (V)	Lithium-ion cel	Spanning (V)
ICR18650 1	3.78	INR18650 1	3.49	IFR18650 1	3.25
ICR18650 2	4.19	INR18650 2	3.49	IFR18650 2	3.24
ICR18650 3	3.81	INR18650 3	3.48	IFR18650 3	3.25
ICR18650 4	3.83	INR18650 4	3.49	IFR18650 4	3.25
ICR18650 5	3.82	INR18650 5	3.49	IFR18650 5	3.25
ICR18650 6	4.18	INR18650 6	3.49	IFR18650 6	3.25
ICR18650 7	4.20	INR18650 7	3.49	IFR18650 7	3.25
ICR18650 8	3.82	INR18650 8	3.49	IFR18650 8	3.25
ICR18650 9	3.83	INR18650 9	3.50	IFR18650 9	3.25
ICR18650 10	4.19	INR18650 10	3.49	IFR18650 10	3.25

Extra informatie op de batterij (onder plastic omhulsel)

Lithium-ion cel						
INR18650 1	J35E	LALA3	EAQ2	D1	B01	W21
INR18650 2	J35E	LA0A1	EAY3	F5	B01	W26
INR18650 3	J35E	LA0A1	EAY1	EA	BO7	W25
INR18650 4	J35E	LSMA1	EAU6	F8	B04	W21
INR18650 5	J35E	LAMA1	EAS9	A3	B06	W24
INR18650 6	J35E	LAMA1	EASA	A3	B06	W16
INR18650 7	J35E	LA0A1	EM19	C1	B01	W25
INR18650 8	J35E	LA0B1	EAS8	A3	B02	W26
INR18650 9	J35E	LAIB1	EAN9	A3	B08	W23
INR18650 10	J35E	LA0A1	EAY1	EA	B02	W21

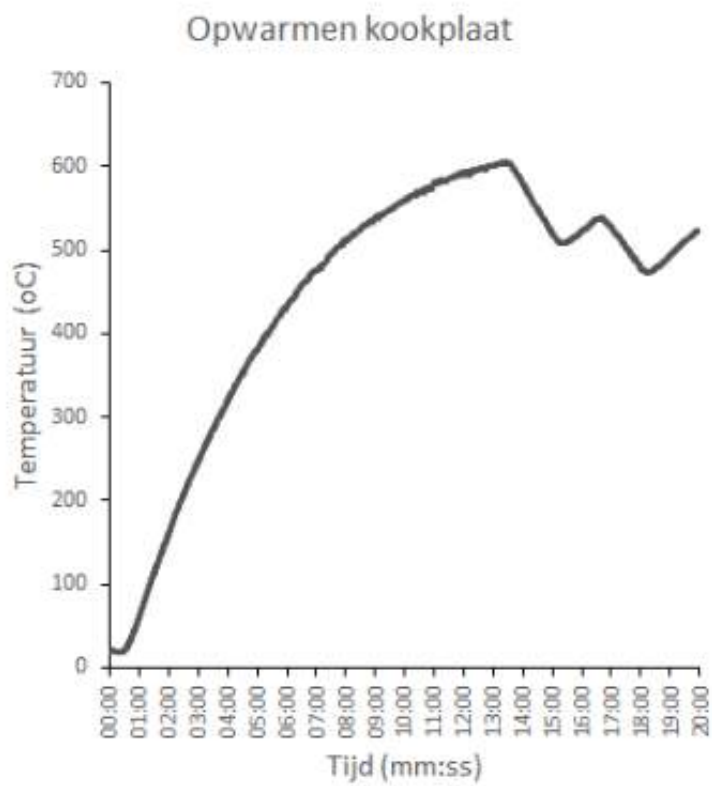
Lithium-ion cel	
IFR18650 1	U5X9150o
IFR18650 2	U5X9150o
IFR18650 3	U5X9150o
IFR18650 4	U5X9150o
IFR18650 5	U5X9150o
IFR18650 6	U5X9150o
IFR18650 7	U5X9150o
IFR18650 8	U5X9150o
IFR18650 9	U5X9150o
IFR18650 10	U5X9150o

Afgelezen spanning ná het solderen:

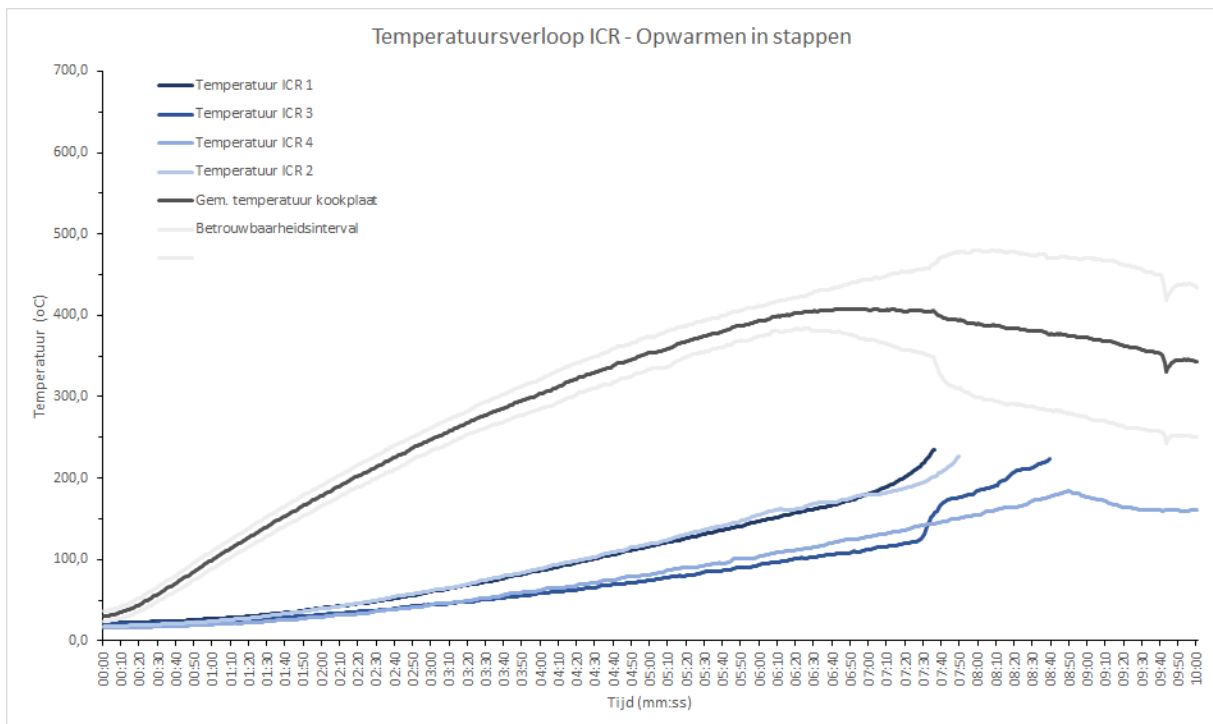
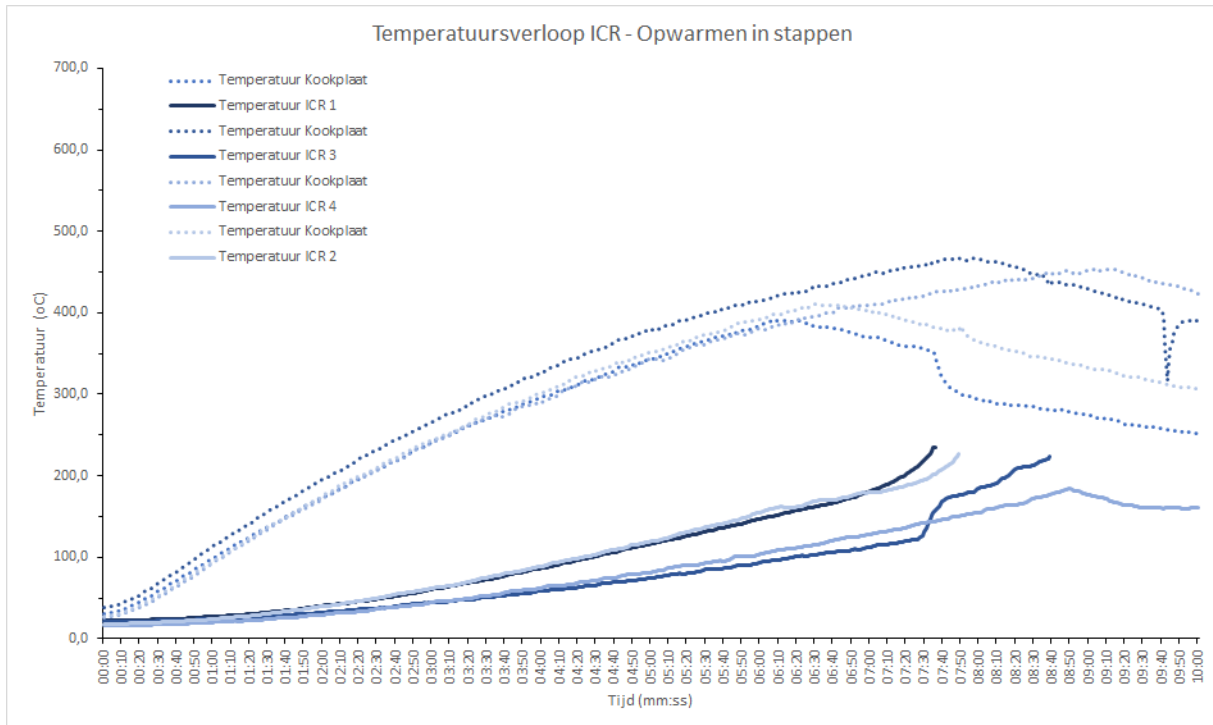
Lithium-ion cel	Spanning (V)	Lithium-ion cel	Spanning (V)	Lithium-ion cel	Spanning (V)
ICR18650 1	3.77	INR18650 1	3.49	IFR18650 1	3.24
ICR18650 2	4.18	INR18650 2	3.49	IFR18650 2	3.24
ICR18650 3	3.81	INR18650 3	3.48	IFR18650 3	3.24
ICR18650 4	3.82	INR18650 4	3.49	IFR18650 4	3.24
ICR18650 5	3.81	INR18650 5	3.47	IFR18650 5	3.24
ICR18650 6	4.17	INR18650 6	3.49	IFR18650 6	3.24
ICR18650 7	4.19	INR18650 7	3.49	IFR18650 7	3.24
ICR18650 8	3.82	INR18650 8	3.49	IFR18650 8	3.24
ICR18650 9	3.82	INR18650 9	3.49	IFR18650 9	3.24
ICR18650 10	4.18	INR18650 10	3.47	IFR18650 10	3.24

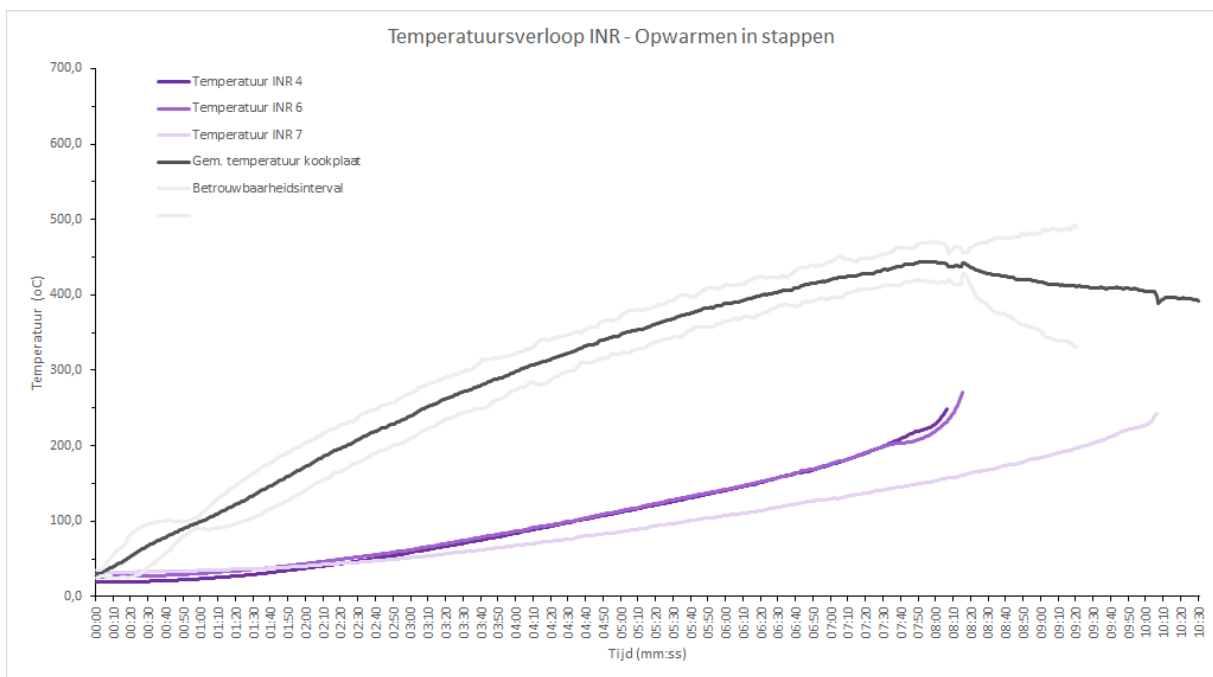
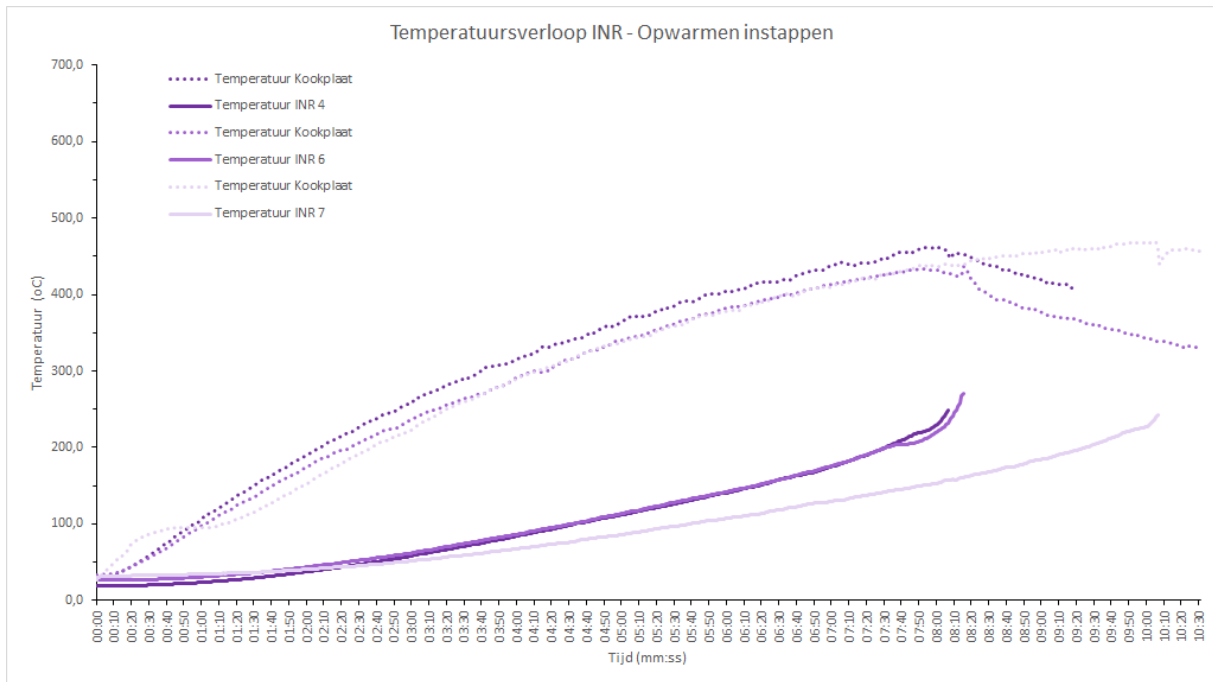


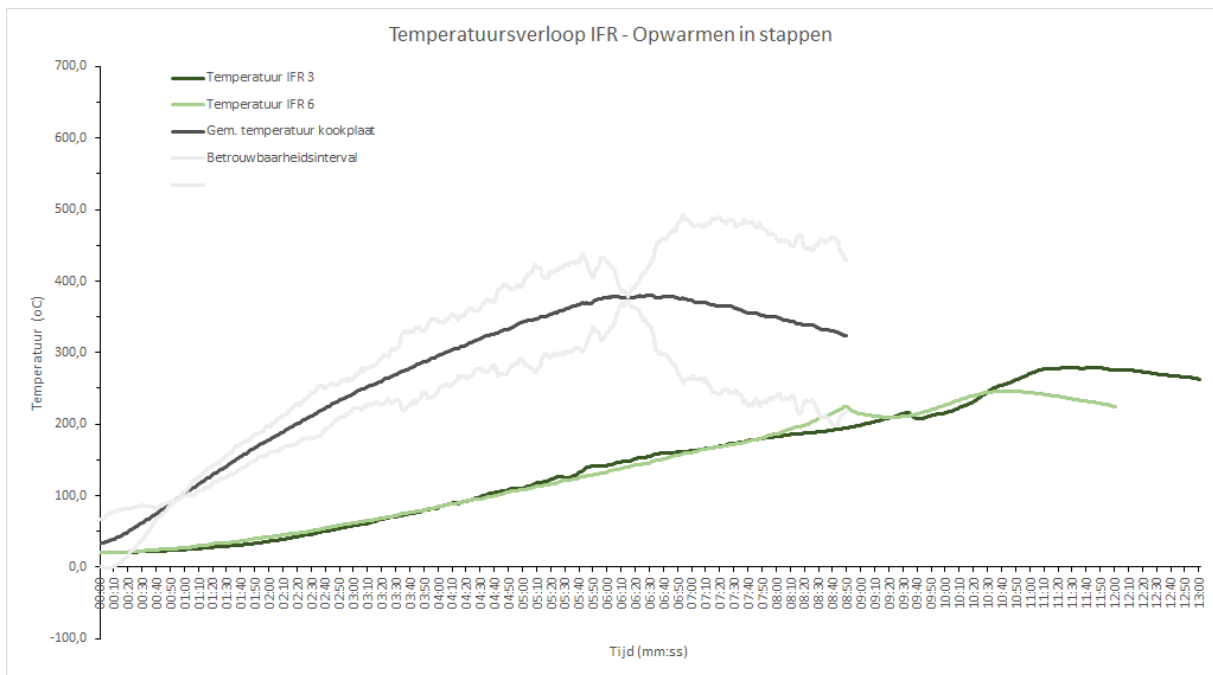
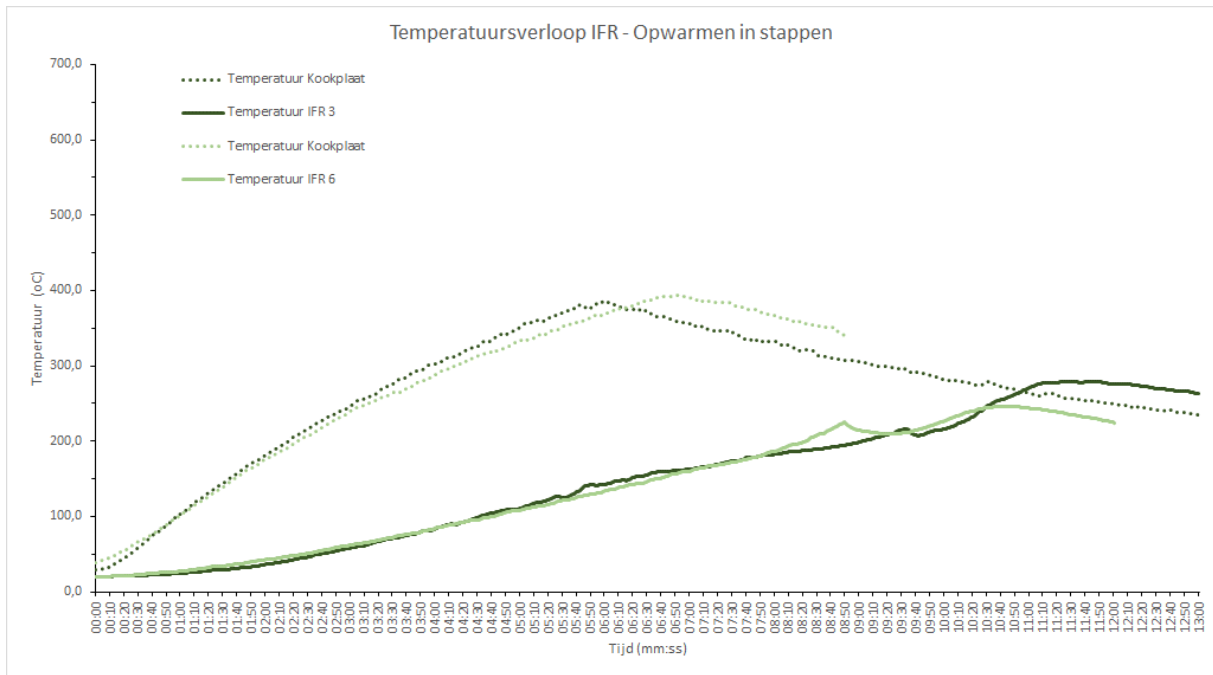
## 20 Bijlage K: Opwarmen kookplaat

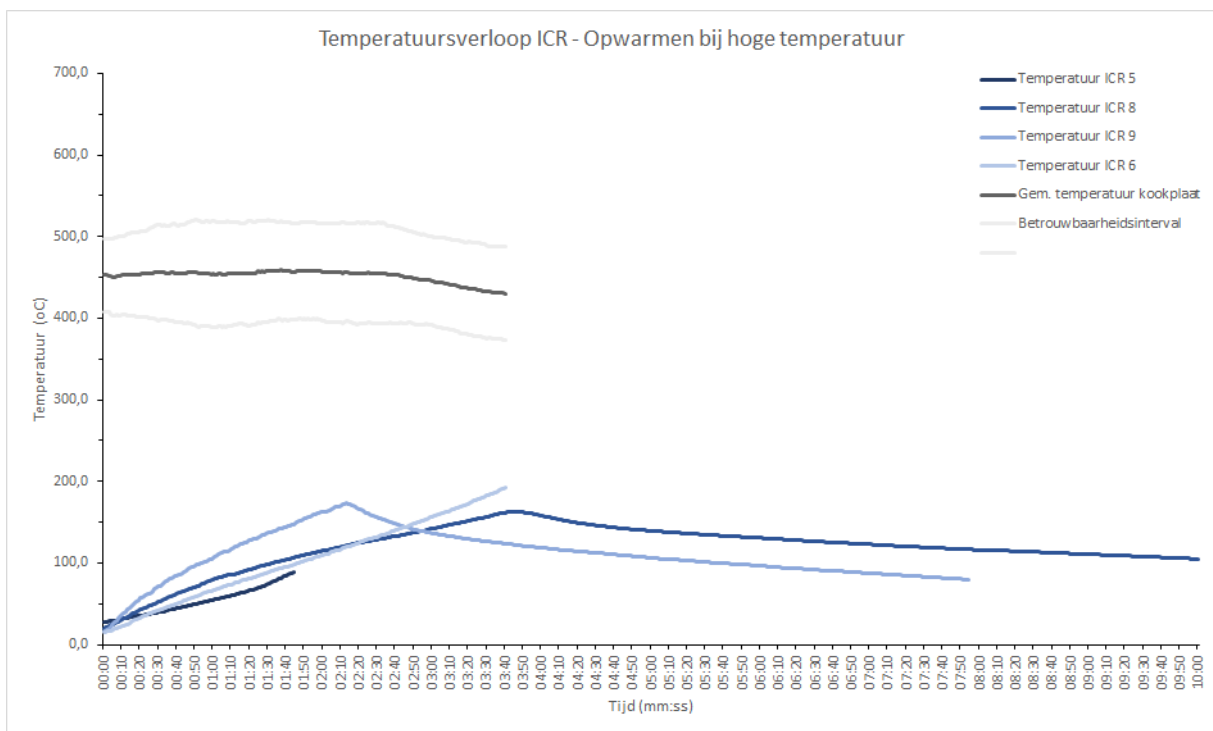
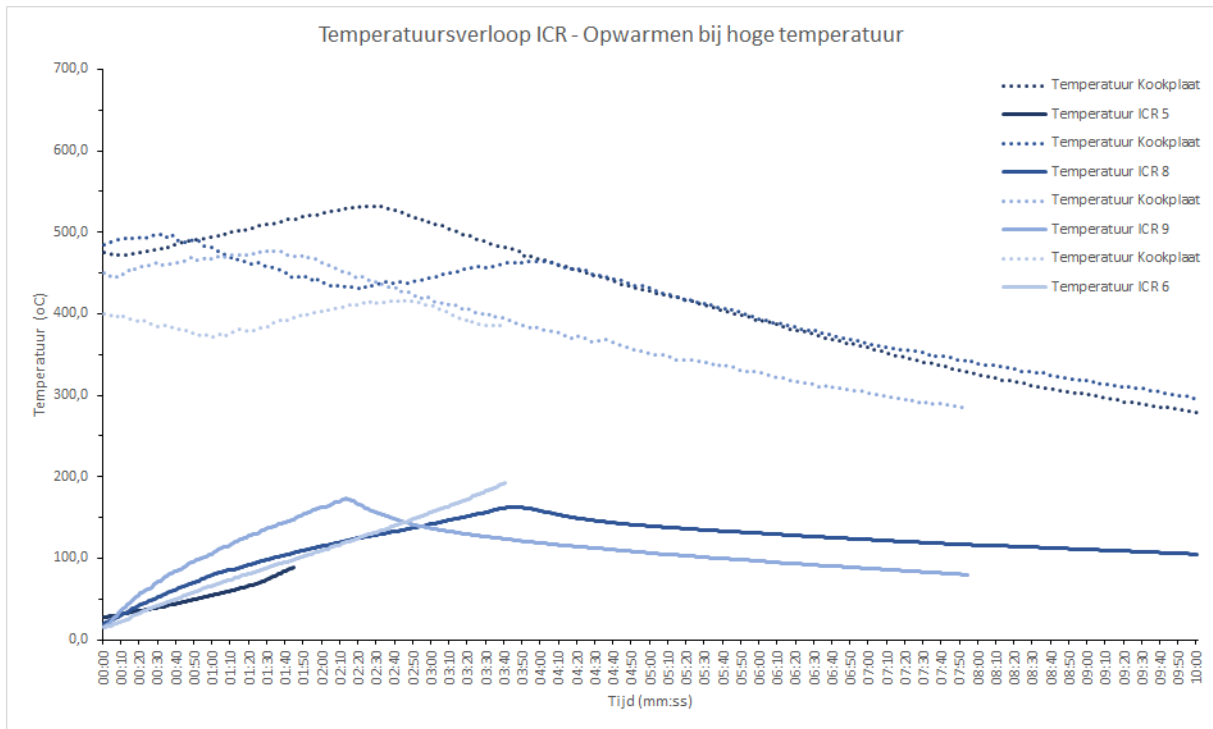


## 21 Bijlage L: Temperatuursverloop ICR, INR en IFR

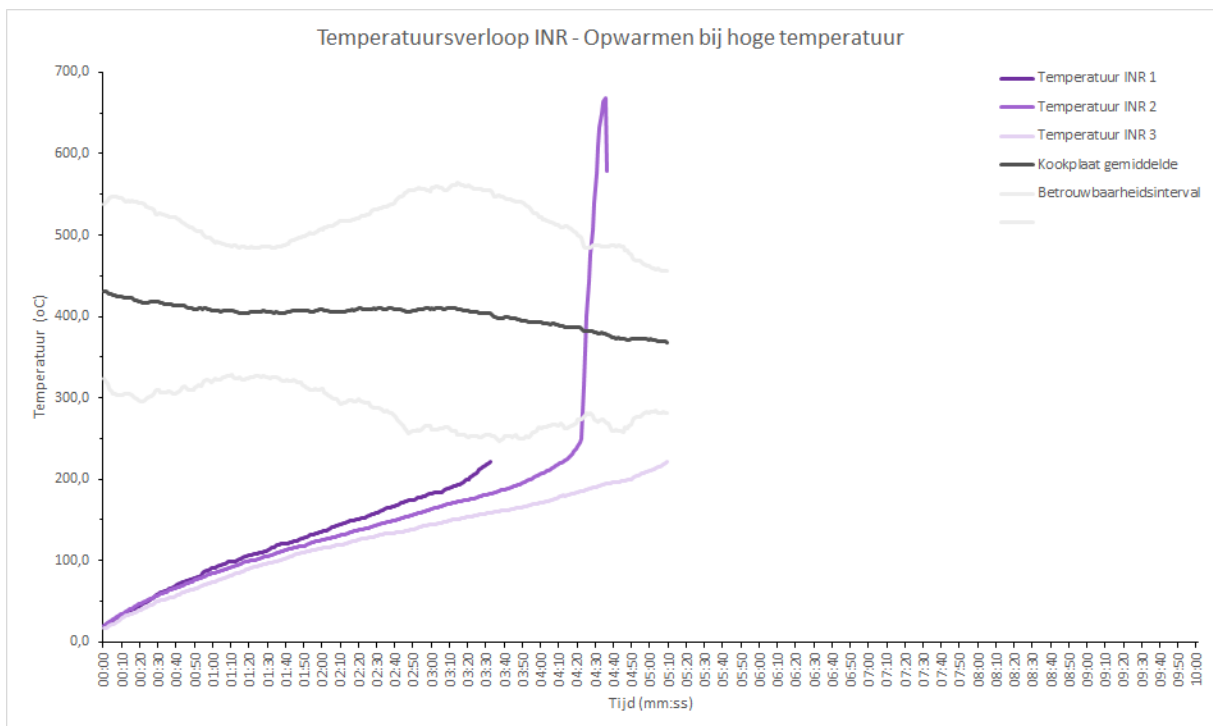
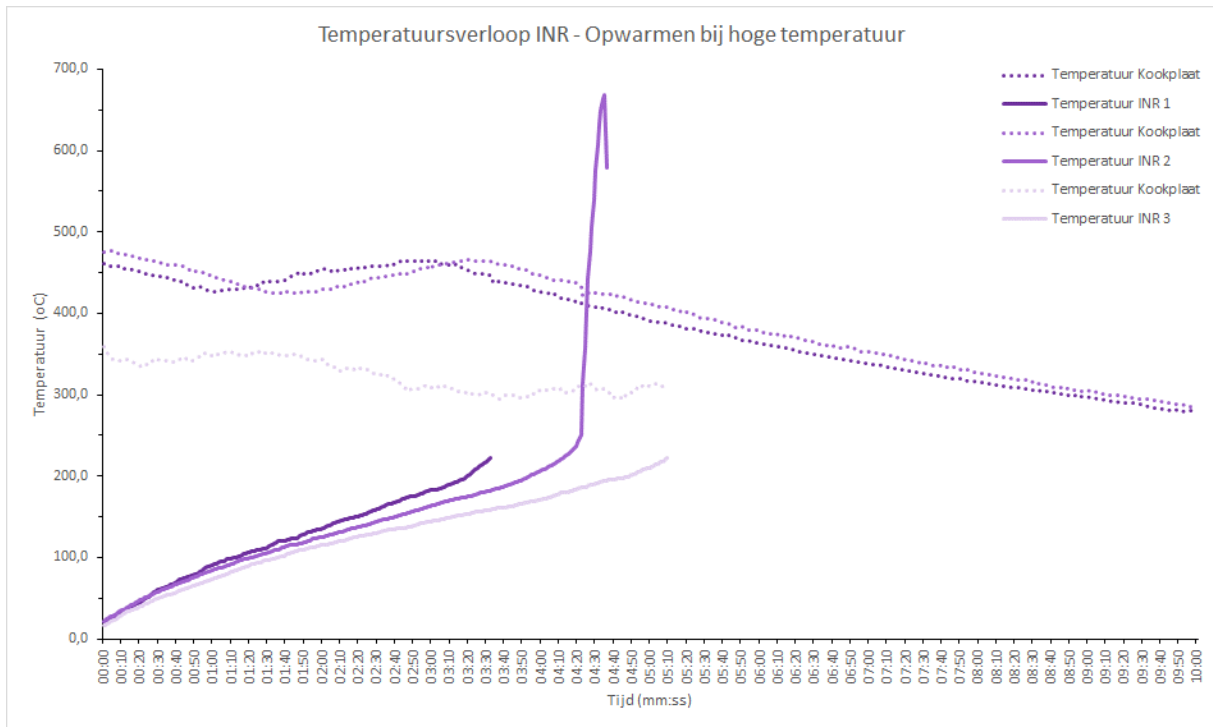


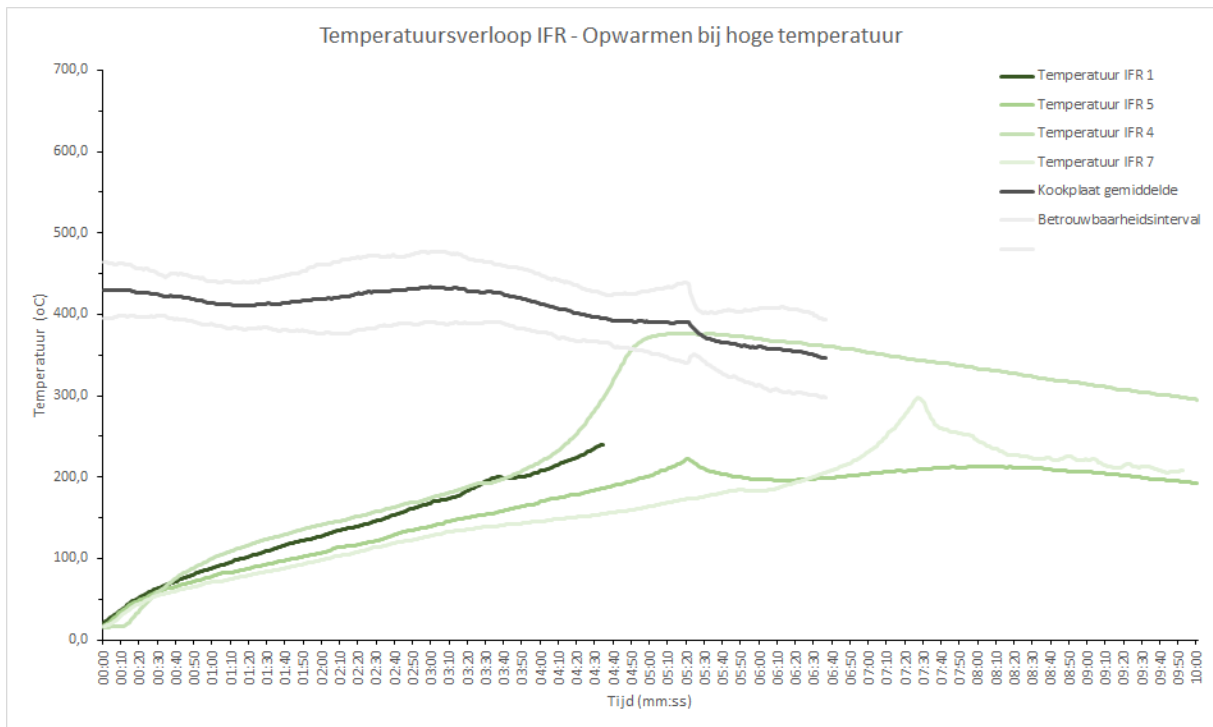
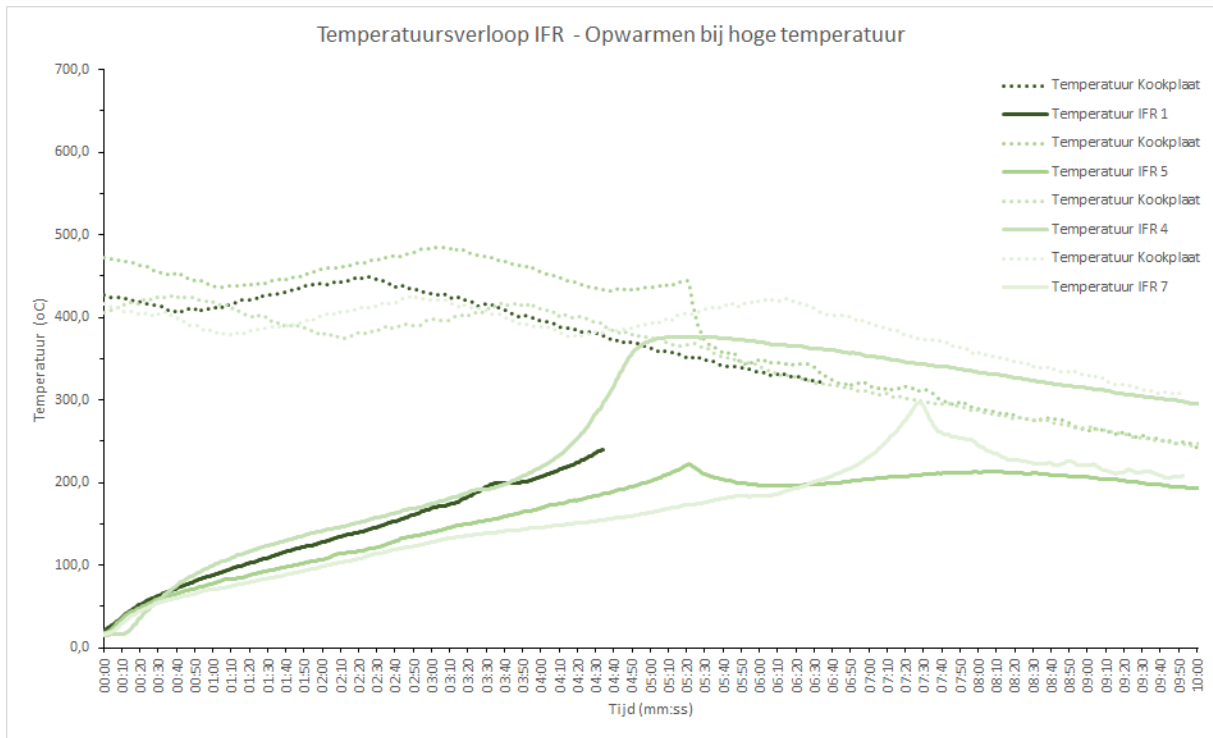




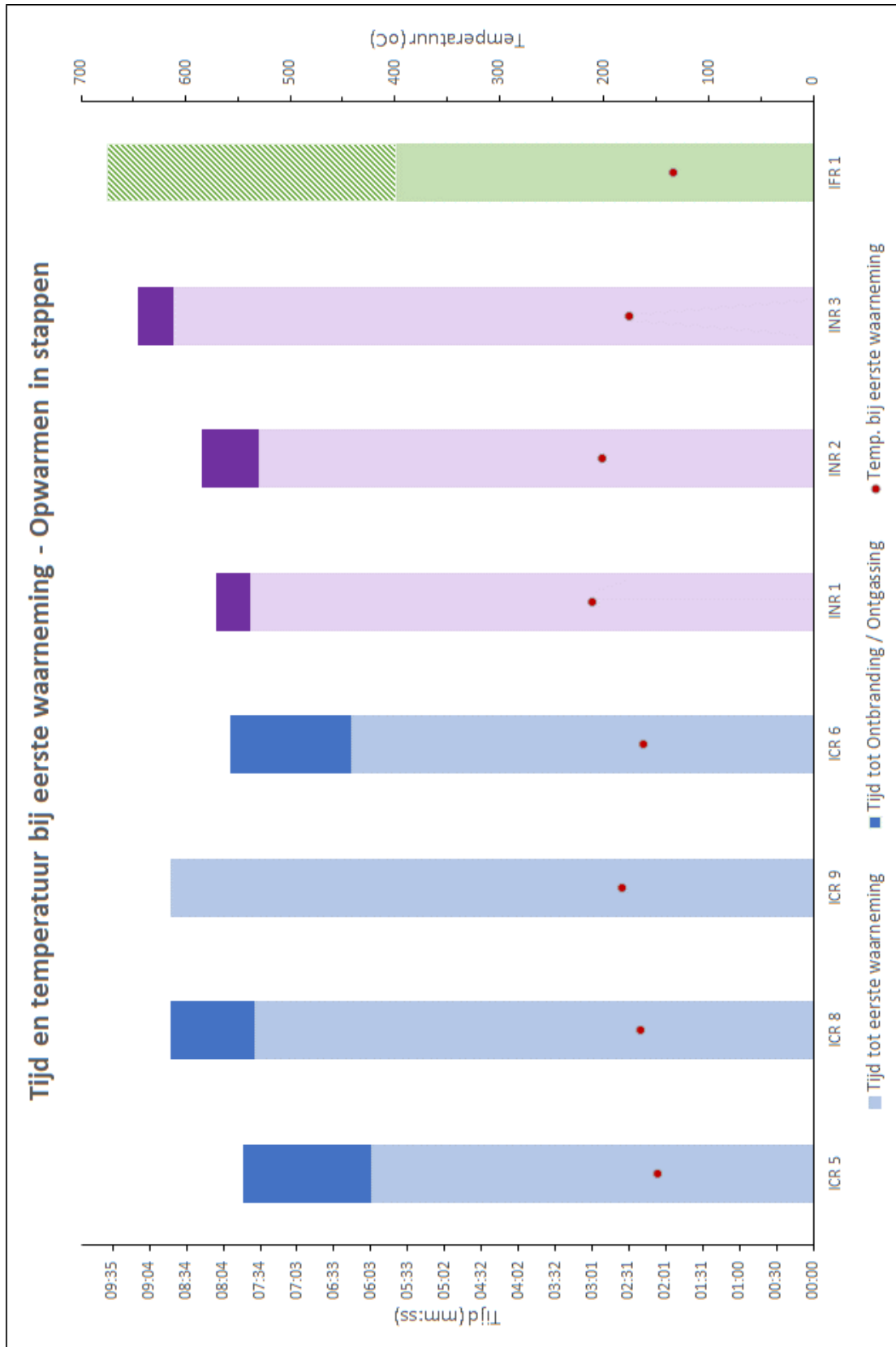




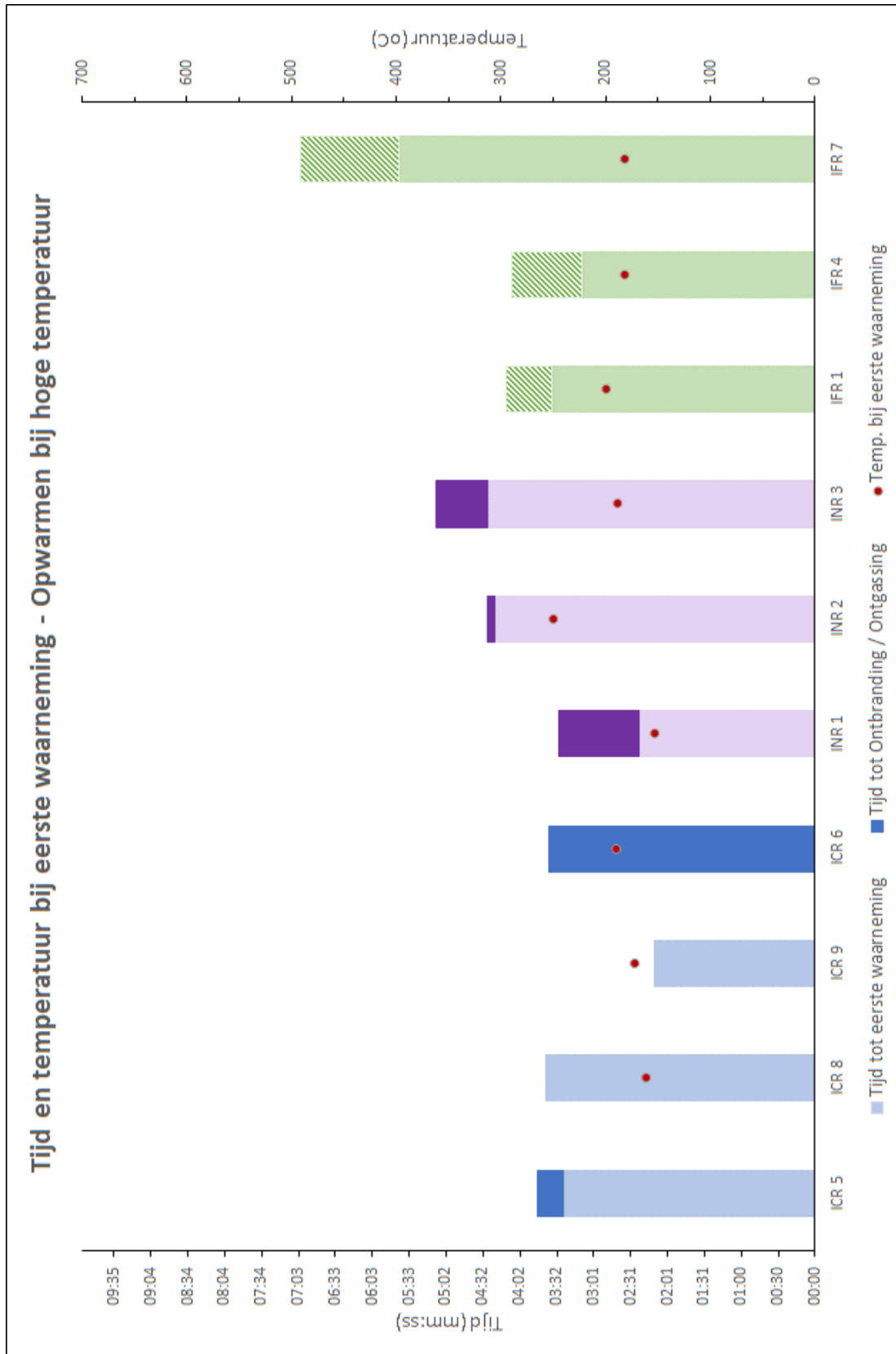




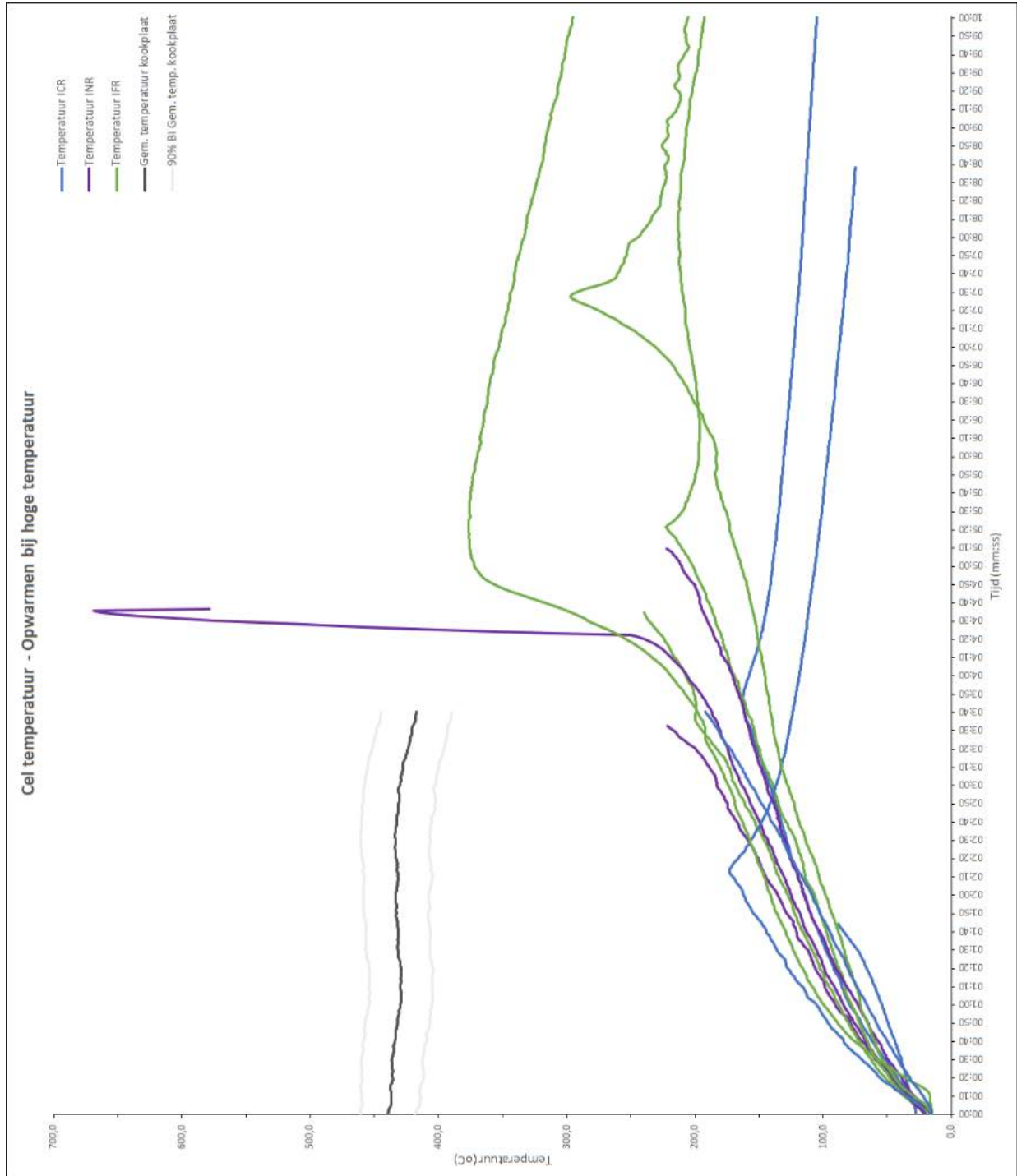
## 22 Bijlage M: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen in stappen



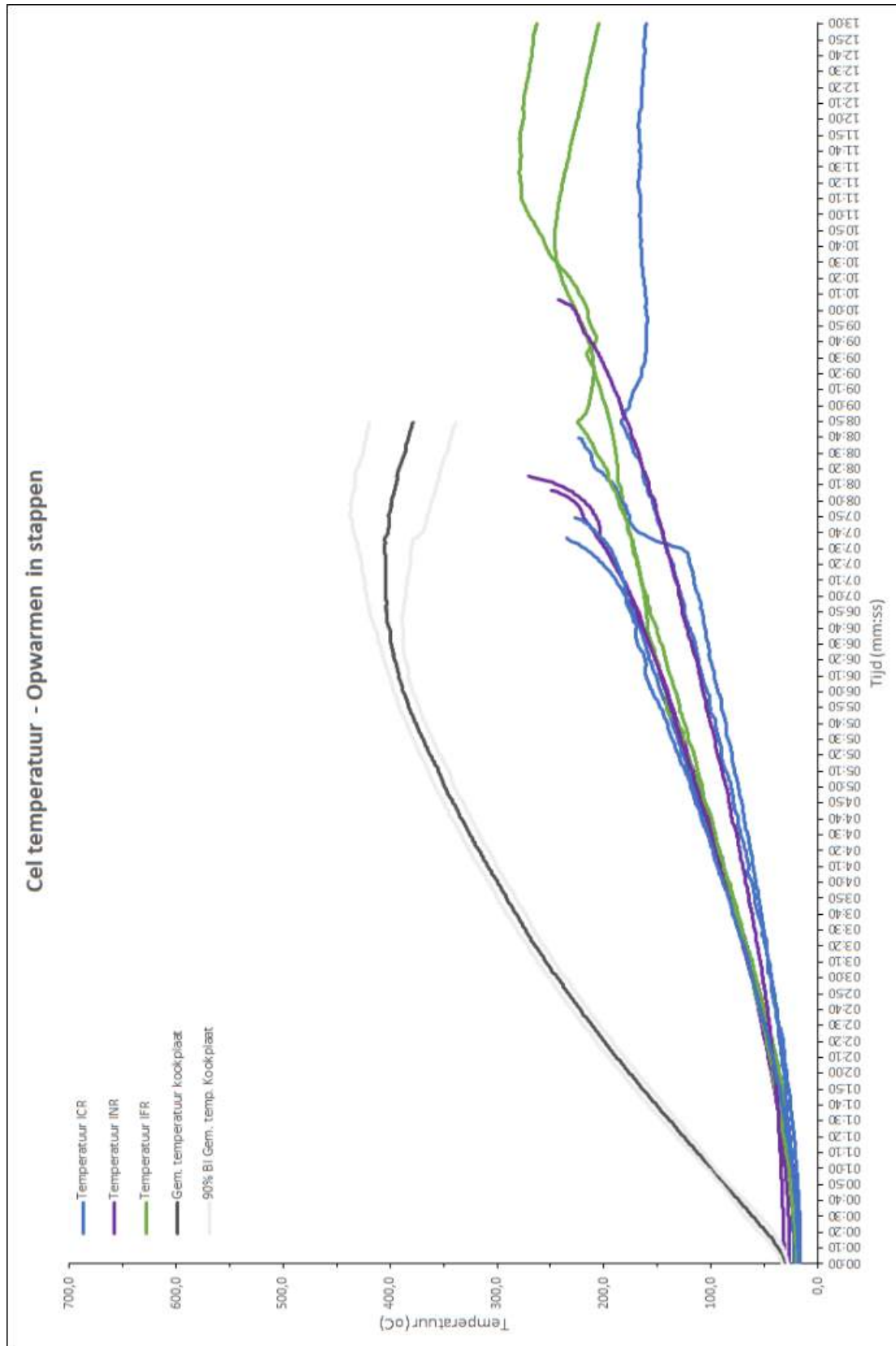
## 23 Bijlage N: Tijd en temperatuur bij eerste waarneming – Opwarmen bij hoge temperatuur



## 24 Bijlage O: Cel temperatuur – Opwarmen bij hoge temperatuur



## 25 Bijlage P: Cel temperatuur – Opwarmen in stappen





## 26 Bijlage Q: Tijd en temperatuur bij wegvallen spanning'

