

WHITEPAPER



BATTERIEN UNTER FEUER

WARUM PRÄZISE ÜBERWACHUNG LEBEN RETTEN KANN

Der Schlüssel zur Vermeidung von Bränden und thermischen Katastrophen



WHITEPAPER

BatteryMonitor

Revolutionäre Überwachung für maximale Sicherheit
Innovative Lösungen für die Überwachung und Kühlung kritischer Energiespeicher

Version 1.02
Datum 08. September 2026
Autor Dr. Peter Geigle



MAHA SE & Co. KG
Hoyen 20
87490 Haldenwang | Germany

KAPITEL

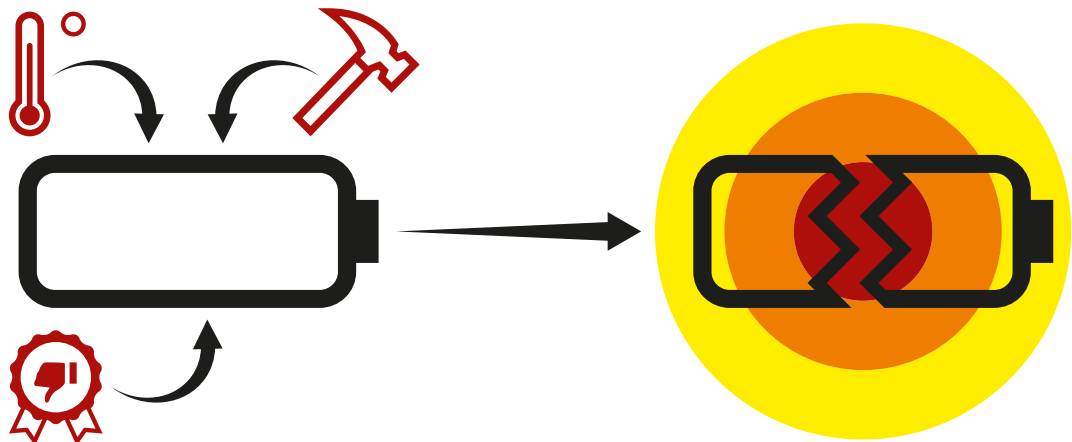
1	Einleitung.....	4
2	Problemstellung	5
3	Optimierte Temperaturkontrolle	6
3.1	Grundlagen zu Lithium-Ionen-Batterien	7
3.2	Physikalische Grundlagen der Wasserkühlung	8
3.3	Berechnungen zur Effizienz der Wasserkühlung	9
3.4	Vergleich: Temperaturmessung mit Wasserkreislauf vs. Außenmessung	9
3.4.1	Temperaturmessung mit Wasserkreislauf (z. B. BatteryMonitor).....	10
3.4.2	Temperaturmessung außen an der Batterie	10
3.4.3	Vergleich der Ergebnisse	11
3.5	Beispielszenario: Vergleich der Temperatur-überwachung mit und ohne Wasserkreislauf	11
4	BatteryMonitor	14
5	Anwendungen.....	15

1 EINLEITUNG

Lithium-Ionen-Batterien sind essenzielle Komponenten moderner Energiesysteme und treiben die Elektrifizierung in zentralen Bereichen wie Elektromobilität, stationären Energiespeichern und industriellen Anwendungen maßgeblich voran. Mit ihrer hohen Energiedichte, langen Lebensdauer und herausragenden Leistungsfähigkeit bilden sie einen Schlüsselbaustein der Energiewende. Ihre technische Komplexität und die damit verbundenen sicherheitsrelevanten Herausforderungen erfordern jedoch ein tiefgehendes Verständnis für ihren Betrieb [1, 2]. Eine zuverlässige Überwachung ist entscheidend, um die Betriebssicherheit dieser Systeme zu gewährleisten [19]. Die Brandgefahr durch Lithium-Ionen-Batterien ist mittlerweile durch spektakulären und große Schadensereignisse überall bekannt.

Bedeutung der Batterieüberwachung für Sicherheit

Die steigende Verbreitung und stetig steigende Größe und Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien hat die Anforderungen an Sicherheitsstandards und Überwachungssysteme erheblich erhöht. Besonders in der Elektromobilität und in stationären Energiespeichern bergen große Energiemengen potenzielle Risiken, die durch kleine Defekte, wie Kurzschlüsse oder mechanische Schäden, ausgelöst werden können. Szenarien wie ein thermisches Durchgehen (Thermal Runaway) stellen eine der kritischsten Gefahren dar und können durch Überhitzung, mechanische Einwirkung oder interne Zellfehler entstehen [19, 20].



Frühzeitige Erkennung und präventive Maßnahmen sind entscheidend, um die Lebensdauer von Batterien zu verlängern und das Brandrisiko und die daraus resultierenden Gefahren zu reduzieren.

Effiziente Überwachungssysteme leisten einen doppelten Beitrag zur Nachhaltigkeit: Zum einen minimieren sie durch Prävention von Batteriebränden die Freisetzung giftiger Stoffe und umweltbelastender Emissionen. Zum anderen maximieren sie die Nutzung jedes Batteriesystems, was Materialbedarf und Abfall signifikant reduziert [5, 6].

Herausforderungen durch unsachgemäße Kühlung und Überwachung

Die Überwachung der Batterietemperatur ist eine der zentralen Herausforderungen. Konventionelle Methoden beschränken sich oft auf die Messung der Oberflächentemperatur. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Batterien führt dies zu einer verzögerten Detektion innerer thermischer Probleme [3, 4].

Moderne Systeme wie BatteryMonitor setzen auf innovative Lösungen, die eine präzise Überwachung in nahezu Echtzeit ermöglichen. Durch den Einsatz eines geschlossenen Wasserkreislaufs in Kombination mit hochsensiblen Sensoren können Hotspots und thermische Instabilitäten effektiv verhindert werden. Gleichzeitig wird die Sicherheit erhöht und die Leistung der Batterien optimiert [6, 18].

Schlussfolgerung

Die Überwachung von Lithium-Ionen-Batterien über den gesamten Lebenszyklus ist weit mehr als eine technische Herausforderung. Mit innovativen Lösungen wie dem BatteryMonitor-System können nicht nur Sicherheitsrisiken minimiert, sondern auch die Lebensdauer und Effizienz von Batterien nachhaltig verbessert werden. Dies stellt einen erheblichen Nutzen für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft dar [19, 20].

2 PROBLEMSTELLUNG

Die zunehmende Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien in kritischen Anwendungen wie Elektromobilität und stationärer Energiespeicherung bringt erhebliche Herausforderungen mit sich. Die thermische Stabilität dieser Energiespeicher ist ein zentraler Sicherheitsfaktor, da bereits kleine Defekte in einer Batteriezelle potenziell katastrophale Folgen haben können. Ohne ein effektives Thermomanagement steigt das Risiko von Überhitzung und thermischem Durchgehen (Thermal Runaway) erheblich, was die Dringlichkeit präziser Überwachungssysteme unterstreicht [18, 19].

Thermomanagement als Schlüsselproblem

Lithium-Ionen-Batterien reagieren äußerst empfindlich auf Temperaturveränderungen. Mechanische Beschädigungen, Überladung, interne Kurzschlüsse oder Alterungsprozesse können zu lokalen Überhitzungen führen. Ohne ein System zur effektiven Temperaturkontrolle bleiben diese Probleme unentdeckt, bis es zu spät ist. Die innere Struktur der Batterie verstärkt dieses Risiko: Aufgrund ihrer hohen Masse und geringen Wärmeleitfähigkeit erreichen gefährliche Temperaturen zunächst die Zellkerne, bevor sie an der Oberfläche erkennbar werden [4, 6].

Diese Trägheit erschwert die frühzeitige Identifikation kritischer Zustände und kann dazu führen, dass sich ein lokales Problem auf das gesamte Batteriesystem ausweitet. Eine unkontrollierte Temperaturentwicklung – auch bekannt als Thermal Runaway – ist häufig der Ausgangspunkt für Kettenreaktionen, die nicht nur die Batterie selbst, sondern auch angrenzende Anlagen gefährden [1, 22].

Folgen von Batteriebränden

- **Hohe Kosten durch Infrastruktur- und Fahrzeugschäden:** Ein Batteriebrand verursacht oft erhebliche wirtschaftliche Schäden. Fahrzeuge, die von thermischer Instabilität betroffen sind, gelten in der Regel als irreparabel. Auch die umliegende Infrastruktur – Lagerhallen, Werkstätten oder Transportmittel – wird häufig stark beeinträchtigt. Beispiele wie der Brand eines Elektrobus-Depots in Stuttgart, bei dem das Depot zerstört wurde, verdeutlichen die Tragweite solcher Vorfälle. Aufgrund der erhöhten Brandgefahr gelten schon heute spezielle Vorschriften im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien [19, 25].
- **Umweltrisiken durch giftige Gase und belastetes Löschwasser:** Die chemischen Bestandteile von Lithium-Ionen-Batterien setzen im Brandfall gefährliche Stoffe frei. Giftige Gase belasten die Umgebungsluft, während kontaminiertes Löschwasser langfristige Schäden an Böden und Gewässern verursachen kann. Dies führt nicht nur zu Umweltbelastungen, sondern auch zu erhöhten Entsorgungskosten und strengen regulatorischen Anforderungen. Zudem können verbrannte Batterien nicht recycelt werden, was ihren Beitrag zur Kreislaufwirtschaft vollständig untergräbt. Zudem gilt der Bereich als konterminiert und es gilt die TRGS 524 "Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen" [7, 18,25].
- **Gefahr für Menschenleben:** Die unvorhersehbare Entwicklung von Batteriebränden macht sie besonders gefährlich für Menschen. Ein Thermal Runaway kann plötzlich und mit hoher Intensität auftreten, was die Brandbekämpfung erschwert. Herkömmliche Löschsysteme, wie Sprinkleranlagen, sind oft nicht in der Lage, Batteriebrände effektiv zu kontrollieren, da diese ihre eigene Energiequelle mitbringen. Dies gefährdet sowohl Einsatzkräfte als auch Mitarbeiter in Werkstätten, Lagern oder Transportunternehmen erheblich [9, 12].

Schlussfolgerung

Die Risiken von Lithium-Ionen-Batterien ohne effektives Thermomanagement und präzise Überwachung sind zu groß, um sie zu ignorieren. Batteriebrände stellen nicht nur eine Bedrohung für wirtschaftliche Werte und die Umwelt dar, sondern gefährden auch Menschenleben. Dies unterstreicht die Notwendigkeit innovativer Überwachungslösungen wie BatteryMonitor, die durch präzise Temperaturkontrolle und frühzeitige Warnungen zur Vermeidung dieser Szenarien beitragen können [1, 20].

3 OPTIMIERTE TEMPERATURKONTROLLE

Grundlagen zu Zelldefekten

Optimization study of a Z-type airflow cooling system of a lithium-ion battery pack [24]

In dieser Studie wird detailliert untersucht, wie die Energie in einem Fehlerfall freigesetzt wird und welche Parameter für die thermische Belastung eines Batteriesystems maßgeblich sind.

Die Berechnungen zeigen, dass bei einem typischen Szenario von zehn defekten Zellen etwa 65 % der gespeicherten elektrischen und chemischen Energie in Wärme umgewandelt werden. Diese Annahme bildet die Grundlage für die **Berechnung von 428,8 kJ**, die in der Analyse zur

Wasserkühlung verwendet wird. Diese Energie setzt sich aus der elektrischen und chemischen Energie einer einzelnen Batteriezelle zusammen.

Chemische Reaktionen bei hohen Temperaturen

Lithium-Ionen-Batterien sind komplexe elektrochemische Systeme, deren Stabilität bei Temperaturen **über 60 °C** kritisch wird.

Ab diesem Punkt beginnen sich die Elektrolyte zu zersetzen, was eine Kettenreaktion exothermer Prozesse auslöst. Diese Reaktionen führen zu einem Temperaturanstieg, der ein thermisches Durchgehen (Thermal Runaway) einleiten kann. Die Energiequellen sind:

- **Chemische Bindungsenergie:** Diese wird aus den Materialien der Zelle, insbesondere Kathodenmaterialien wie Lithium-Kobalt-Oxid und dem Elektrolyt, freigesetzt.
- **Elektrische Energie:** Die gespeicherte Energie der Zelle trägt ebenfalls zur Gesamtfreisetzung bei, wenn sie in Wärme umgewandelt wird [18, 19].

Energie während des thermischen Durchgehens

Während eines thermischen Durchgehens wird die gesamte gespeicherte Energie der Zelle freigesetzt, darunter:

- **Elektrische Energie:** Die Energie, die in der Batterie gespeichert ist, wird vollständig in Wärme umgewandelt.
- **Chemische Energie:** Zusätzlich treten stark exotherme chemische Reaktionen auf, insbesondere bei Materialien wie Lithium-Kobalt-Oxid (LiCoO), das bei hohen Temperaturen instabil wird und reagiert.

Energiebeispiele für eine 18650-Zelle

- **Elektrische Energie:** Eine typische 18650-Zelle (3.000 mAh, 3,6 V) enthält etwa 38,88 kJ an gespeicherter elektrischer Energie:
- **Chemische Energie:** Zusätzliche exotherme Reaktionen können 2–4 kJ freisetzen, abhängig von der Zellchemie und den Temperaturen über 60 °C.

Gesamte Energie:

Eine einzelne Zelle kann im thermischen Durchgehen bis zu 42–44 kJ freisetzen. In einem Batteriepack mit mehreren Zellen multipliziert sich diese Energie, was eine Kettenreaktion und massive Energieabgabe bewirken kann [4, 18].

3.1 GRUNDLAGEN ZU LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Warum Wasser als Medium für die Überwachung?

Die effektive Überwachung von Lithium-Ionen-Batterien ist eine Grundvoraussetzung für deren sicheren Betrieb. Aktuell werden Batterien im ausgebauten Zustand häufig ohne Wasserkühlung überwacht, was ein gravierender Fehler ist. Im eingebauten Zustand stellen die in modernen Fahrzeugen integrierten Batterie-Management-Systeme (BMS) oder Thermomanagementsysteme eine ausreichende Überwachung und Kühlung sicher. Doch sobald Batterien ausgebaut oder in einer Umgebung ohne aktive Systeme betrieben werden, treten erhebliche Risiken auf. Luft, die früher als Kühlmedium verwendet wurde, hat sich bereits vor Jahren als

ungeeignet erwiesen, insbesondere aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität [4, 5, 19].

Im Folgenden werden die technischen und physikalischen Grundlagen, quantitative Berechnungen sowie die spezifischen Vorteile des Kühlmittels "Wasser-Glycol" detailliert dargestellt.

Warum ist Kühlung notwendig?

Lithium-Ionen-Batterien sind temperaturempfindlich. Ein Temperaturanstieg über bestimmte Grenzwerte hinaus kann zu einem Zustand führen, der als thermisches Durchgehen bekannt ist. Ohne die Unterstützung eines BMS oder Thermomanagementsystems, wie es im verbauten Zustand vorhanden ist, steigt das Risiko signifikant. Besonders im ausgebauten Zustand, etwa während des Transports, der Lagerung oder Reparatur, fehlt häufig eine wirksame Temperaturkontrolle.

Die Überwachung und Kontrolle der Temperatur ist entscheidend, um:

- Die thermische Stabilität der Batterie zu erhalten.
- Schäden an einzelnen Zellen zu verhindern, die sich auf das gesamte Batteriesystem ausweiten könnten.
- Sicherheitsrisiken wie Brände und Explosionen zu vermeiden [1, 19].

Thermal Runaway – ein gefährlicher Prozess

Thermal Runaway tritt häufig bei Temperaturen von etwa 60 °C auf und wird ab 100 °C besonders kritisch. In diesem Zustand setzen chemische Reaktionen innerhalb der Batterie große Mengen Wärme frei, was die Temperatur weiter ansteigen lässt.

Ohne ein effektives Kühlmedium wie Wasser kann dieser Prozess innerhalb von Sekunden eskalieren und unkontrollierbare Schäden verursachen [18].

3.2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER WASSERKÜHLUNG

Wasser ist ein ideales Medium zur Temperaturkontrolle aufgrund seiner außergewöhnlichen thermischen Eigenschaften. Im Vergleich zu Luft bietet Wasser eine höhere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, was zu einer effizienteren Wärmeableitung führt.

Dies ist besonders wichtig für Batterien, die außerhalb eines Fahrzeugs oder Systems ohne aktives BMS betrieben werden [4, 5].

Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit

- **Wärmekapazität:** Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von 4,18 kJ/(kg·K), während die von Luft nur etwa 1,0 kJ/(kg·K) beträgt. Das bedeutet, dass Wasser etwa viermal mehr Energie aufnehmen kann, bevor seine Temperatur ansteigt [6].
- **Wärmeleitfähigkeit:** Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser liegt bei 0,6 W/(m·K), verglichen mit nur 0,025 W/(m·K) bei Luft. Dies ermöglicht eine schnelle und gleichmäßige Wärmeverteilung [4].

Gleichmäßige Temperaturverteilung

Ein geschlossener Wasserkreislauf sorgt für eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb eines Batteriesystems. Dies minimiert das Risiko von Hotspots, die als Ausgangspunkt für thermisches Durchgehen dienen können. Im Gegensatz dazu ist Luft als Kühlmedium aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften ineffizient und wurde bereits vor Jahren als ungeeignet erkannt [4, 5].

3.3 BERECHNUNGEN ZUR EFFIZIENZ DER WASSERKÜHLUNG

Temperaturänderung bei Wasserkühlung

$$\Delta T_{\text{Wasser}} = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{428,8}{10 \cdot 4,18} \approx 10,26 \text{ K}$$

Die Temperatur des Wassers steigt um etwa 10,26 °C [6].

Temperaturänderung bei Luftkühlung

$$\Delta T_{\text{Luft}} = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{428,8}{10 \cdot 1,0} = 42,88 \text{ K}$$

Die Temperatur der Luft steigt um etwa 42,88 °C [6].

Der Wert **Q von 428,8 kJ** stellen die gesamte Energie dar, die im Fehlerfall durch zehn fehlerhafte Batteriezellen freigesetzt wird. Siehe nächster Punkt.

3.4 VERGLEICH: TEMPERATURMESSUNG MIT WASSERKREISLAUF VS. AUSSENMESSUNG

Gegebene Daten für den Wasserkreislauf

- Masse des Wassers: 10 kg
- Spezifische Wärmekapazität von Wasser: 4,18 kJ/(kg·K)

Gegebene Daten für die Batterie

- Masse der Batterie : 500 kg
- Spezifische Wärmekapazität der Batterie: 1,0 kJ/(kg·K)
- Freigesetzte Energie einer Zelle: 42,88 kJ

Zusätzliche Annahmen

- Konstante Masse und Wärmekapazität: Es wird angenommen, dass die Masse und die spezifische Wärmekapazität der Medien (Wasser und Batterie) über den betrachteten Temperaturbereich konstant bleiben.
- Homogene Temperaturverteilung: Es wird davon ausgegangen, dass die Wärme gleichmäßig im Medium verteilt wird (keine lokalen Unterschiede in der Temperatur).
- Isolierte Umgebung: Es wird angenommen, dass keine Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

3.4.1 TEMPERATURMESSUNG MIT WASSERKREISLAUF (Z. B. BATTERYMONITOR)

Energiebedarf für Temperaturerhöhung

Bei 10 Litern Wasser sind nur 41,8 kJ erforderlich, um die Temperatur des Wassers um 1 °C zu erhöhen.

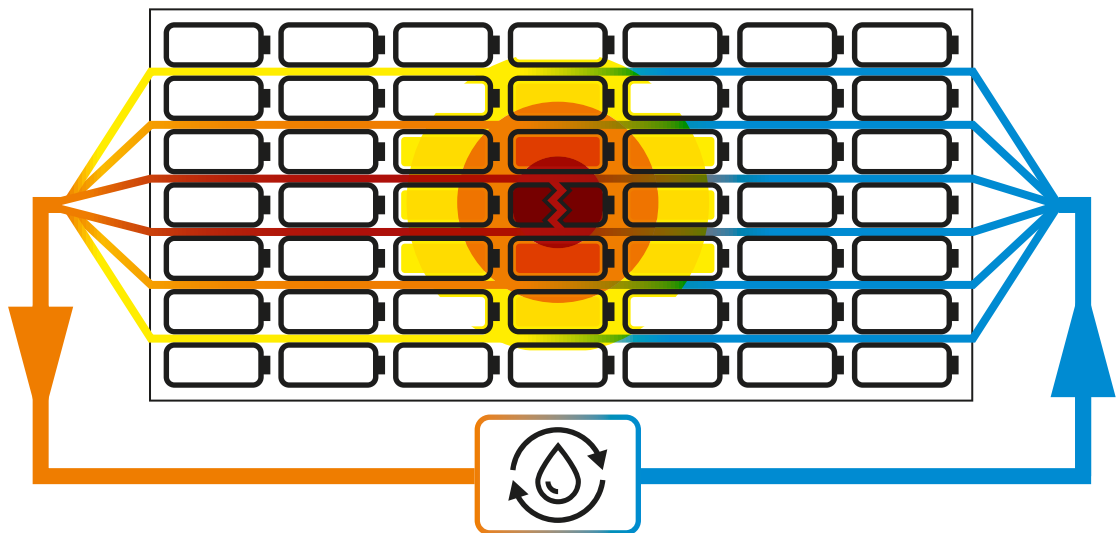
Berechnung: Temperaturänderung im Wasserkreislauf

Die Temperaturänderung wird durch folgende Formel berechnet:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

$$\Delta T_{\text{Wasser}} = \frac{42,88}{10 \cdot 4,18} \approx 1,03 \text{ K}$$

Ergebnis: Die Temperatur des Wassers steigt um 1,03 °C, wenn eine Zelle ihre maximale Energie abgibt.



3.4.2 TEMPERATURMESSUNG AUSSEN AN DER BATTERIE

Energiebedarf für Temperaturerhöhung:

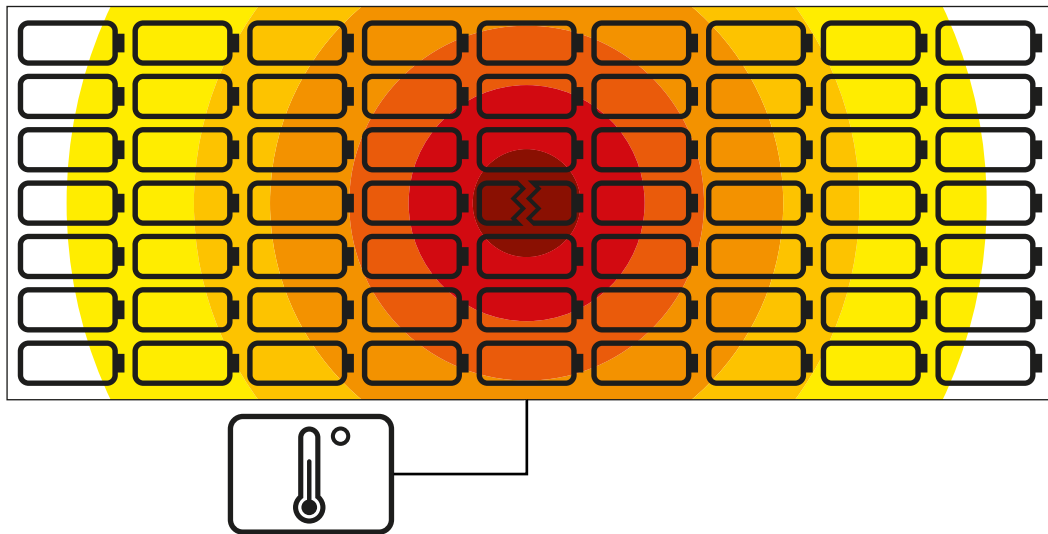
Die gesamte Batterie (Masse: 500 kg, Wärmekapazität: 1,0 kJ/(kg·K)) benötigt 500 kJ, um sich um 1 °C zu erwärmen.

Berechnung: Temperaturänderung ohne Wasserkreislauf

Grundlage bleibt unverändert:

$$\Delta T_{\text{Batterie}} = \frac{42,88}{500 \cdot 1,0} \approx 0,086 \text{ K}$$

Ergebnis: Die Temperatur der gesamten Batterie steigt um 0,086 °C, wenn eine Zelle ihre maximale Energie abgibt.



3.4.3 VERGLEICH DER ERGEBNISSE

Mit Wasserkreislauf:

- Die Temperaturänderung beträgt 1,03 °C, was eine schnelle und präzise Reaktion auf lokale Wärmequellen ermöglicht.
- Hotspots und kritische Zustände können nahezu in Echtzeit identifiziert werden.
- Dies ermöglicht eine effektive Überwachung und rechtzeitige Gegenmaßnahmen, um Schäden zu vermeiden.

Ohne Wasserkreislauf:

- Die Temperaturänderung beträgt lediglich 0,086 °C.
- Die große Masse der Batterie verteilt die freigesetzte Energie, wodurch die Temperatursteigerung minimal und langsam ist.
- Kritische Zustände, wie lokale Überhitzungen, können aufgrund der thermischen Trägheit leicht unentdeckt bleiben.
- Ohne einen Wasserkreislauf muss ein deutlich größerer Schaden vorliegen, um einen nennenswerten Temperaturanstieg zu erkennen.

3.5 BEISPIELSZENARIO: VERGLEICH DER TEMPERATUR-ÜBERWACHUNG MIT UND OHNE WASSERKREISLAUF

Ausgangssituation:

Ein Batteriepack mit 10 fehlerhaften Zellen setzt jeweils die maximale Energie von 42,88 kJ frei. Die Überwachung erfolgt einmal über einen Wasserkreislauf (z. B. BatteryMonitor) und einmal ohne Wasserkreislauf durch Außenmessung der gesamten Batterie.

Szenario 1: Mit Wasserkreislauf (BatteryMonitor)

- Masse des Wassers: 10kg
- Spezifische Wärmekapazität von Wasser: 4,18kJ/(kg\cdotpK)

- Temperaturdifferenz: $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ (Umgebung 25°C -> Alarm 60°C)
- Energiebedarf, um die Temperatur des Wassers von 25°C auf 60°C zu erhöhen:

$$Q_{\text{Wasser}} = m_{\text{Wasser}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T = 10 \cdot 4,18 \cdot 35 = 1.463 \text{ kJ}$$

Zeit bis zur Temperaturerhöhung auf 60°C

$$t = \frac{Q_{\text{Wasser}}}{Q_{\text{Zellen}}} = \frac{1.463}{428,8} \approx 3,41 \text{ Zeiteinheiten}$$

Szenario 2: Ohne Wasserkreislauf (Außenmessung)

- Masse der Batterie: 500kg
- Spezifische Wärmekapazität der Batterie: $1,0 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Temperaturdifferenz: $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ (Umgebung 25°C -> Alarm 60°C)
- Energiebedarf, um die Batterie von 25°C auf 60°C zu erwärmen:

$$Q_{\text{Batterie}} = m_{\text{Batterie}} \cdot c_{\text{Batterie}} \cdot \Delta T = 500 \cdot 1,0 \cdot 35 = 17.500 \text{ kJ}$$

Zeit bis zur Temperaturerhöhung auf 60°C

$$t = \frac{Q_{\text{Batterie}}}{Q_{\text{Zellen}}} = \frac{17.500}{428,8} \approx 40,81 \text{ Zeiteinheiten}$$

Zeiteinheiten und typische Dauert

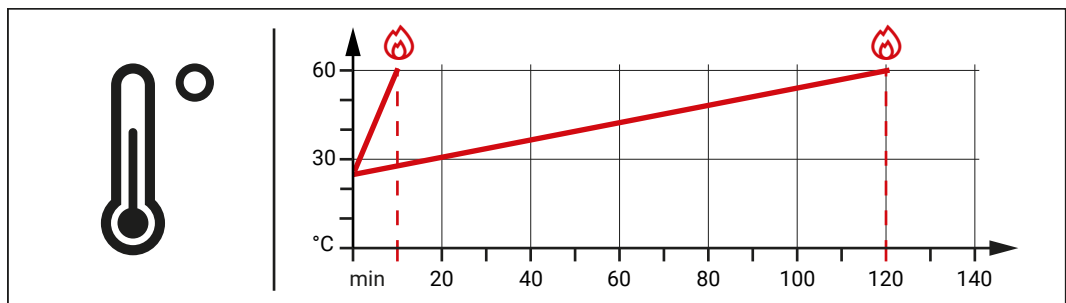
Die in den Berechnungen verwendeten Zeiteinheiten beziehen sich auf die Dauer, die eine defekte Zelle benötigt, um ihre maximale Energie von **42,88 kJ** freizusetzen. Diese Dauer variiert je nach Zellchemie und Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Druck). Für die Berechnungen wird angenommen, dass **1 Zeiteinheit** etwa **3 Minuten** entspricht.

Vergleich mit Berücksichtigung der Zeiteinheiten

Mit einem Wasserkreislauf beträgt die Zeit bis zur kritischen Temperaturerhöhung von **25°C auf 60°C nur etwa 10 Minuten** ($3,41 \text{ Zeiteinheiten} \times 3 \text{ Minuten pro Zeiteinheit}$).

Ohne Wasserkreislauf hingegen dauert es **über 2 Stunden** ($40,81 \text{ Zeiteinheiten} \times 3 \text{ Minuten pro Zeiteinheit}$), bis die gleiche Temperatur erreicht wird.

Während dieser Zeit müssen etwa **17.500 kJ Energie** freigesetzt werden – dies entspricht der maximalen Energie von **408 defekten Zellen**. Die durchschnittliche Leistungsabgabe beträgt in diesem Szenario etwa **2,4 kW**, was zeigt, dass **ohne Wasserkreislauf ein massiver Schaden entstehen muss**, bevor kritische Zustände überhaupt erkannt werden können.



Schlussfolgerung

- **Reaktionszeit:** Mit einem Wasserkreislauf wird die kritische Temperatur in unserem Szenario bereits **nach etwa 10 Minuten erkannt**, während dies **ohne Wasserkreislauf über 2 Stunden** dauert (siehe Abbildung 1). Das **wasserbasierte Messsystem reagiert somit bis zu 12-mal schneller** und ermöglicht eine wesentlich frühzeitigere Erkennung des kritischen Zustands.
- **Effizienz:** Systeme wie BatteryMonitor bieten eine deutlich schnellere und präzisere Überwachung, da die Wasserkühlung die Wärme sofort aufnimmt und die Temperaturentwicklung direkt reflektiert.
- **Sicherheit:** Insbesondere bei Batterien im ausgebauten Zustand oder ohne aktives Thermomanagementsystem ist der Einsatz eines Wasserkreislaufs unverzichtbar, um lokale Hotspots frühzeitig zu erkennen und Kettenreaktionen zu verhindern. Unser Szenario zeigt deutlich auf, wie groß der Thermische Schadensunterschied sein kann.

Kommentar

Die Berechnungen basieren auf einer linearen Fehlerentwicklung der Zellen, wobei bei exponentiellen Schadensentwicklungen beide Zeiten erheblich verkürzt werden. Dennoch bleibt der Vorteil der Wasserkreislaufmethode klar erkennbar: Sie reagiert schneller, erfordert weniger defekte Zellen zur Erkennung kritischer Zustände und wirkt durch das Wasser selbst als Puffer gegen eine Eskalation.

Zudem müssen weitere Effekte berücksichtigt werden, die die Messergebnisse beeinflussen: Die thermische Trägheit des Batteriegehäuses bei der Messung ohne Wasserkreislauf kann Temperaturänderungen verzögern und kritische Zustände verschleiern. Ebenso führt der Temperaturverlust des Wassers, das am Gehäuse vorbeifließt, zu einer leichten Abkühlung, die den Wärmeeintrag dämpfen kann. Obwohl diese Effekte in der Berechnung der Einfachheit halber nicht detailliert einbezogen wurden, sollten sie in der Praxis keinesfalls vernachlässigt werden.

4 BATTERYMONITOR

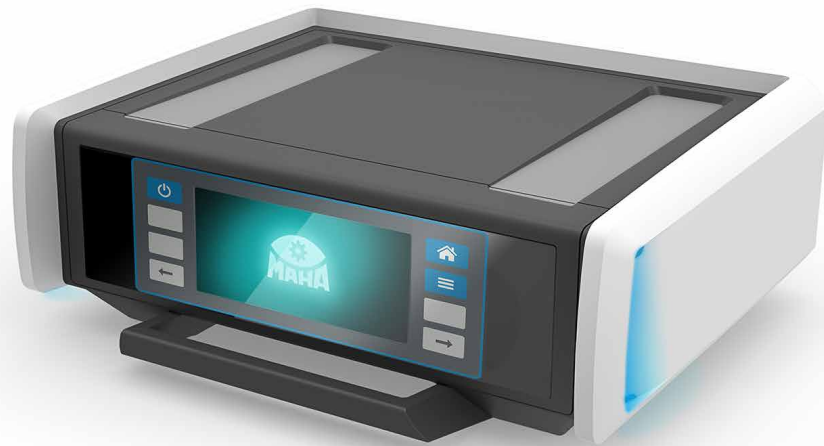


Abbildung 3: Designstudie BatteryMonitor

Beschreibung des Geräts

BatteryMonitor ist ein hochmodernes Überwachungsgerät, das speziell für die präzise Temperaturkontrolle und Sicherheitsüberwachung von Lithium-Ionen-Batterien entwickelt wurde. Es verwendet einen integrierten Wasserkreislauf, der ein Wasser-Glykol-Gemisch als Kühl- und Messmedium einsetzt [5, 18].

- **Eingebauter Wasserkreislauf:** Das Gerät verfügt über Zulauf- und Ablaufanschlüsse, die eine einfache Integration in geschlossene Kreisläufe ermöglichen, um Batterien oder andere Komponenten sicher zu überwachen.
- **Präzise Temperaturmessung:** Die kontinuierliche Überwachung des Kühlmediums ermöglicht eine frühzeitige Erkennung thermischer Veränderungen der Batterie [4, 6].
- **Pumpensteuerung:** Eine integrierte Pumpe, gesteuert durch ein PWM-Signal, sorgt für eine optimale Zirkulation des Kühlmediums.
- **Integrierte Sensorik:** Fortschrittliche Sensoren messen sowohl die Temperatur als auch den Durchfluss des Mediums, um eine zuverlässige Funktion des Systems sicherzustellen [5].

Einzigartige Funktionen

BatteryMonitor bietet eine Reihe innovativer Funktionen, die es von herkömmlichen Überwachungssystemen abheben:

- **Früherkennung von Hotspots:** Ein integriertes Alarmsystem erkennt kritische Temperaturspitzen frühzeitig, bevor es zu gefährlichen Zuständen wie thermischem Durchgehen kommt [6].
- **Steuerung externer Geräte:** Das System kann mit Kühlaggregaten oder Löschsystemen verbunden werden, die bei Bedarf automatisch aktiviert werden.
- **Patentertechnologie:** BatteryMonitor kombiniert Temperaturüberwachung, Durchflusskontrolle und Alarmmanagement in einem patentierten System, das speziell für geschlossene Batteriekreisläufe entwickelt wurde [7].

Technologieübersicht

BatteryMonitor vereint modernste Hardware mit benutzerfreundlicher Technologie, um einfache Bedienbarkeit und umfassende Funktionalität zu gewährleisten:

- **Touch-TFT-Display:** Ein intuitives Touchscreen-Interface ermöglicht die schnelle Konfiguration des Systems und die Darstellung aller relevanten Daten in Echtzeit [5].
- **Vernetzungsmöglichkeiten:** Das Gerät unterstützt Ethernet, Bluetooth und I/O-Schnittstellen für eine nahtlose Integration in andere Geräte und Systeme. Über ConnectCube.
- **Embedded-System:** Die Steuerung erfolgt über ein eingebautes Embedded-System, das hohe Präzision und Zuverlässigkeit bietet [6].

BatteryMonitor ist eine innovative Lösung, die Temperaturüberwachung, Kühlung und Sicherheit in einem Gerät vereint und somit ideal für den Einsatz in Werkstätten, Lagerstätten oder beim Transport von Lithium-Ionen-Batterien geeignet ist.

5 ANWENDUNGEN

BatteryMonitor ist eine vielseitige Lösung für die präzise Überwachung und Kühlung von Lithium-Ionen-Batterien und findet in verschiedenen Einsatzbereichen Anwendung. Dank seiner flexiblen Anpassungsmöglichkeiten bietet es höchste Sicherheit und Effizienz, insbesondere in den folgenden Szenarien [5, 6].

Werkstätten: Sicherheit für Batterien ohne integriertes Thermomanagement

BatteryMonitor überwacht ausgebauten Batterien, die kein integriertes BMS oder Thermomanagement besitzen.

- **Lagerung von Unfallbatterien:** Mechanisch beschädigte Batterien oder solche mit defektem Thermomanagement werden kontinuierlich überwacht, wodurch kritische Zustände frühzeitig erkannt werden [6].
- **Brandschutz:** Bei anormalen Temperaturen alarmiert das Gerät und steuert automatisch Kühlaggregate oder Löschvorrichtungen.
- **Dokumentation:** Protokollierte Messdaten dienen der Nachverfolgung der Lagerbedingungen und als Nachweis in Gewährleistungsfällen [7].

Transport und Lagerung: Minimierung von Risiken bei Temperaturänderungen

Beim Transport und der Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien ist BatteryMonitor eine zentrale Sicherheitsmaßnahme.

- **Transport beschädigter Batterien:** BatteryMonitor minimiert Überhitzungsrisiken bei beschädigten oder gebrauchten Batterien während des Transports [18].
- **Lagerüberwachung:** Batterien in Lagern werden auf externe und interne Temperaturveränderungen überwacht, um Brände oder Schäden zu verhindern.
- **Umweltschutz:** Frühe Erkennung thermischer Anomalien schützt vor Batteriebränden, die giftige Gase freisetzen und Umweltbelastungen verursachen könnten [19].

Stationäre Energiespeicherung: Schutz von Batterieeinheiten in Gebäuden

Für stationäre Batteriespeichersysteme bietet BatteryMonitor ideale Überwachungsmöglichkeiten.

- **Hotspot-Prävention:** Der Wasserkreislauf sorgt für gleichmäßige Temperaturverteilung und verhindert Überhitzung einzelner Zellen.
- **Schutz vor Dauerlastüberhitzung:** Automatische Steuerung von Kühlsystemen verlängert die Lebensdauer und Effizienz stationärer Speicher [5].
- **Kosteneinsparungen:** Präzise Überwachung reduziert die Notwendigkeit eines vorzeitigen Austauschs [7].

Forschung und Entwicklung: Optimierung von Batterie- und Kühlsystemen

In Laboren unterstützt BatteryMonitor Ingenieure und Wissenschaftler bei der Entwicklung innovativer Batteriesysteme.

- **Prototyp-Validierung:** Präzise Messungen identifizieren thermische Schwachstellen in Batterieprototypen [6].
- **Kühltechnologie-Tests:** Ingenieure optimieren neue Kühlsysteme basierend auf präzisen Daten [18].
- **Langzeitüberwachung:** Kontinuierliche Temperaturprotokolle liefern wertvolle Einblicke in die thermische Stabilität und Alterung von Batteriezellen [5].

Fazit

BatteryMonitor ist eine universelle Lösung für die Überwachung von Lithium-Ionen-Batterien. Ob in Werkstätten, beim Transport, in stationären Energiespeichern oder der Forschung, das Gerät gewährleistet höchste Sicherheit, minimiert Risiken und bietet die Grundlage für Innovationen in der Batterietechnologie [6, 7].

Quellenverzeichnis

- [1] **Hopp, H.**
Thermomanagement von Hochleistungs-
fahrzeug-Traktionsbatterien anhand
gekoppelter Simulationsmodelle. Springer
- [2] **Springer**
Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien.
- [3] **Springer**
Thermisches Management der Batterie. Springer
- [4] **Argade, S. & De, A.**
Optimization study of a Z-type airflow cooling
system of a lithium-ion battery pack. arXiv.
- [5] **Bozorg, M.V. & Torres, J.F.**
Multifaceted thermal regulation in electrochemi-
cal batteries using cooling channels and foam-
embedded phase change materials. arXiv.
- [6] **Tripathi, P.M. & Marconnet, A.M.**
Multi-Physics Numerical Analysis of Sin-
gle-phase Immersion Cooling for Thermal
Management of Li-Ion Batteries. arXiv.
- [7] **Carlucci, A.P., Darvish, H. & Laforgia, D.**
(n.d.) Detailed Thermal Characteriza-
tion on a 48V Lithium-Ion Battery Pack
during Charge-Discharge Cycles. arXiv.
- [8] **Beam-Verlag**
Wärmemanagement für Batterien in E-Mobili-
tätsanwendungen. Beam-Verlag.
- [9] **Krafthand**
Batteriekühlung von Elektrofahrzeugen
– Erklärung und Aufbau. Krafthand.
- [10] **1TLK Energy**
Batteriekühlung in Elektrofahrzeugen. TLK Energy.
- [11] **Lion Smart**
Immersionenkühlung: Ein kurzer Vergleich von
EV-Batterie-Kühlmethoden. Lion Smart.
- [12] **Mouser**
Übertemperatur in Li-Ionen-Batteriepacks
für Elektrofahrzeuge erkennen. Mouser.
- [13] **Elektronikpraxis**
Kühlung für Energiespeichersysteme:
Flüssigkeit vs. Luft. Elektronikpraxis.
- [14] **Rutronik**
Verhinderung von Thermal Runaway bei
Lithium-Ionen-Batterien. Rutronik.
- [15] **Springer Professional**
Was ist eine Immersionenkühlung?.
Springer Professional.
- [16] **Keheng Battery**
Complete Guide: Lithium-Ion Battery Sto-
rage & Maintenance. Keheng Battery.
- [17] **Pesaran, A. (2001)**
Thermal Management of Lithium-Ion Batteries: A
Review. Journal of Power Sources. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2001.03.004>.
- [18] **Zhang, S. & Xu, K. (2020)**
A review on the key issues of the lithium ion
battery degradation among the whole life
cycle. eTransportation. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100043>.
- [19] **Feng, X., Ouyang, M., He, X., Lu, L.,
Wang, H. & Zhang, M. (2018)**
Thermal runaway mechanisms of lithium-ion
battery for electric vehicles: A review. Ener-
gy Storage Materials. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.08.007>.
- [20] **Jaguemont, J., Boulon, L. & Dubé, Y. (2016)**
Thermal management of lithium-ion battery packs
based on thermoelectric cooling. IEEE Trans-
actions on Vehicular Technology. Available at:
<https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2524578>.
- [21] **Karimi, G. & Li, X. (2012)**
Thermal management of lithium-ion bat-
teries for electric vehicles. International
Journal of Energy Research. Available
at: <https://doi.org/10.1002/er.1956>.
- [22] **Al-Zareer, M., Jayasinghe, D.D.S.G.
& Khan, S.U.R. (2018)**
A critical review of thermal issues in lithium-ion
batteries. Journal of Power Sources. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.033>.
- [23] **Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab,
M., Fraser, R. & Fowler, M. (2018)**
Thermal management strategies for
lithium-ion batteries: A review. Renewa-
ble and Sustainable Energy Reviews.
- [24] **Argade, S. & De, A. (2024)**
Optimization study of a Z-type airflow cooling
system of a lithium-ion battery pack. arXiv. Ver-
fügbar unter: <https://arxiv.org/abs/2407.03062>.
- [25] **DGUV (2024)**
DGUV Information 205-041; www.dguv.de

Über den Autor

Während meiner Tätigkeit bei Wölfle habe ich wertvolle Erfahrungen im Bereich Batteriemanagement und Kühlsysteme gesammelt. Bereits 2014 habe ich gemeinsam mit VDL ein solches System erfolgreich auf den Markt gebracht. Heute stehe ich als Geschäftsführer von MAHA für höchste Sicherheitsstandards, Innovation und Zuverlässigkeit – auch im Bereich der Überwachung von Lithium-Ionen-Batterien.“

„Erfahren Sie mehr über die Bedeutung präziser Temperaturüberwachung und die entscheidenden Sicherheitsaspekte in diesem Whitepaper.“

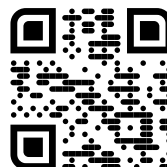
Dr. Peter Geigle

Geschäftsführer MAHA SE & Co. KG

E-Mail: peter.geigle@maha.de



MAHA SE & Co. KG
Hoyen 20
87490 Haldenwang
Germany



maha.de