

Bericht über die experimentelle Untersuchung des thermischen  
durchgehendes zweier Golf GTE Module in einer Storage Box  
280

Bearbeiter:  
Ali Nazzal, M. Sc.  
Alexander Saupe, M. Sc.

Rangsdorf, 17.05.2018

# 1. Einleitung

Für das Lagern und Aufbewahren von Lithium-Ionen-Batterien sind derzeit keine offiziellen Vorschriften und Regelungen vorhanden, daher sind die Betreiber und Inhaber eigens verpflichtet ein Schutzkonzept für die Gefährdung von Lithium-Batterien zu erstellen. Die Genius Group hat für den Bereich des Lagers eine Lagerbox entwickelt, deren Sicherheitspotential sich an den Schutzzielen aus dem Transportrecht orientierten. Diese lauten:

- Maximaltemperatur der Behälteraußenflächen von 100°C
- kein Austritt von Flammen aus dem Behälter
- kein Austritt von Bruchstücken aus dem Behälter
- Erhaltung der strukturellen Integrität des Behälters

Die vorliegende Untersuchung soll zeigen, ob die verwendete Lagerbox „Storage Box 280“ diese Schutzziele einhalten kann und wie sich die Box allgemein beim Durchgehen von Batteriemodulen ohne eine Füllung des Innenbehälters verhält.

## 2. Versuchsvorbereitung

### Batteriespezifikation

Es wurden zwei Module mit jeweils 12 prismatischen Zellen mit je einer Spannung von 4,13 V und einer nominellen Ladung von 25 Ah (siehe Tabelle 1) für den Versuch verwendet. Die Gesamtspannung des Moduls betrug beim vorliegenden Versuch 49,6 V. Es wurden insgesamt zwei Golf GTE Module verwendet. Die zwei Module wurden unmittelbar nebeneinander positioniert. Die weiteren Batterieeigenschaften sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

*Tabelle 1: Technische Daten der Batterie deren Module und Zellen*

	Zelle	Modul
Abmaße - Gesamt in mm	-	390 x 150 x 110
Masse in kg	-	11
Schaltung	1s1p	12s1p
Spannung in V	4,13	49,6
Nom. Ladung in Ah	25	25
nom. Energieinhalt in Wh	90	1086

### Behälterspezifikation

Der geschützte Versuch wurde in einer Storage Box-280 durchgeführt. Die Box besteht aus einem Doppelwandsystem, was durch einen Außen- und durch einen Innenbehälter aus verzinktem Stahl realisiert wird. Die Doppelwandigkeit des Deckels wird über einen Drahtkorb erreicht, welche mit einem nichtbrennbaren Gewebe ausgelegt und mit PyroBubbles PE- Füllkissen gefüllt ist. Der Raum zwischen dem Außen- und Innenbehälter ist mit PyroBubbles-Schüttung befüllt. Die Behälterdeckelfixierung wurde über zwei Spannverschluss realisiert. Weitere technischen Daten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

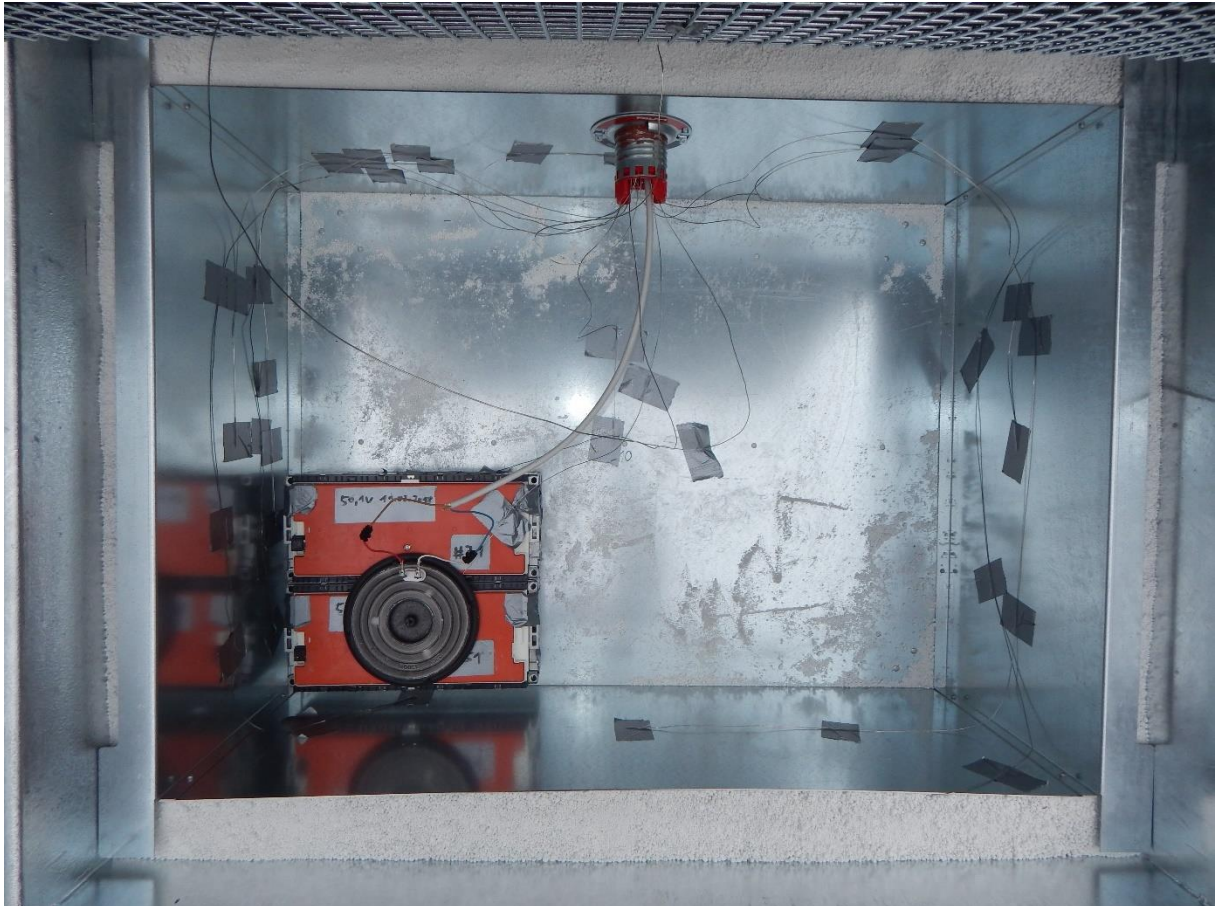
*Tabelle 2: Technische Daten der Storage-Box 280*

Eigenschaft	Wert
Außenmaß (L x B x H) in mm	1200 x 1000 x 800
Innenmaß (L x B x H) in mm	1013 x 743 x 373
Volumen Innenbehälter in L	280

## Versuchsaufbau

Die Module wurden in Storage Box 280 direkt auf dem Boden in der linken vorderen Ecke des Behälters platziert.

Die Heizplatte wurde oben auf dem Modul 1 und etwas überlappend über Modul 2 aufgelegt (siehe Abbildung 1).



*Abbildung 1: Anordnung und Nummerierung der Batteriemodule im Batterie*

Die Seitenwände waren mit der losen PyroBubbles-Schüttung gefüllt. Der Deckelkorb wies eine vollständige Füllung mit PE-Füllkissen auf. Eine Verfüllung des Innenbehälters wurde nicht vorgenommen.

## Vorbereitung für Temperaturmessung

In Abbildung 2 sind die Positionierung der Thermoelemente in der Draufsicht (oben) und in der Frontansicht (unten) erkennbar. Die Temperaturmessstellen (TE) sind mit schwarzen x gekennzeichnet. Eine Beschreibung der Position ist in Tabelle 3 aufgeführt. Im Folgenden werden die Temperaturen, welche an der Messspitze von TE  $i$  (Temperaturmessstelle) dokumentiert werden, vereinfacht als  $T_i$  bezeichnet. Der Messbereich der Thermoelemente liegt zwischen  $-270\text{ °C}$  und  $1372\text{ °C}$ .

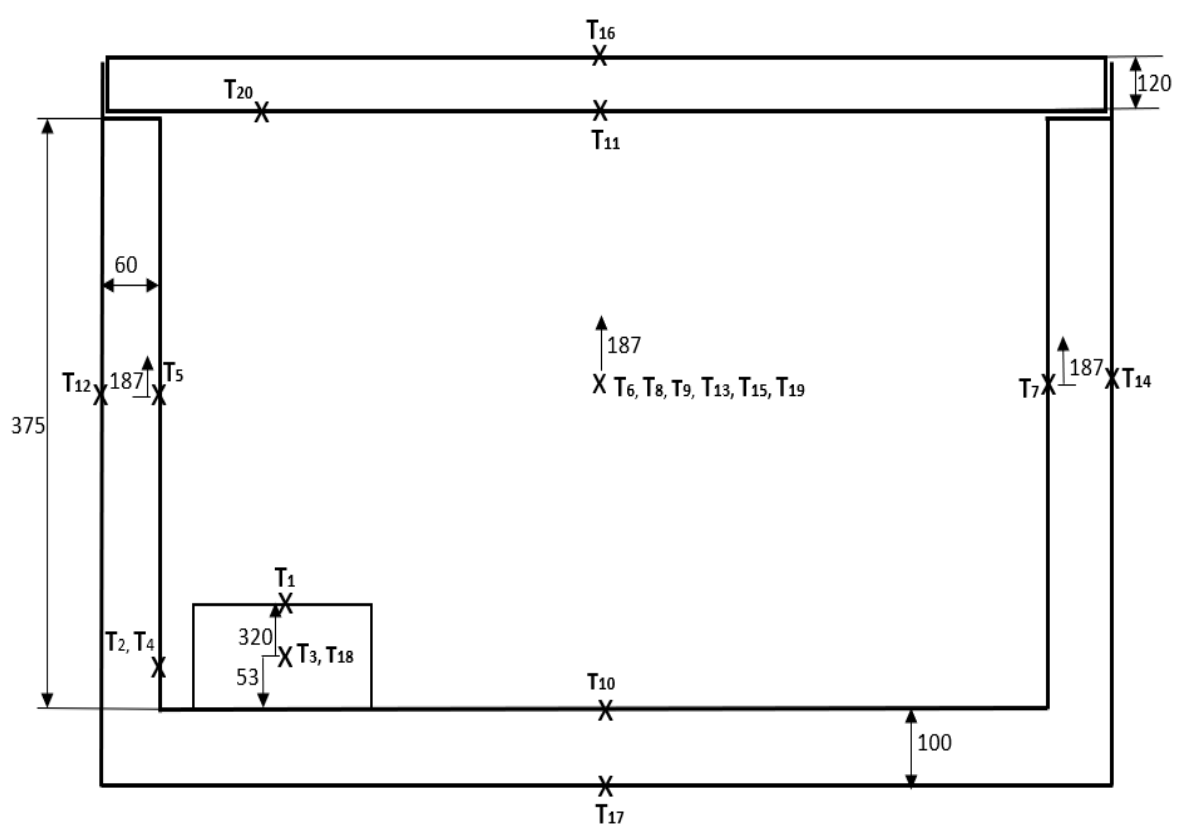
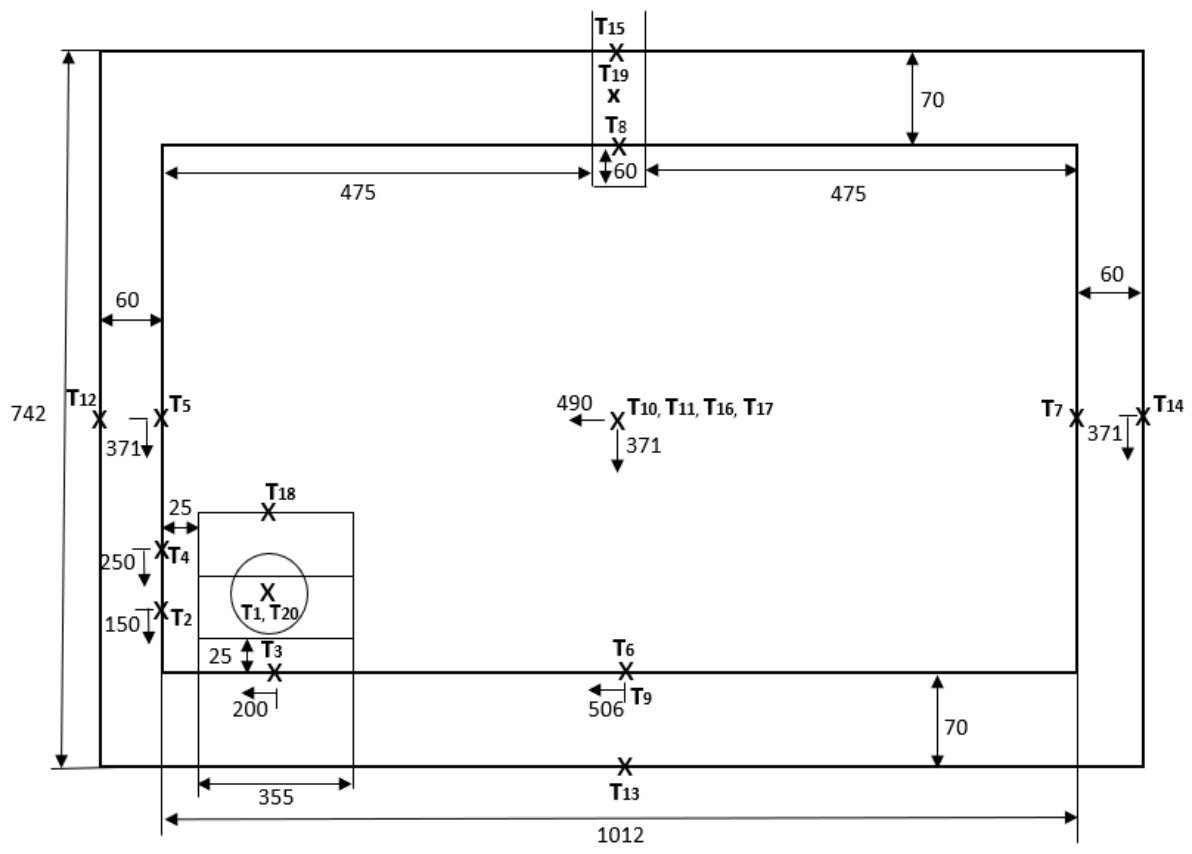


Abbildung 2: Positionierung der Thermoelemente in der Storage-Box 280 in der Draufsicht (oben) und in der Seitenansicht (unten). Die Temperaturmessstellen (TE) sind mit schwarzen x kenn-zeichnet. Alle Längenangaben in mm

Insgesamt wurden 20 Temperaturmessstellen mithilfe von Thermoelementen realisiert. Zusätzlich wurden Temperaturmessstreifen (TMS) mit jeweils 8 Feldern für die Temperaturen 40 – 71°C und 77– 116 °C auf der Behälteraußenseite als Redundanz für die Thermoelemente angebracht (siehe Tabelle 3). Diese sind irreversibel und zeigen somit die maximal erreichte Temperatur an der jeweiligen Stelle der Außenseite des Behälters an.

Tabelle 3: Positionierung der Temperaturmessstellen

Nr.	Spitze	Plättchen	Positionsbeschreibung
1	x		Unter Heizplatte
2	x		Behälterinnenwand, links, Höhe vom Modul 1
3	x		Behälterinnenwand, vorne vom Modul 1
4	x		Behälterinnenwand, links vom Modul 2
5	x		Behälterinnenwand, links, Mitte
6	x		Behälterinnenwand, vorne, Mitte
7	x		Behälterinnenwand, rechts, Mitte
8	x		Behälterinnenwand, hinten
9	x		Innenbehälter, Außenwand, vorne
10	x		Innenwand, Boden, etwa mittig
11		x	Innenwand, Deckelkorb, Mitte
12		x	Behälteraußenwand, links, mittig
13		x	Behälteraußenwand, vorne, Mitte
14		x	Behälteraußenwand, rechts, mittig
15		x	Behälteraußenwand, Rückseite, Mitte
16		x	Deckelaußenwand. Mitte
17		x	Boden, Außenbehälter
18	x		Rückseite, hinterer Modul 2
19	x		In der Kabeldurchführung, Behälterrückseite
20	x		Deckelinnenwand über Module

### 3. Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit dem Anschluss der Stromzufuhr zur Heiplatte (HP) und dem Start der Temperaturaufzeichnung um 11:33 Uhr bei einer Umgebungstemperatur von  $-9^{\circ}\text{C}$  gestartet. Die Beobachtungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Beobachtungsprotokoll des Versuchs am 28.02.2018

Versuchszeit in hh:mm	Beobachtung/Ereignis
00:00	Einschalten der Stromversorgung für die Heizplatte (1500 W) an Modul 1 und Modul 2
00:12 bis 00:17	Start Video 1, leichte Rauchentwicklung im linken, rechten und überwiegend über die Kabeldurchführung im hinteren Bereich
00:17 bis 00:50	Start Video 2 leichte Rauchentwicklung im linken und im hinteren Bereich
00:52	Hrbare Freisetzung von grauen Reaktionsgasen; Gase überwiegend transparent, geringe Mengen kondensierter Wasserdampf aus Kabeldurchführung sowie aus Deckeldichtung, dauert 1 bis 3 s.
01:01 bis 01:17	HP aus Plopp mehrmals Geringe Abblasen von transparent bis weißem Rauch im hinterem Bereich und mehr aus der Deckeldichtung im linken Bereich des Behälters
01:27	HP ein
01:41 bis 01:43	Druckentlastung, Plopp, HP aus Geringer Gas Ausstoß
03:22 bis 03:24	Starker Gasausstoß (grau), 3-4 min mehrmals; Thermal Runaway Modul 1 und 2

## 4. Versuchsergebnisse

### Temperaturergebnisse der Module und an Behälteraußenwände

Am 28.02.2018 herrschte eine Umgebungstemperatur von ca.  $-9^{\circ}\text{C}$ . Es war sonnig und windig. Mit dem Versuchsstart wurde die Stromversorgung (1.500 KW) für die Heizplatte angeschlossen. Das Messintervall der Temperatureaufzeichnung betrug 5s während der ersten 240 Versuchsminuten, danach wurde das Messintervall im Rahmen der Langzeitmessung auf 60s bis zum Versuchsende erhöht. Die Beobachtungen und Ereignisse während des Versuchs sind in der Tabelle 4 notiert.

Bis zur ersten eindeutigen Reaktion der Batterie im Rahmen einer Thermal Runaway Reaktion vergingen über 3 h Versuchszeit. Der Grund dafür lag in der Positionierung der Heizplatte oben auf den Modulen, wodurch der Wärmeeintrag nicht optimal auf die Module war. Die beobachteten Rauchfreisetzungen und Temperaturschwankungen, welche hier nicht dargestellt, sind zum einen auf das Schmelzen und Abbrennen des Plastikdeckels der Module zurückzuführen und zum anderen durch das wiederholte Ein- und Ausschalten der Heizplatte. In der 195. Versuchsminute stieg TE1 sprunghaft an und erreicht seine maximale Temperatur von  $400^{\circ}\text{C}$  ca. eine Minute später. Dieser Temperaturanstieg markiert den Thermal Runaway des Moduls 1. Nahezu gleichzeitig konnte ein Temperaturanstieg von TE18 (Rückseite am Modul 2) auf ca.  $125^{\circ}\text{C}$  innerhalb von 1 min beobachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass dieser Temperaturanstieg an TE 18 durch Reaktionsgasausstoß beim Thermal Runaway von Module 1 verursacht wurde (siehe Abbildung 3).

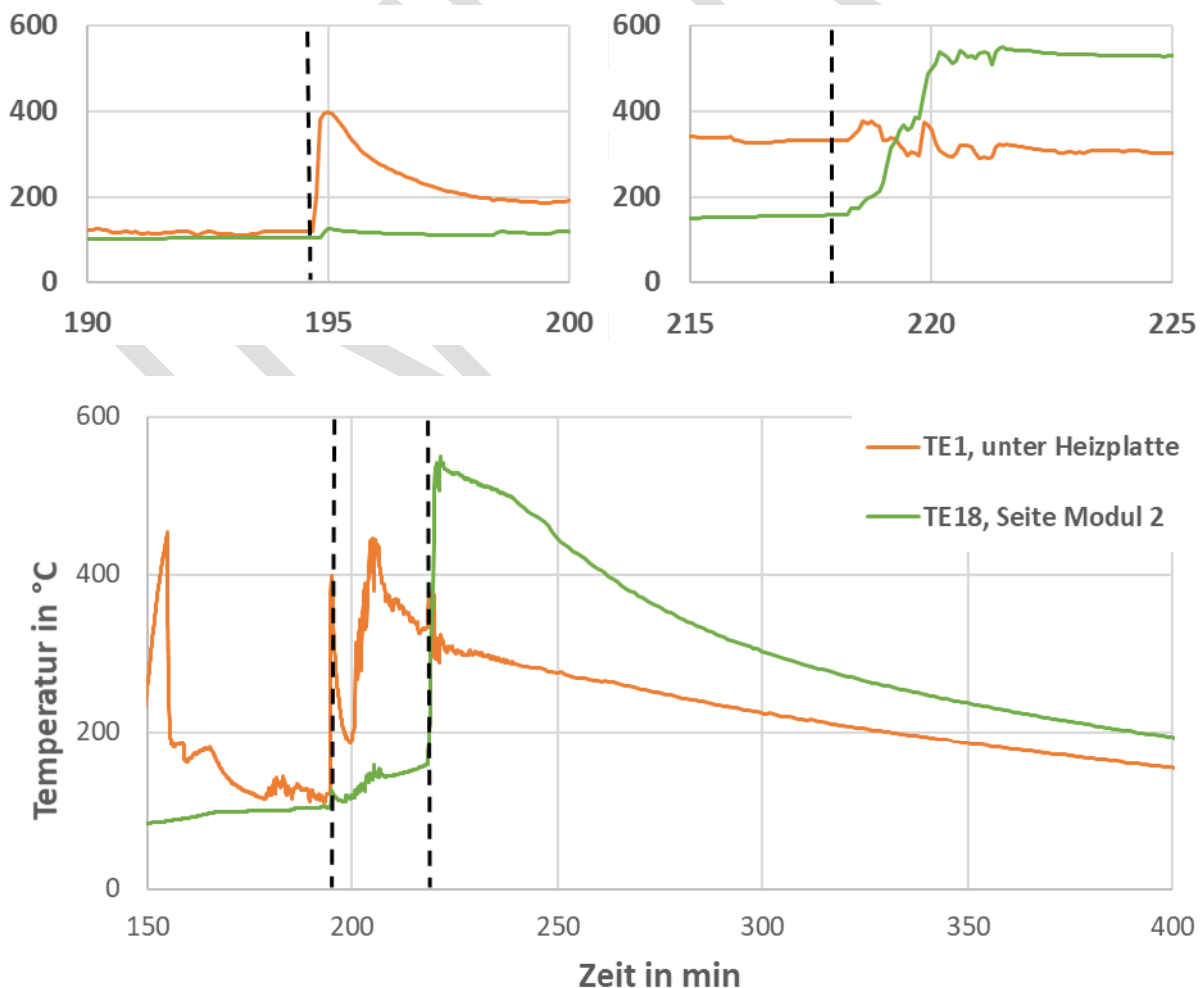


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen von den beiden Module innerhalb Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des ersten Moduls (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Diese Messwerte decken sich mit den Beobachtungen während des Versuches. Ab der 195. Versuchsminute sank die Temperatur TE 1 innerhalb von 4 min auf 186 °C, was zeigt, dass hier noch nicht alle Zellen des Moduls durchreagiert haben. Ab der 200. Versuchsminute trat ein erneuter Temperaturanstieg von  $T_1$  auf, wodurch in der 206. Versuchsminute eine maximale Temperatur von ca. 438 °C. erreicht wurde. Zu diesem Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass das Modul 1 vollständig durchreagiert hatte. Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur an TE 1 sanken die Temperaturwerte im Durchschnitt um 7,8°C/min bis das zweite Modul thermisch reagierte.

Nach der ersten thermischen Reaktion an Modul 1 stellte sich an TE 18 ein weiterer Temperaturanstieg bis zu 143°C innerhalb von 10 Minute ein. Danach stieg TE18 sprunghaft an und erreichte seine maximale Temperatur von rund 546°C innerhalb von 4 min, was das Durchgehen des Moduls 2 markiert. Gleichzeitig stieg auch  $T_1$  nochmals kurz um 45,7 °K an, was zeigt, dass die freigesetzte Wärmeenergie auch noch einmal Einfluss auf das danebenliegende Modul hatte. Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur an TE 18 sank die Temperatur bis zur 400. Versuchsminute um 1,9 K/min. Der Temperaturverlauf der Langzeitmessung (Abbildung 4) zeigt, dass nach dem Ausreagieren der Module der Wärmetransport nach außen dominierend ist. Es stellte sich nach ca. 3,7 h (ca. 222 min) nahezu ähnliche Temperaturverläufen der Module, mit fallender Tendenz, ein. Zum Ende der Datenaufzeichnung nach etwa 46,5 h lagen die Temperaturen bei rund -12,82°C (Umgebungstemperatur) (Abbildung 4).

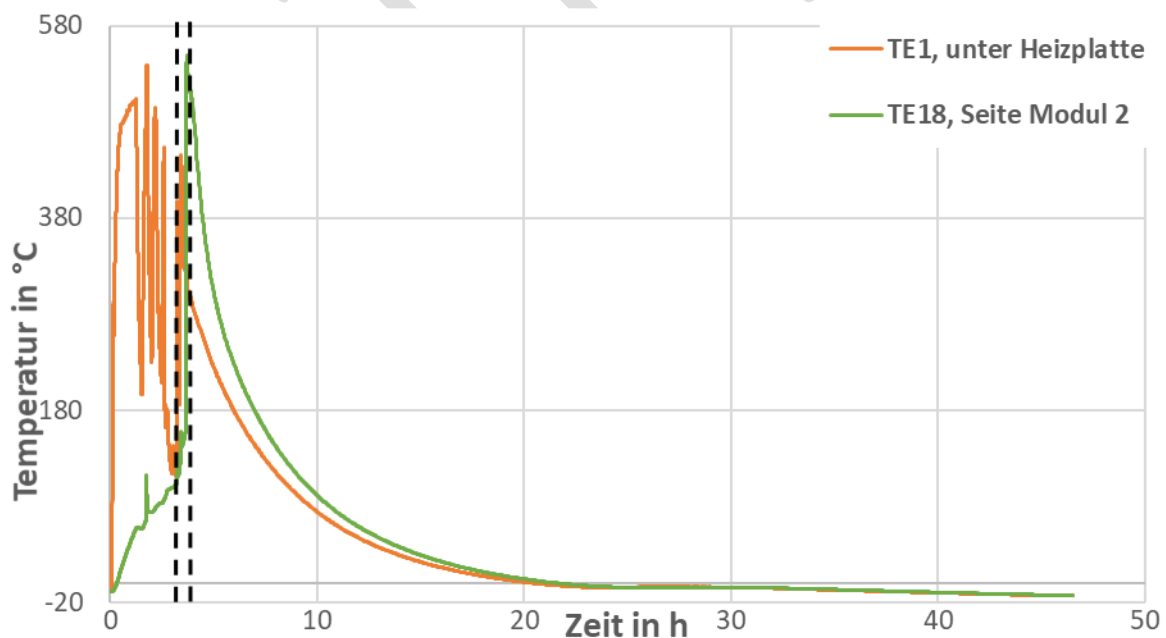


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen TE<sub>1</sub> unter der Heizplatte und TE<sub>18</sub> von Modul 2 über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung (46,5 h). Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des ersten Moduls (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Die Temperaturentwicklungen an den Behälteraußenflächen sind vornehmlich durch die Reaktion der Module im Inneren geprägt. D.h. das ein wesentlicher Einfluss des Wärmetransports durch die

Reaktion der Module von innen nach außen bestand. Nach dem Einsetzen der Module stiegen die Temperaturen an Behälteraußenwände deutlich an und erreichten nach ca. 5 h die maximale Werten  $T_{12}$  bis zur (ca.  $32^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{13}$  (ca.  $17,3^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{14}$  (ca.  $13^{\circ}\text{C}$ ) und  $TE_{15}$  (ca.  $16^{\circ}\text{C}$ ). Was zeigt, dass der Einfluss der Modulreaktion auf die Außenflächen deutlich erkennbar und der Wärmetransport am ersten Tag dominierend war. Die Abbildung 5 zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den Temperaturmessstellen, die von der Sonne beaufschlagt wurden ( $T_{13}$  und  $T_{14}$ ) sowie die, die sich im Schatten befanden ( $T_{12}$  und  $T_{15}$ ). In der Abbildung 5 stieg  $T_{12}$  auf ca.  $31^{\circ}\text{C}$  an höher als andere Temperaturen.  $T_{12}$  war viel wärmer als aller anderen Temperaturen. Grund dafür, dass sowohl die Module im linken Bereich vorne platziert waren und mehr Reaktionsgase aus diesem Bereich ausgestoßen waren (anhand der Videos-Beobachtungen). Nach dem vollständigen Durchreagieren der Module stellte sich in der 297. Versuchsminute sich ein Temperaturabfall von rund  $30^{\circ}\text{C}$  auf ca.  $-12^{\circ}\text{C}$  ein.

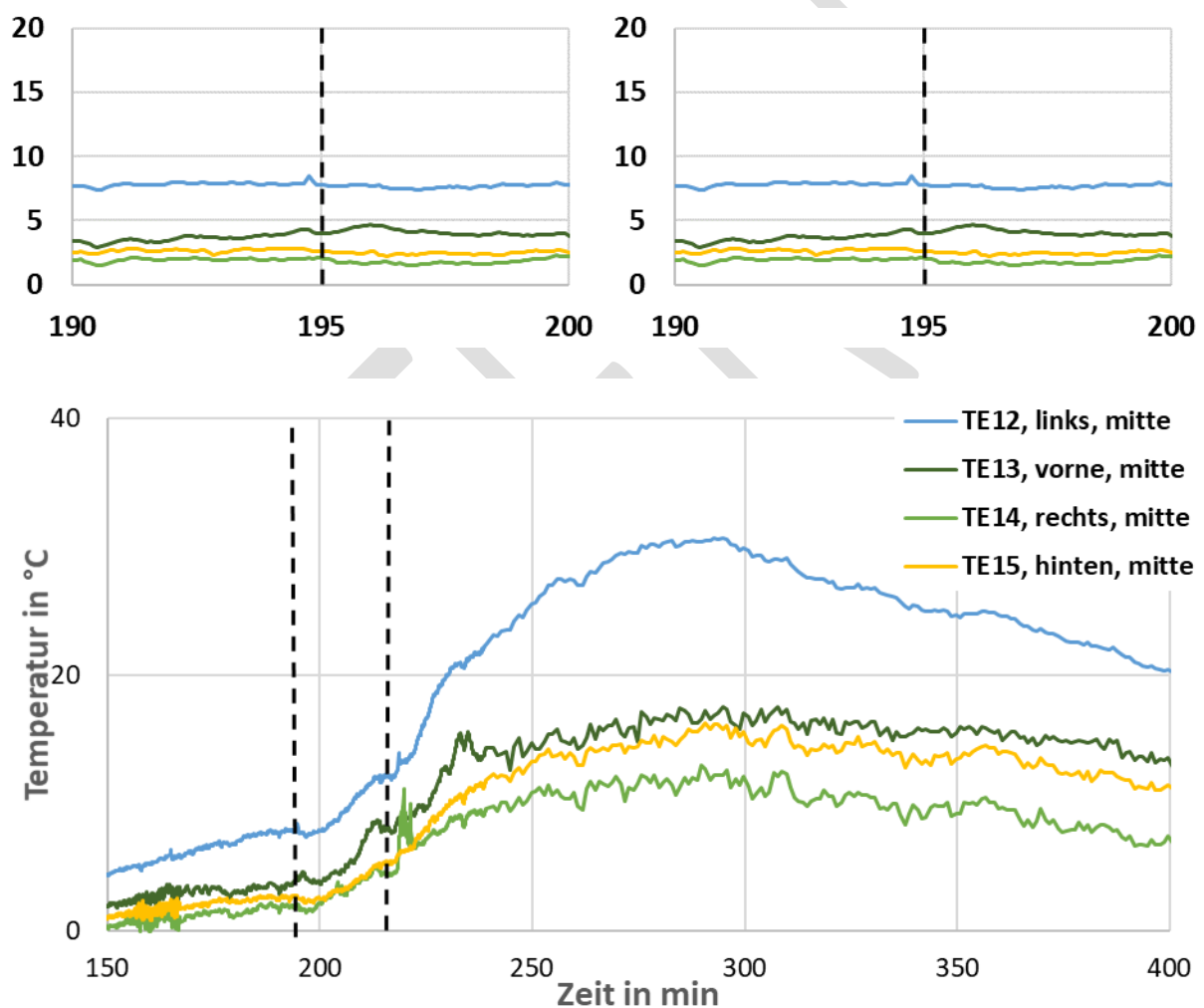


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälteraußenwänden innerhalb der Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des ersten Moduls (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Aus der Langzeitmessung (Abbildung 6) ist erkennbar, dass erst am nächsten Tag deutliche Oszillationen im Temperaturverlauf von  $T_{13}$  und  $T_{14}$  auftreten. Die hier erkennbare Oszillation der Messwerte innerhalb von 6 h von  $T_{13}$  und  $T_{14}$  zeigen den Einfluss der Sonneneinstrahlung. Nach etwa 20 h nach Versuchsbeginn, lagen alle Außenwandtemperaturen bei rund  $-12,36^{\circ}\text{C}$  und stiegen anschließend wieder am nächsten Tag an. Die ansteigenden Temperaturen am nächsten Tag (ab 21.

Versuchsstunde) sind durch die ansteigenden Umgebungstemperaturen als auch durch die Sonneneinstrahlung bestimmt.  $T_{13}$  und  $T_{14}$  steigen dabei bis auf rund  $10^{\circ}\text{C}$  bzw. ca.  $15^{\circ}\text{C}$ .

Der Messstreifen, welcher sich an der Messstelle  $T_{12}$ ,  $T_{13}$ ,  $T_{14}$  und  $T_{15}$  befanden, wiesen keine ausgelösten Temperaturmessfelder auf. Dies bedeutet, dass an dieser Stelle die Behälteraußenwandtemperaturen zu jeder Zeit unter  $40^{\circ}\text{C}$  lagen (siehe Tabelle 5).

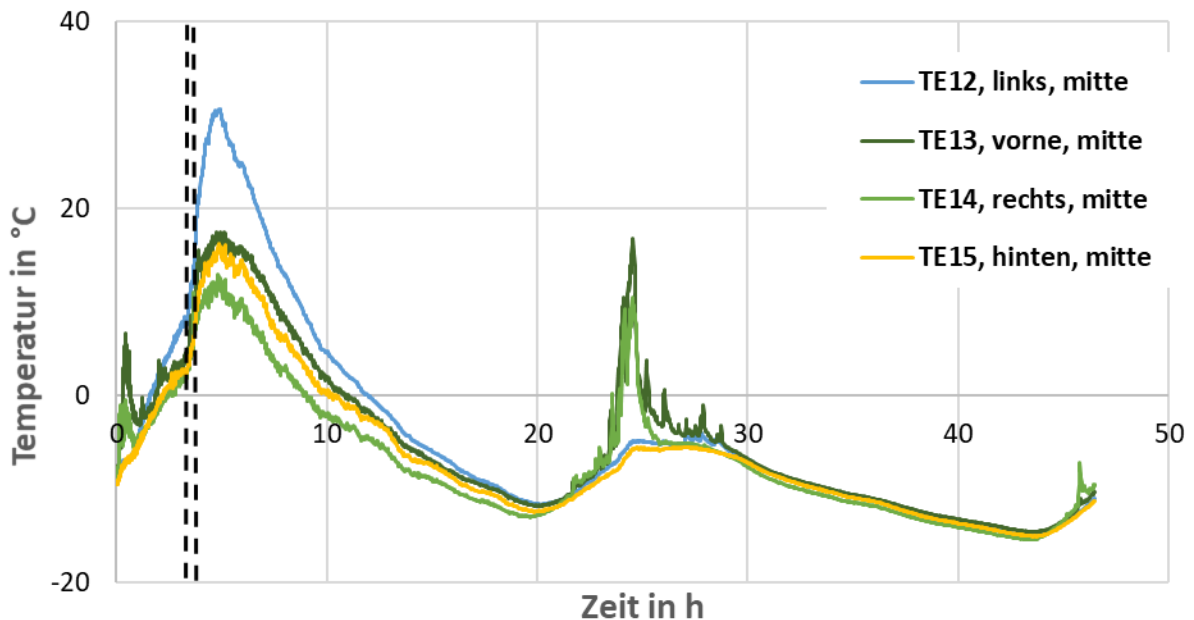


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälteraußenwänden über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung nach etwa 46,5 h. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des ersten Moduls (links) und des zweiten Moduls (rechts)

#### Temperaturverlauf am Deckel und Bodenaußenbehälter

An den Temperaturverläufen an der Außenseite des Deckels lässt sich der Einfluss der Wärmeübertragung aus dem Innenraum des Behälters erkennen. Nach dem Einsetzen des Thermals Runaways der Module und damit verbundenen Gasausstoß in Richtung Behälterdeckel und Einfluss des Wärmetransports in Richtung Boden, stiegen die Temperaturmessstellen  $T_{16}$  und  $T_{17}$  an. Dabei erreicht  $T_{16}$  in der 231. Versuchsminute eine Temperatur von  $4^{\circ}\text{C}$ . Der Temperaturverlauf stagniert dabei im weiteren Versuchsverlauf weiterhin bei dem Wert, was auf den konstanten Wärmetransport von innen nach außen schließen lässt. Der Temperaturverlauf von  $T_{17}$  steigt mit der Reaktion der Module kontinuierlich an, was auf den Wärmeleitungsprozess ausgehend von den Modulen nach außen zurückzuführen ist. In der 357. Versuchsminute erreicht  $T_{17}$  eine maximale Temperatur von rund  $8^{\circ}\text{C}$  und stagniert im weiteren Verlauf mit leicht oszillierendem Verlauf bei diesem Wert, was ebenfalls den konstanten Wärmetransport von innen nach außen zeigt. Nach ca. 6 h sanken die Temperaturverläufe wieder deutlich und erreichen wieder ca.  $-12^{\circ}\text{C}$  (siehe Abbildung 7)

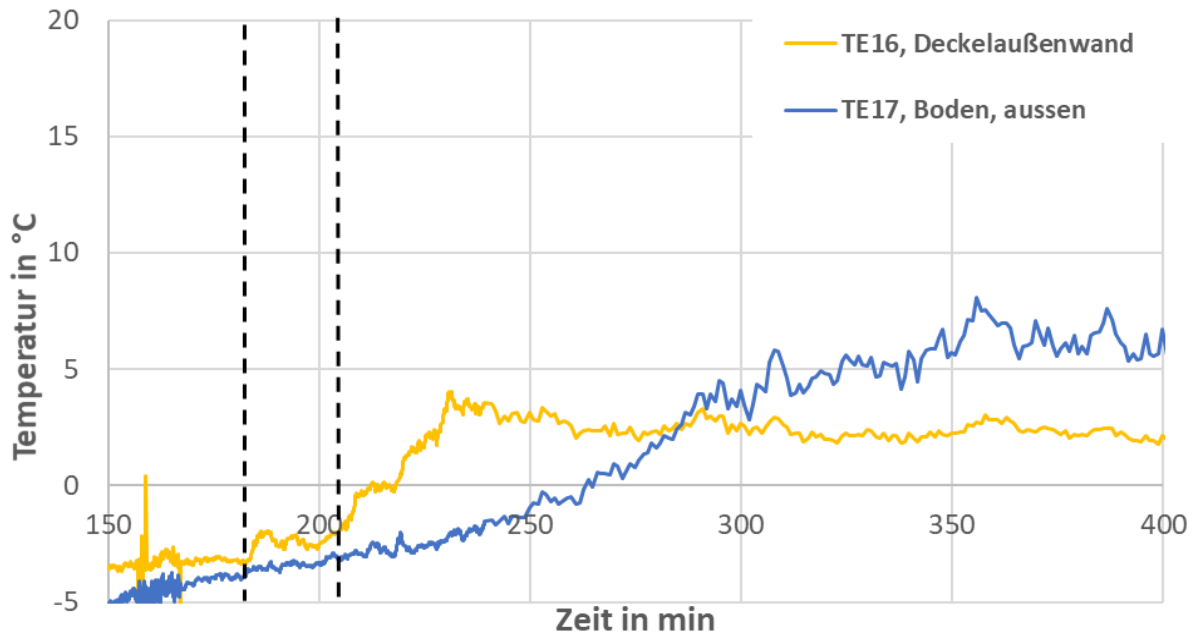


Abbildung 7: Verlauf der Temperaturen am Deckel und Boden Außenbehälter innerhalb der Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des ersten (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Aus den Daten der Langzeitmessungen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Abbildung 8) sind auch die Tages- und Nachtwechsel sehr deutlich zu erkennen.

Während der Bestrahlung durch die Sonne und den ansteigenden Umgebungstemperaturen zeigte sich ein deutlicher Temperaturanstieg an TE16, dabei wurde eine maximale Temperatur von 12°C erreicht. Da sich T17 sich im Schatten befand, lagen die Temperatur am nächsten Tag immer unter 0°C. Dies zeigt, dass ein wesentlicher Einfluss der Umgebungstemperaturen auf die Temperatur an der Messstelle T17 vorlag.

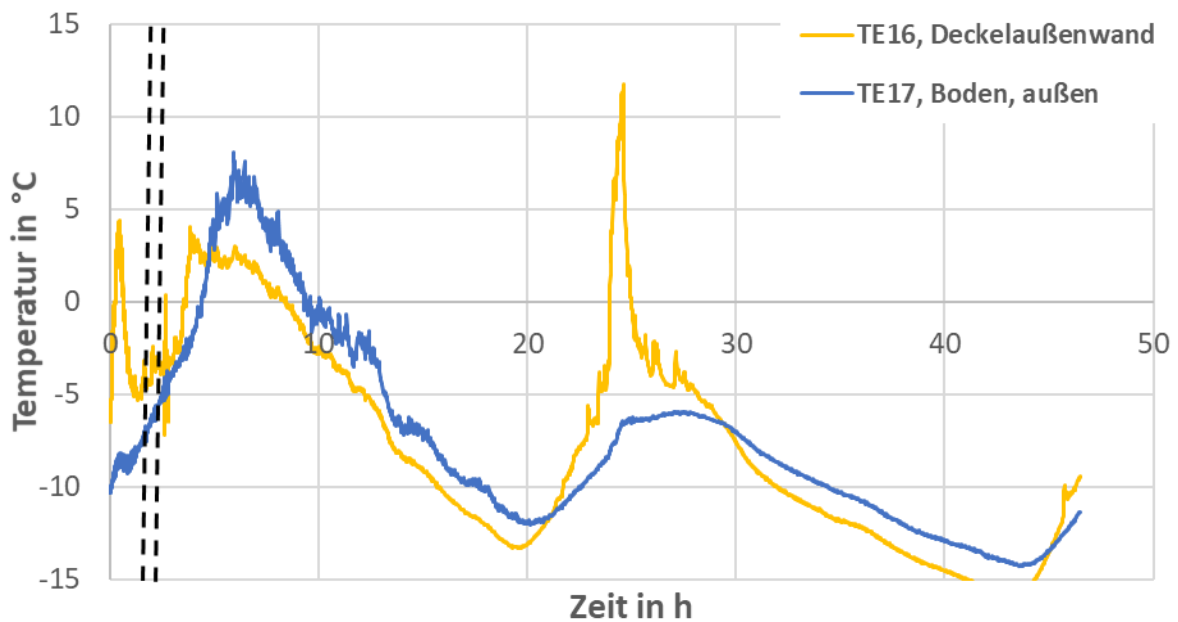


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen am Deckel und Boden Außenbehälter über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung nach etwa (46,5 h). Die senkrechten

Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des ersten Moduls (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Tabelle 5: Durch Temperaturmessstreifen ermittelte Maximaltemperaturen an den Außenflächen der Behälterwände und des Behälterdeckels

Position	ausgelöstes Temperaturfeld	Maximaltemperatur
vordere Behälterwand	< 40°C	40 °C ≤ T < 43 °C
rechte Behälterwand	< 40°C	40 °C ≤ T < 43 °C
hintere Behälterwand	< 40°C	40 °C ≤ T < 43 °C
linke Behälterwand	< 40°C	40 °C ≤ T < 43 °C
Deckel	< 40°C	40 °C ≤ T < 43 °C

### Ergebnisse der Temperatur an Behälterinnenwände

Die Temperaturverläufe der Messstellen an den Behälterinnenflächen veränderten sich erst mit der ersten Modulreaktion. An der Behälterinnenwand stieg ab 195. Versuchsminute bei T<sub>2</sub> (im linken Bereich) auf ca. 149 °C, T<sub>3</sub> (im vorderen Bereich) auf ca. 145 °C, T<sub>4</sub> (im linken Bereich) auf ca. 216°C und T<sub>5</sub> °C (im linken Bereich, mitte) auf ca. 272 °C an (siehe Abbildung 9). Dieser Temperaturanstieg ist geprägt durch den Gasausstoß ausgehend von der ersten Reaktion des ersten Moduls. Dadurch, dass die Temperaturen von T<sub>4</sub> und T<sub>5</sub> in diesem Zeitraum wesentlich höher waren, als die der anderen Behälterinnenwände, wird deutlich, dass hier die ausströmenden Reaktionsgase an der Behälterinnenwand im linken Bereich zu einer Wärmeeinwirkung geführt haben müssen. Zu diesem Zeitpunkt kam es zu einem deutlichen Temperaturabfall bei TE<sub>4</sub> um ca. 86°C und TE<sub>5</sub> um ca. 160,71°C innerhalb von 2 min (Abbildung 9). Nach der ersten Reaktion des 1. Moduls stiegen alle Temperaturwerte der Innenwände weiter an, verursacht durch die freigesetzte Wärmeenergie, welche sich im Inneren des Behälters ausbreitete. Ab der 210. Versuchsminute konnten erneut deutliche Temperaturanstiege an TE 2 und TE 3 beobachtet werden, was zeigt, dass hier noch nicht alle Zellen des ersten Moduls durchreagiert haben. T<sub>2</sub> erreichte dabei ca. 361 °C in der ca. 206 Versuchsminute und T<sub>3</sub> erreichte seine Maximaltemperatur von rund 526 °C in der 215. Versuchsminute.

Zu diesem Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass das Modul 1 vollständig durchreagiert hat. Während T<sub>4</sub> und T<sub>5</sub> erreichten die Werte von ca. 200 °C in der 205. Versuchsminute und T<sub>5</sub> den Wert von ca. 235 °C in der 205. Versuchsminute, was den gerichteten freigesetzten Gasstrom verdeutlicht.

Nach dem Einsetzen der Thermal Runaway Reaktion am zweiten Moduls, in der 218. Versuchsminute, stiegen die Temperaturen an T<sub>2</sub>, T<sub>4</sub> und T<sub>5</sub> nochmals deutlich an. Dabei erreichte T<sub>2</sub> eine maximale Temperatur von rund 400°C, T<sub>4</sub> von rund 500°C und TE<sub>5</sub> von rund 324 °C (Abbildung 9)

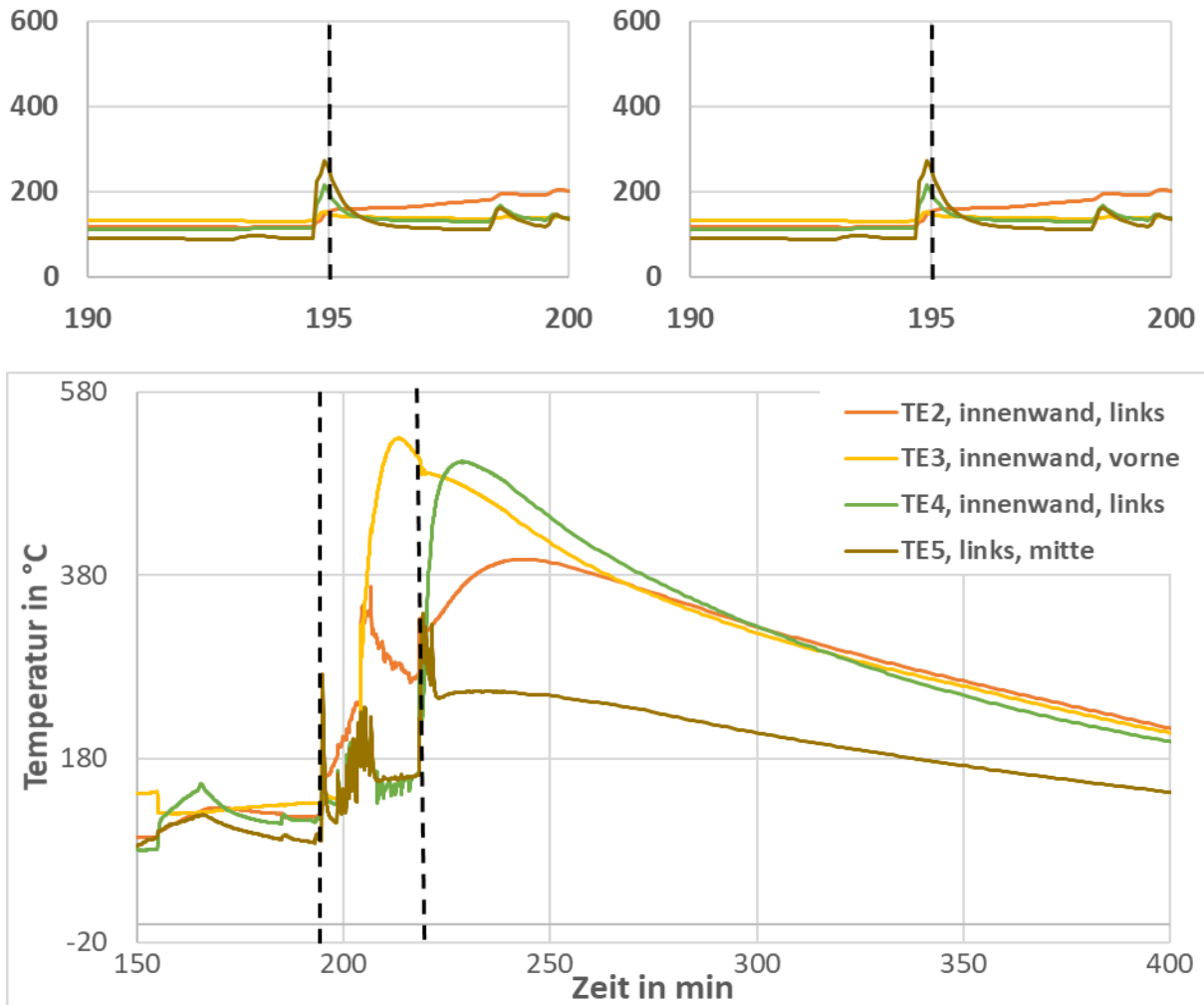


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen von am Behälterinnenwand innerhalb Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des ersten (links) und des zweiten Moduls (rechts)

Nach dem Ausregieren der Module stellen sich fallende Temperaturverläufe an den Behälterinnenwänden ein, da die Wärmeenergie nach außen abgegeben wird und zur Erwärmung der Außenwandbereich führt (siehe Abbildung 10). Nach etwa 23 h unterschritten die Innenwände Temperaturen von 0 °C, was zeigt, dass das der Wärmetransport nach außen nahezu vollständig abgeschlossen war und die Umgebungsbedingungen dominierten. Zum Versuchsende (nach 46,5 h) lagen die Temperaturen an den Innenwänden bei rund -13 °C (Abbildung 10).

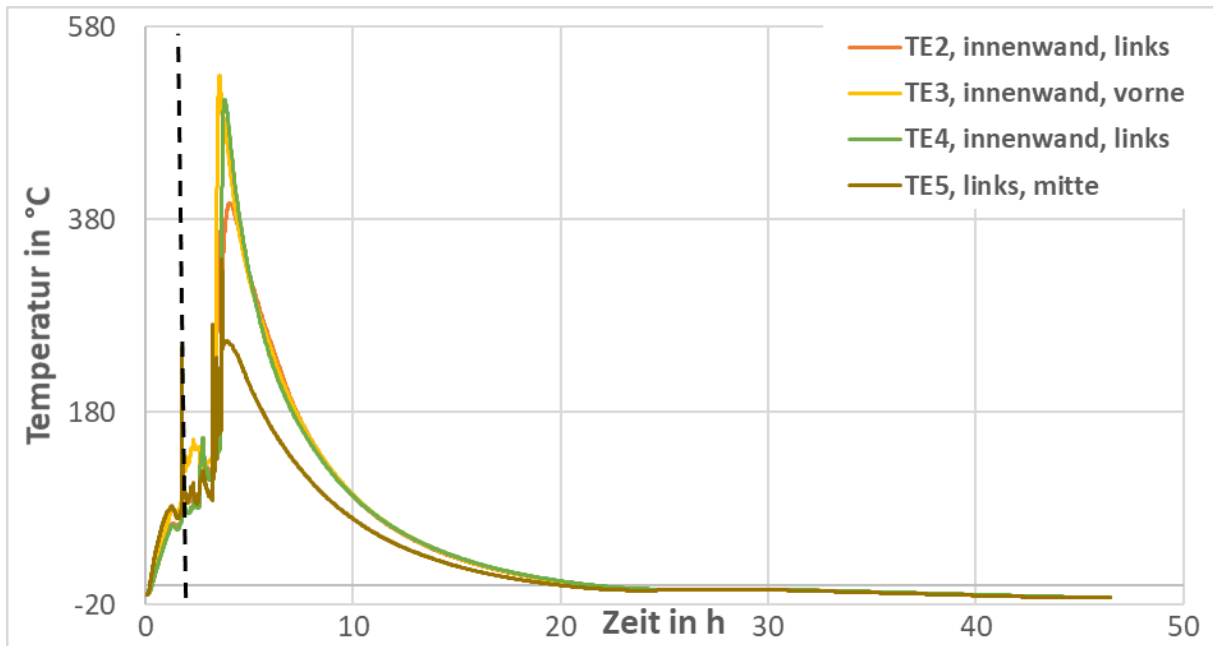
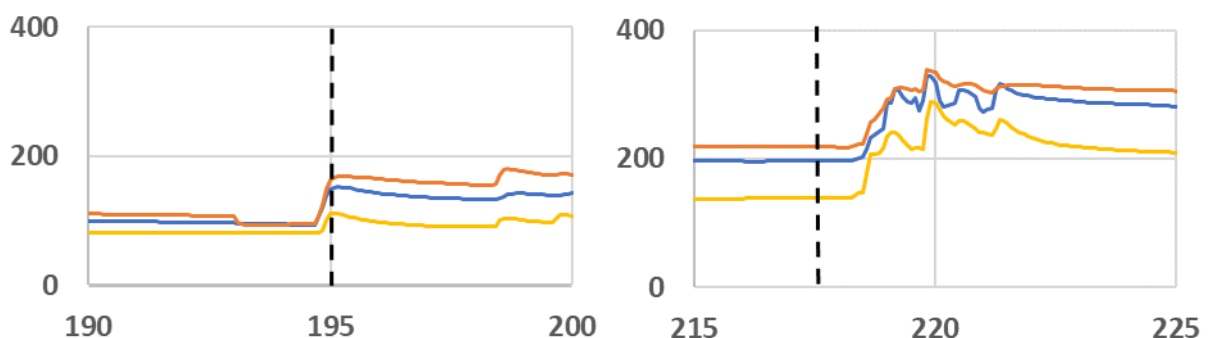


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälterinnenwänden über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung nach (46,5 h). Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des Moduls 1 und des Moduls 2

Ein ähnlicher Temperaturverlauf, wie an den Innenwänden, stellte sich auch für die Messungen am Boden und Deckel des Innenbehälters dar ( $T_{10}$ ,  $T_{11}$  und  $T_{20}$ ). Durch die erste Reaktion des ersten Moduls ab 195. Versuchsminute und damit verbundenen Gasausstoß in Richtung Behälterdeckel und Wärmetransport in Richtung Behälterboden stiegen die Temperaturen an Deckelinnenseite  $T_{11}$  auf rund 151 °C und  $T_{20}$  auf ca. 162 °C und an Behälterboden auf ca. 112 °C. Nach dem Ausreagieren des ersten Moduls stiegen die Temperaturwerte der Innenwände  $T_{10}$  (von ca. 95 °C auf ca. 142 °C),  $T_{11}$  (von ca. 150 °C auf ca. 200 °C) und  $T_{20}$  (von ca. 160 °C auf ca. 250 °C) erneut an, verursacht durch die freigesetzte Wärmeenergie, welche sich im inneren des Behälters ausbreitete. Zu diesem Zeitpunkt kann sehr gut aus dem gezackten Temperaturanstiege zwischen den gestrichelten Linien in Abbildung 11 sehen, dass das Modul 1 Zelle für Zelle reagierte. Ab der 206 Versuchsminute treten keine oszillierenden Werten auf, bis das zweite Modul thermisch reagierte.

Die Reaktion des zweiten Moduls verursacht einen weiteren Temperatursprung (ab 218. Versuchsminute) an allen hier betrachteten Temperaturmessstellen. Nach dem Ausreagieren der beiden Modulen erreichte  $T_{10}$  seine maximale Temperatur von ca. 286,5 °C,  $T_{11}$  von ca. 328 °C und  $T_{20}$  von ca. 338 °C (Abbildung 11). Im Anschluss sind die Temperaturverläufe vom Wärmetransport nach außen geprägt, so dass sich bis zum Aufzeichnungsende ein fallender Verlauf einstellte. Nach etwa 46,5 h lagen  $TE_{10}$ ,  $TE_{11}$  und  $TE_{20}$  bei rund -12,82 °C (Abbildung 12).



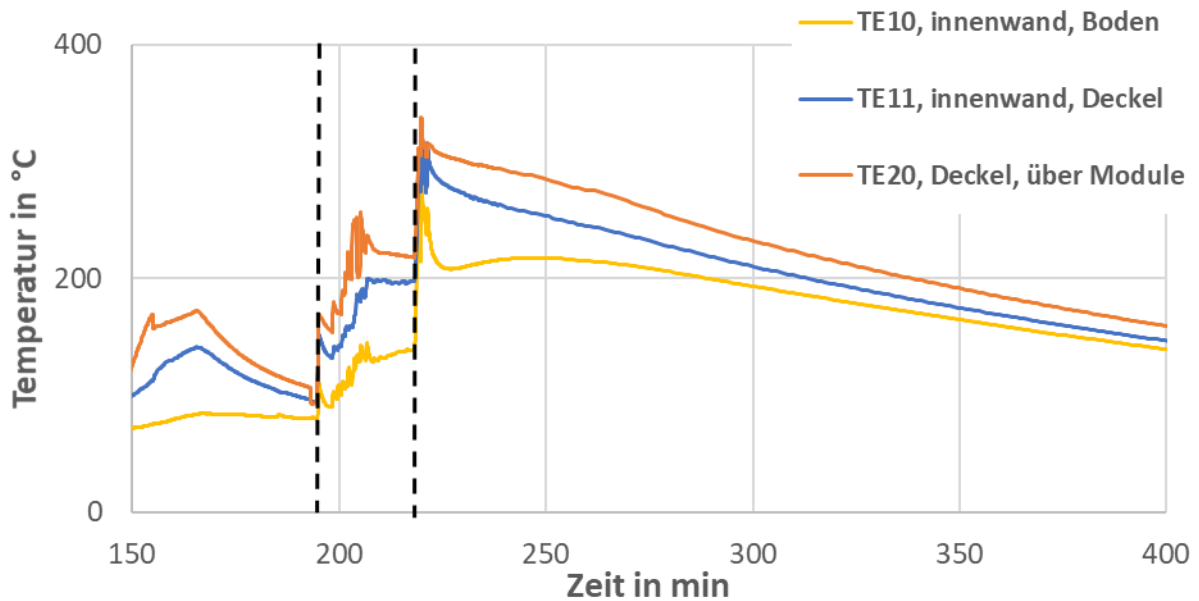


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen von am Behälterinnenwand innerhalb Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des Moduls 1 (links) und des Moduls 2 (rechts).

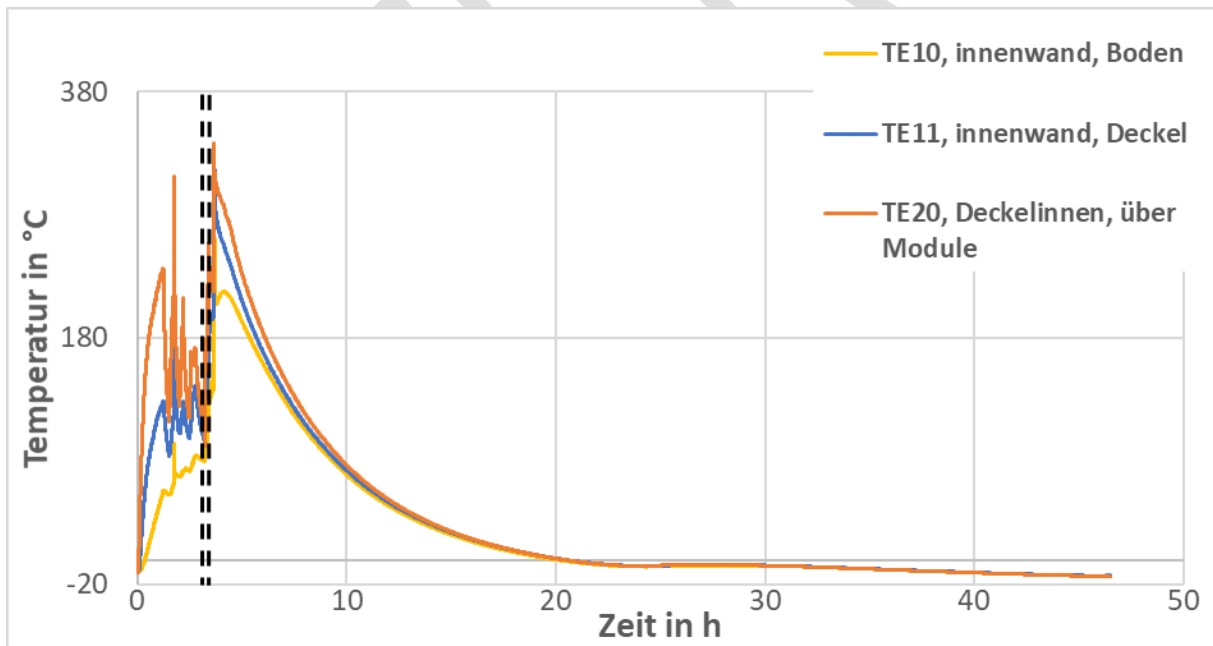


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälterinnenwänden über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung nach (46,5 h). Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des Moduls 1 (links) und des Moduls 2 (rechts).

Abbildung 13 zeigt die Temperaturverläufe der inneren Seitenwände, welche durch ausströmenden Reaktionsgase ausgehend von den reagierenden Modulen geprägt sind. Es wurden Temperaturmessstellen TE<sub>6</sub>, TE<sub>7</sub> und TE<sub>8</sub> (in der Kabeldurchführung) an den Behälterinnenwänden weit von den beiden Module angebracht. Durch die Reaktion des ersten Moduls 1 (vorne) ab der 195.

Versuchsminute und damit verbundenen Gasausstoß stiegen die Temperaturen an den Behälterinnenwänden und damit an dem Messstellen TE<sub>6</sub> auf rund 175 °C, TE<sub>7</sub> auf rund 127°C und TE<sub>8</sub> auf rund 117 °C an (siehe Abbildung 13). Dieser Temperaturanstieg ist geprägt durch die Reaktion des ersten Moduls. Dadurch, dass die Temperaturen von T<sub>6</sub> in diesem Zeitraum wesentlich höher war als die der anderen Behälterinnenwände wird deutlich, dass hier die ausströmenden Reaktionsgase an der Behälterinnwand im vorderen Bereich zu einer Wärmeeinwirkung geführt haben müssen. In der 196. Versuchsminute kam es zu einem deutlichen Temperaturabfall an TE<sub>6</sub> und TE<sub>7</sub> und TE<sub>8</sub> um ca.105 K innerhalb von 2 min.

Ab der 197 Versuchsminute bis zur Reaktion des zweiten Moduls stellten sich Temperaturanstiege T<sub>6</sub> (von ca. 106°C auf ca. 200 °C), T<sub>7</sub> (von ca. 106°C auf ca. 160°C) und T<sub>8</sub> (von ca. 106°C auf ca. 152 °C) ein (siehe Bereich zwischen den gestichelten Linien in der Abbildung 13). Diese Temperaturanstiege bis zur 208 Versuchsminute zeigen, dass das Modul 1 in mehreren Phasen (Zelle für Zelle) reagierte. Ab 210. bis 218. Versuchsminute sind die Werte nahezu gleichbleibend, was zeigt, dass das Modul 1 ausreagiert war.

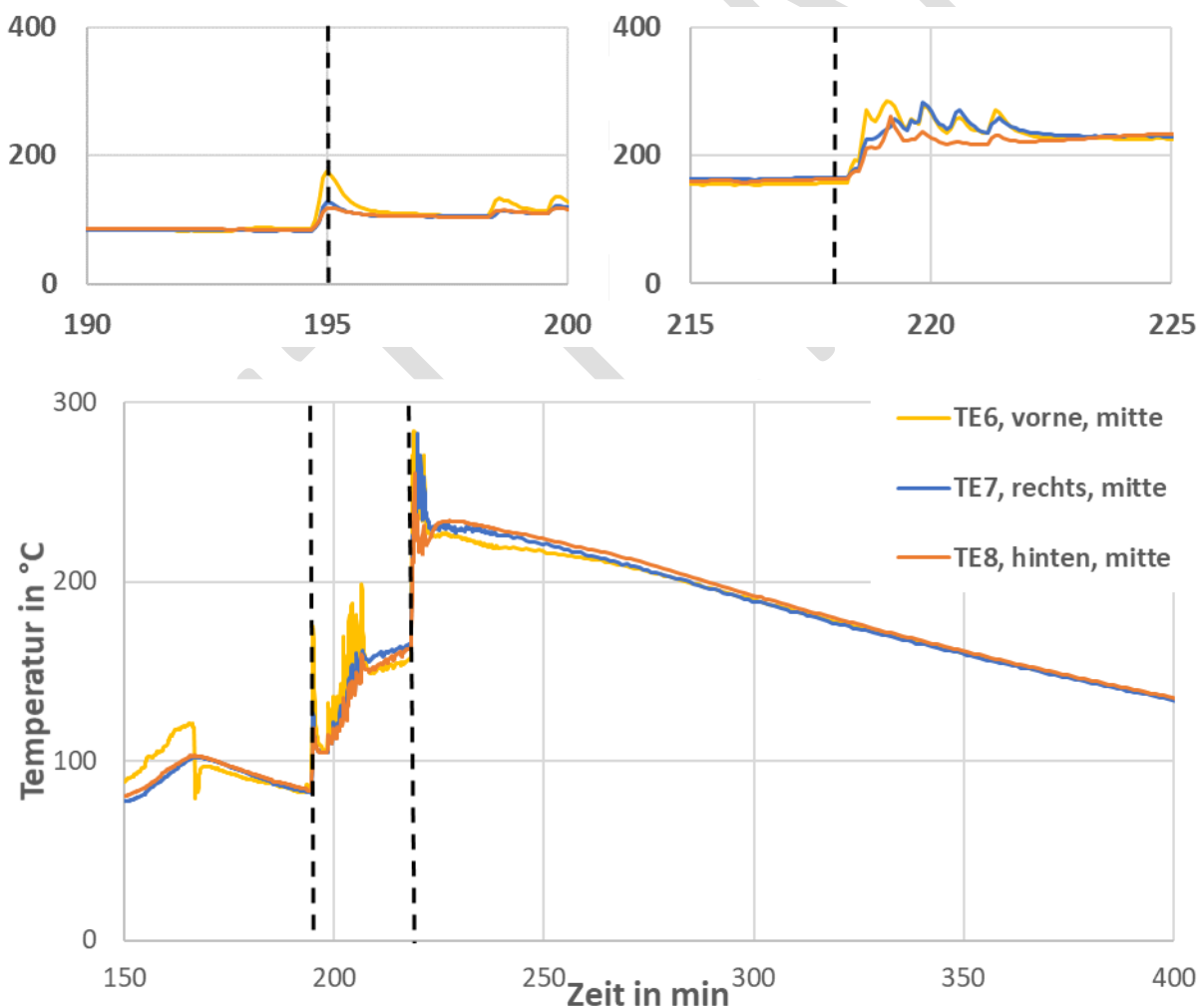


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälterinnenwänden von Module entfernt innerhalb Laufzeit von 400 min. Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermals Runaways des Moduls 1 (links) und des Moduls 2 (rechts).

Nach der Reaktion des zweiten Moduls in der 218. Versuchsminute stiegen die Temperaturen an TE<sub>6</sub>, TE<sub>7</sub> und TE<sub>8</sub> an. Dabei erreichte TE<sub>6</sub>, nach einer Minute, eine maximale Temperatur von ca. 283 °C, TE<sub>7</sub> erreichte ca. 283 °C und TE<sub>8</sub> rund. 261 °C. Dieser Temperaturanstieg ist geprägt durch den Gasausstoß ausgehend von der Reaktion des zweiten Moduls (siehe Abbildung 13), was ebenfalls durch die deutliche oszillierenden Werten innerhalb von 6 min ersichtlich ist.

Die Temperaturverläufe der Langzeitmessung der Behälterinnenwände (Abbildung 14) zeigen, dass die erwärmten Innenwände ihre Wärmeenergie durch Wärmeleitung nach außen abgaben, so dass sich ein einfallender Temperaturverlauf einstellte. Nach ca. 20 h lagen die Innenwandtemperaturen bei unter 0 °C. Es dominierte weiterhin die Wärmeabgabe nach außen, so dass zum Versuchsende, nach etwa 46,5, die Temperaturen bei rund -12,82 °C lagen.

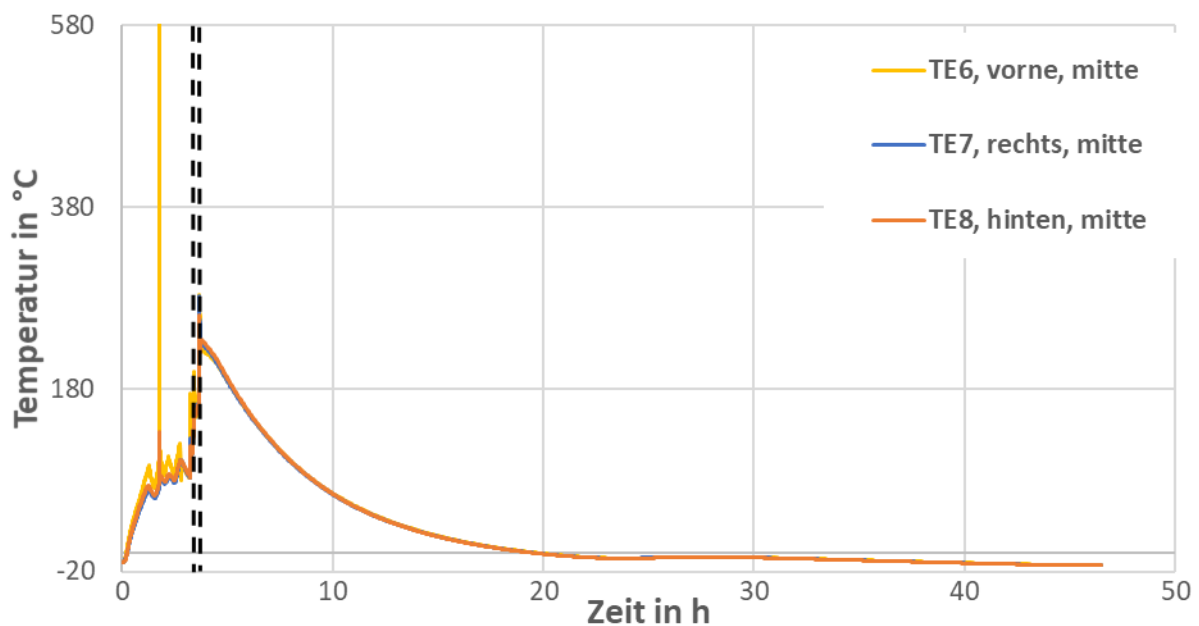


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Behälterinnenwänden von Batterie entfernt über den gesamten Zeitraum der Messdatenaufzeichnung nach (46,5 h). Die senkrechten Strichlinien markieren das Einsetzen des Thermal Runaways des Moduls 1 (links) und des zweiten Moduls (rechts).

## 5. Zusammenfassung und Fazit

Im vorliegenden wurde eine experimentelle Untersuchung des thermischen durchgehendes zweier Golf GTE Module in einer Storage Box 280.

Die Versuchsergebnisse zeigen:

- Die Module haben augenscheinlich thermisch reagiert
- Reaktionsgase wurden aus Kabeldurchführung an der Behälterrückseite sowie aus Deckeldichtung nach außen abgegeben
- Temperaturen der Behälteraußenwände sowie der Außenseite des Deckels und Bodens lagen unter 40 °C bis zum Versuchsende.
- Die Temperatur der Außenbehälterflächen sind deutlich unter 100 °C geblieben. Dies zeigt, dass die Doppelwandkonstruktion (bzw. Deckel mit Korb, PyroBubbles-Schicht 6 cm) die Außenflächen effektiv vor dem direkten Einfluss der Reaktionsgasfreisetzung (maximalen Temperatur von 526°C) schützt und die wesentlichen Temperaturerhöhungen ausschließlich durch den Warentransport von innen nach außen verursacht werden (maximale Temperatur von 32 °C)
- Keine Austritte von Flammen oder Bruchstücken