

# EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR TEMPERIERUNG VON TRAKTIONSBATTERIEN MITTELS PARAFFIN/WASSER DISPERSIONEN

## BACHELORARBEIT

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES  
BACHELOR OF SCIENCE DER FAKULTÄTEN MASCHINENBAU UND  
BAUINGENEURWESEN  
DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

**Eingereicht von** Vincent Bürk  
**Mat.-Nr.** 108010224322  
**Studienfach** Umwelttechnik und Ressourcenmanagement

**Erstprüfer** Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner  
**Zweitprüfer** Dr.-Ing. Christian Doetsch  
**Betreuung** Dipl.-Ing. Tobias Kappels

Oberhausen, März 2014



Lehrstuhl für Verfahrenstechnische  
Transportprozesse



Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und  
Energietechnik

## AUFGABENSTELLUNG

Am Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT werden sogenannte Phase Change Slurries (PCS), bestehend aus in Wasser dispergiertem Paraffin, als Speichermedien für thermische Energiespeicher entwickelt. Diese können sowohl als Wärmespeicher, als auch als Wärmeträgermedium eingesetzt werden. Als großer Vorteil gegenüber reinen Phasenwechselmaterialien verbleiben PCS in ihrer Anwendung stets im flüssigen und somit pumpbaren Zustand. Somit besteht die Möglichkeit das Fluid direkt durch zu temperierende Teile strömen zu lassen.

Insbesondere in der Kühlung von sensiblen Elektronikkomponenten wird durch den Phasenübergang ein großer Vorteil gesehen, da die Bauteile somit nicht nur lange gekühlt, sondern auch auf einer konstanten Temperatur gehalten werden. Da Komponenten wie Batterien und Brennstoffzellen auf partiell überhitzte Zonen mit einer deutlichen Reduktion ihrer Lebensdauer reagieren, ist eine Vergleichmäßigung der Temperatur besonders wichtig.

Im Zuge der Bachelorarbeit soll daher zunächst nachgewiesen werden, ob bei der für Elektroautos verbreiteten Anordnung von Lithium-Ionen Rundzellen des Typs 18650 eine Kühlung mit PCS sinnvoll möglich ist. Hierzu soll eine Batteriezelle mit standardisierten Fahrzyklen belastet, und dabei Daten zur thermischen Charakterisierung aufgenommen werden. Anschließend soll ein Konzept zur Kühlung der Zellen in einer festgelegten Verschaltung von Batterieblöcken ausgearbeitet werden

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Formelzeichen und Symbole</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>2</b>
2.1 Lithium-Ionen Batterien .....	3
2.1.1 Aufbau.....	4
2.1.2 Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle der Größe 18650 .....	4
2.2 Wärmespeicherung.....	6
2.2.1 Sensible Wärmespeicherung .....	7
2.2.2 Latente Wärmespeicherung bei Fest-Flüssig Phasenwechsel .....	7
2.2.3 Phase Change Slurries.....	8
2.3 Grundlagen Wärmeübertragung.....	9
2.3.1 Stationäre Wärmeleitung.....	9
2.3.2 Konvektiver Wärmeübergang.....	10
2.3.3 Erzwungene Konvektion an einer ebenen Wand .....	13
2.4 Druckverlust überströmter Platten.....	13
2.4.1 Druckverlust.....	13
2.4.2 Druckverlustbestimmung bei Parallel- oder Reihenschaltungen .....	15
2.5 Fahrzyklus.....	16
2.5.1 ADAC Elektrofahrzeug Zyklus.....	16
2.5.2 Neuer Europäischer Fahrzyklus .....	17
2.5.3 Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure .....	17
2.5.4 ADAC Autobahnfahrzyklus .....	18
<b>3 Methodik und Ansatz</b> .....	<b>20</b>
3.1 Berechnungen Energieverbrauch Kraftfahrzeug.....	20
3.1.1 Beschleunigung .....	21
3.1.2 Reibung der Reifen.....	21
3.1.3 Luftreibung.....	22
3.1.4 Gesamtenergie.....	22
3.1.5 Berechnung Zelleistung.....	25
3.2 Experimentelle Untersuchungen an einer Sanyo 18650 Zelle .....	26
3.2.1 Versuchsaufbau und Vorbereitung.....	27
3.3 Vorstellung Batterieblöcke.....	28

---

3.3.1 Rhombischer Batterieblock.....	28
3.3.2 Batteriemodell Rechteck.....	30
3.4 Wärmespeicherung durch CryoSol <sup>plus</sup> .....	31
<b>4 Ergebnis und Diskussion: Kühlkonzept .....</b>	<b>33</b>
4.1 Einflussfaktor Umgebungstemperatur.....	33
4.2 Innenwiderstand und Wärmeverteilung einer 18650 Lithium-Ionen Zelle .....	34
4.2.1 Messung Innenwiderstand Zelle .....	34
4.2.2 Ladezyklus mit 2A .....	37
4.2.3 Entladezyklus mit 5 A.....	38
4.2.4 Entladezyklus ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge .....	40
4.3 Berechnung Wärmeströme .....	42
4.4 Blockdesign.....	44
4.5 Auswahl des CryoSol <sup>plus</sup> .....	45
4.6 Auslegung der passiven Kühlung.....	45
4.6.1 Wärmeübergang .....	46
4.6.2 Druckverlust.....	46
4.6.3 Auslegung der passiven Kühlung .....	47
4.7 Kühlkonzept.....	49
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>53</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>55</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>57</b>
<b>Erklärung.....</b>	<b>60</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Aufbau Lithium-Ionen Zelle (Physics Central 2014).....	4
Abbildung 2: Darstellung des Größenverhältnisses der einzelnen Zelllagen zueinander sowie Angaben zu den Partikelgrößen der Aktivmaterialien (Jossen et al. 2005).....	5
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle nach (Elektronik Kompendium 2014).....	5
Abbildung 4: Methoden zur reversiblen Energiespeicherung von Wärme .....	6
Abbildung 5: Latente und sensible Wärmespeicherung im Vergleich (Mehling 2002) .....	7
Abbildung 6: Aufbau einer Paraffin/Wasser Dispersion(Kohnen 2013) .....	8
Abbildung 7: Wärmeleitung durch eine Wand (Fiebig 2004) .....	10
Abbildung 8: Konvektive Wärmeübertragung an einer Oberfläche(Fiebig 2004) .....	11
Abbildung 9: Widerstands-Korrekturfaktor $f_L$ für rechteckige Querschnitte bei laminarer Strömung in Abhängigkeit der Seitenverhältnisse (Wagner 1992) .....	14
Abbildung 10: ADAC Elektrofahrzeug Zyklus.....	16
Abbildung 11: NEFZ-Stadt und NEFZ-Land .....	17
Abbildung 12: Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure.....	18
Abbildung 13: ADAC Autobahn-Fahrzyklus.....	19
Abbildung 14: Energiebilanz eines Autos mit Fahrtrichtung links (Online1 & Minder.Webdesign) .....	21
Abbildung 15: Verlauf der Beschleunigungs- und Bremsenergie während des ADAC Fahrzyklus... ..	23
Abbildung 16: Verlauf der Straßen- und Luftreibungsenergie während des ADAC Fahrzyklus.....	23
Abbildung 17: Energiebilanz ADAC Fahrzyklus .....	24
Abbildung 18: Energiemengen: ADAC Elektrofahrzeug Zyklus .....	25
Abbildung 19: Leistungsverlauf einer einzelnen Batteriezelle während des ADAC Fahrzyklus.....	26
Abbildung 20: Batteriezelle mit Halterung .....	27
Abbildung 21: Versuchsaufbau mit schwarz lackierter Batterie sowie Wärmebildkamera .....	28
Abbildung 22: Rhombischer Batterieblock Prototyp .....	29
Abbildung 23: Rhombisches Batteriemodell.....	29
Abbildung 24: Rechteckiges Batteriemodell .....	30
Abbildung 25: Ein Stack mit 80 Batterieblöcken .....	31
Abbildung 26: DSC Messung von CryoSol <sup>plus</sup> mit einem reinen und einem gemischten Paraffin ....	32
Abbildung 27: Verlauf der maximalen Tagestemperatur in München aus dem Jahr 2012 .....	33
Abbildung 28: Theoretisch berechneter Leistungsverlauf einer Sanyo 18650F Zelle mit einem gemessenen Innenwiderstand von 0,099 mOhm.....	36

---

Abbildung 29: Spannungs- und Temperaturverlauf bei 2 A Ladezyklus .....	37
Abbildung 30:Wärmebildaufnahme nach einem 2 A Ladezyklus .....	38
Abbildung 31: Spannungs- und Temperaturverlauf bei 5 A Entladezyklus.....	39
Abbildung 32: Vergleich Wärmequellen durch Kontaktierung: Boden – Mantel .....	40
Abbildung 33: Spannungs- und Temperaturverlauf einer Batteriezelle während des ADAC Fahrzyklus .....	41
Abbildung 34: Wärmebildaufnahme nach einem ADAC Fahrzyklus .....	41
Abbildung 35: Leistungsverlauf einer Zelle im Vergleich zur Geschwindigkeit .....	42
Abbildung 36: Abwärmeleistungsverlauf einer Zelle .....	43
Abbildung 37: Konvektiver Wärmeübergang bei verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Batterie und durchströmender Luft.....	46
Abbildung 38: Druckverlust über Luftgeschwindigkeit .....	47
Abbildung 39: Auswertung Luftgeschwindigkeit und Druckverlust .....	48
Abbildung 40: Kennliniendiagramm des Systems und verschiedener Ventilatoren.....	49
Abbildung 41: Simulierter Batterieblocktemperaturverlauf unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept .....	50
Abbildung 42: Simulierter Verlauf der Temperaturdifferenzen innerhalb einer Blockreihe unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept .....	52

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Akkumulatoren im Vergleich(Gerhard Babel 2007) .....	3
Tabelle 2: Fahrzeugspezifische Werte .....	22
Tabelle 3: Vergleich der Energiedaten einer Gesamtbatterie (4800 Zellen) mit einer einzelnen Zelle.....	25
Tabelle 4: Datenblatt der Lithium-Ionen Batteriezelle (Enerdan) .....	27
Tabelle 5: Widerstand in Ohm .....	34
Tabelle 6: Innenwiderstandeinstufung Lithium-Ionen Zellen .....	35
Tabelle 7: Energie und Wärmedaten ADAC Fahrzyklus .....	43
Tabelle 8: Stoffdaten Luft (Verein Deutscher Ingenieure 2006).....	45
Tabelle 9: Höchsttemperaturen bei unterschiedlichen Umgebungs- und Starttemperaturen unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept .....	51

**FORMELZEICHEN UND SYMBOLE****Formelzeichen**

A	[m <sup>2</sup> ]	Austauschfläche
a	[m]	Breite des Querschnitts
b	[m]	Breite des Körpers
h	[m]	Höhe des Querschnitts
c	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit
c <sub>p</sub>	[kJ/(kg·K)]	spezifische Wärmekapazität
C <sub>w</sub>	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
d	[m]	charakteristische Länge
d	[m]	hydraulischer Innendurchmesser
f <sub>L</sub>	[-]	Widerstandskorrekturfaktor
H	[J]	Enthalpie
I	[A]	Strom
L	[m]	Länge des Rohres
m	[kg]	Masse
Nu	[-]	Nusselt-Zahl
P	[W]	Leistung
Δp	[Pa]	Druckverlust
Q	[J]	Wärmestrom
q	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
R	[Ω]	Elektrischer Widerstand
R	[kg/m <sup>7</sup> ]	Widerstandsbeiwert
Re	[-]	Reynoldszahl
s	[m]	zurückgelegte Strecke
T	K	Temperatur
U	[V]	Spannung
U	[m]	Umfang
Ṃ	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
w	[m/s]	Luftgeschwindigkeit

**Symbole**

$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> ·K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\eta$	[kg/m·s]	dynamische Viskosität
$\lambda$	[W/m·K]	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte

## 1 EINLEITUNG

Zur Einsparung fossiler Energieträger und Verringerung von CO<sup>2</sup>-Emissionen und weiterer Umweltschäden, wird an alternativen Antriebskonzepten geforscht. Als mögliche Lösung zur CO<sup>2</sup>-Minderung, trotz steigendem Verkehrsaufkommen, eignen sich im besonderen Maße Elektrofahrzeuge als Ersatz für herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Ziel der Bundesregierung ist es, dass auf Deutschlands Straßen bis zum Jahr 2020, eine Million Elektromobile fahren (Bundesregierung). Zu Beginn des Jahres 2014 waren 12.156 Elektrofahrzeuge angemeldet, dies entspricht einem Gesamtanteil von 0,028 Prozent (Kraftfahrtbundesamt). Daraus wird deutlich, dass Elektromobile für den Konsumenten bislang nicht attraktiv genug sind. Laut Umfrage des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung sowie des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien liegt dies vor allem an der geringen Reichweite und den hohen Anschaffungskosten (Fraunhofer ISI 2014). Um günstige Elektroautos mit hohen Reichweiten bauen zu können, ist eine Steigerung der Energieeffizienz unumgänglich.

Für Elektromobile eignen sich, aufgrund ihres geringen Gewichtes und der hohen Energiedichte, Lithium-Ionen Batterien als Traktionsbatterien. Lithium-Ionen Batterien haben hohe Anschaffungskosten und müssen, um die Kosten zu minimieren, eine hohe Lebensdauer aufweisen. Da sie temperaturempfindlich sind, d.h. bei zu hohen Temperaturen und Temperaturdifferenzen an Lebensdauer einbüßen, ist es notwendig sie zu kühlen. Stand der Technik ist es, die Batterie mit einer aktiven Kühlung zu temperieren. Durch den Einsatz von Paraffin/Wasser Dispersionen ist es möglich den Kühlungsaufwand zu verringern und somit die Energieeffizienz zu steigern. Auch führt die Dispersion durch eine Vergleichmäßigung der Zelltemperaturen zu einer erhöhten Lebensdauer.

Ziel der Bachelorarbeit ist es, durch experimentelle Untersuchungen und theoretische Berechnungen, ein Kühlkonzept zu entwickeln. Das Kühlkonzept soll durch den Einsatz einer Paraffin/Wasser Dispersion möglichst energiesparend und batterieschonend ausgelegt werden. Hierzu wird zunächst die Batterieleistung mittels eines Fahrzyklus berechnet. Anschließend wird der Innenwiderstand einer 18650 Batteriezelle der Marke Sanyo ermittelt. Durch die Leistungen und den Innenwiderstand soll die abzuführende Batteriewärme bestimmt werden. Auf Grundlage der Wärme wird ein Batterieblockmodell, unter Beachtung des Speichervolumens, ausgewählt. Zusätzlich wird eine möglichst energiesparende konvektive Wärmeabfuhr, über die Kupferkontaktfläche des Blockmodells, konzipiert. Durch die Wahl einer Paraffin/Wasser Dispersion, unter Beachtung der in Deutschland herrschenden Temperaturen, kann der Temperaturverlauf eines Batterieblocks berechnet und dargestellt werden. Anhand des Temperaturverlaufes wird abschließend das Kühlkonzept bewertet.

Die experimentellen Untersuchungen finden im Rahmen des Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II (FSEM II) Projektes am Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik statt. Die Batterieblockmodelle werden vom Fraunhofer Institut für Lasertechnik hergestellt.

## 2 GRUNDLAGEN

In den Grundlagen sollen die für das Verständnis der Bachelorarbeit notwendigen Kenntnisse beschrieben und erklärt werden. Zu Beginn befasst sich das erste Unterkapitel mit Lithium-Ionen Batterien, wobei auf den Aufbau sowie die Funktionsweise der Zellen näher eingegangen wird. In Kapitel 2.2 werden die Arten der Wärmespeicherung vorgestellt. Anschließend wird genauer auf die verwendeten Phasenwechselmaterialien eingegangen.

Um die Funktionsweise der passiven Kühlung zu verstehen, behandelt Kapitel 2.3 die benötigten Grundlagen der Wärmeübertragung. Dabei wird speziell auf eine Art der Wärmeübertragung, die Wärmeleitung, eingegangen. Die in der Bachelorarbeit relevante Wärmeleitung wird in statische und konvektive Wärmeleitung, welche in den Unterkapiteln erläutert werden, unterteilt.

Die konvektive Wärmeleitung der Luftkühlung führt durch Fluidreibung zu einem Druckverlust. In Kapitel 2.4 wird insbesondere auf die Berechnungsgrundlagen des Druckverlustes für kompressible Gase in nicht kreisförmigen Rohren eingegangen.

Im letzten Teil der Grundlagen wird der verbrauchsbestimmende verwendete Fahrzyklus vorgestellt. Der Fahrzyklus ist der ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge und setzt sich aus drei einzelnen Fahrzyklen zusammen welche in den Unterkapiteln erläutert werden.

## 2.1 Lithium-Ionen Batterien

Lithiumbatterien werden in primäre (nicht wiederaufladbare) und sekundäre (wiederaufladbare) Batterien unterteilt. Die ersten primären Lithiumbatterien waren Lithium-Schwefeldioxid Batterien und wurden bereits im Jahr 1938 eingesetzt. Seit Anfang 2000 werden Lithium-Ionen-Polymerakkumulatoren in mobilen Geräten wie Handys oder Laptops verwendet. Der Einsatz in mobilen Geräten ist dadurch zu begründen, dass die Energiedichte moderner Lithium-Akkus mit 110-160 Wh/kg mehr als doppelt so groß ist, wie die von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren mit 45-80 Wh/kg (Gerhard Babel 2007). Die Lebensdauer von Lithium-Batterien wurde seit der ersten Generation deutlich verbessert. Diese ist, im Gegensatz zu den alten Modellen, durch die Anzahl der Zyklen und nicht mehr zeitlich begrenzt. Wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, weist nur die Nickel-Cadmium Zelle eine höhere Zyklenlebensdauer auf.

**Tabelle 1: Akkumulatoren im Vergleich(Gerhard Babel 2007)**

	<b>NiCd Nickel- Cadmium</b>	<b>NiMH Nickel- Metall- Hybrid</b>	<b>Pb-PbO<sub>2</sub> Bleisäure Lead Acid</b>	<b>Li-Ion</b>	<b>Li-Ion- Polymer</b>	<b>Reusabl e Alkaline</b>
Zellspannung	1,25 V	1,25 V	2,0 V	3,6 V	3,6 V	<b>1,5 V</b>
Energiedichte	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	<b>80</b>
Ladezyklen 80% Kapazität	1500	300-500	200-300	500-1000	300-500	<b>50</b>
Selbstentladung pro Monat	20 %	30 %	5 %	10 %	10 %	<b>0,3 %</b>
Betriebs- temperatur	-40 °C +60 °C	-20 °C +60 °C	-20 °C +60 °C	-20 °C +60 °C	0 °C +60 °C	<b>0 °C +65 °C</b>
Kosten pro Zyklus	0,04 €	0,12 €	0,10 €	0,14 €	0,29 €	<b>0,10 €</b>

Die Lebensdauer gilt als überschritten, wenn die ursprüngliche Kapazität um 20 Prozent gesunken ist. Die Lebensdauer wird durch äußere Einflüsse begrenzt. Diese sind z.B. zu hohe Temperaturen, zu hohe Ströme und Zellspannungen außerhalb des Betriebsbereiches. Ein sogenannter Memory Effekt, bei dem Kapazitätsverluste aufgrund von Teilentladungen entstehen, ist bei Lithium-Ionen Batterien nicht bekannt.

Eine gleichmäßige Kühlung und ein BMS (Batterie Management System) führt zu einer Maximierung der Zyklenanzahl. Durch die bei guter Behandlung hohe Zyklenanzahl und die hohe Energiedichte, eignen sich Lithium-Ionen Batterien besonders für den Einsatz in Elektromobilen.

### 2.1.1 Aufbau

Für das Verständnis eines Lithium-Ionen-Akkumulators werden zunächst die wichtigsten Eigenschaften von Lithium vorgestellt. Lithium hat geringe Dichte sowie das höchste elektrochemische Standardpotential. Lithium reagiert mit Wasser, Sauerstoff und Stickstoff, aufgrund dessen müssen bei der Herstellung und Verwendung von Lithiumhaltigen Batterien Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. (Zeck 2012)

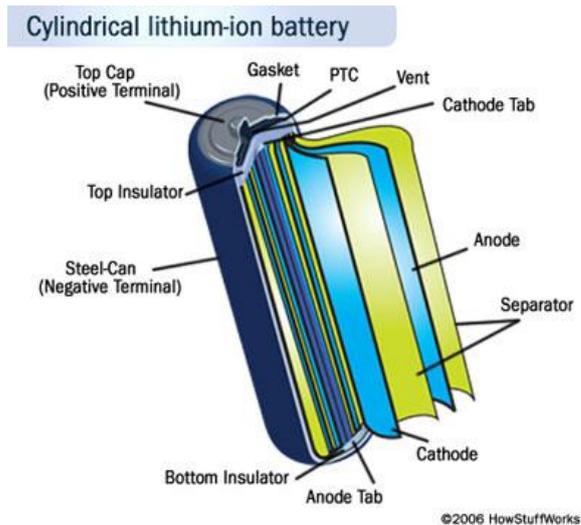
Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden in fünf verschiedenen Ausführungen hergestellt:

- Runde Lithium-Ionen Zellen
- Prismatische Lithium-Ionen Zellen (festes Gehäuse)
- Prismatische Lithium-Polymer Zellen (flexibles Gehäuse)
- Pouch Lithium-Ionen Zellen
- Wiederaufladbare Knopfzellen

Aufgrund einer größeren Oberfläche, in Bezug auf das Volumen, ist der Wärmetransport der prismatischen sowie der Pouch Zelle besser als der einer runden Zelle. Für den Einsatz in mobilen Anwendungen haben andere Kriterien einen höheren Stellenwert. Diese sind unter anderem: die Serienreife, die Verfügbarkeit, die Sicherheit, die Lebensdauer und die Kosten. Die runde Lithium-Ionen Zelle mit der Größe 18650 erfüllt diese Kriterien. Dies wird dadurch deutlich, dass sie häufig in Laptops und Elektromobilen wie Rollern und Autos verbaut wird. Da diese Baugröße auch im Rahmen der Bachelorarbeit verwendet wird, wird der chemische und der physikalische Aufbau der 18650 Zelle im Folgenden erläutert.

### 2.1.2 Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle der Größe 18650

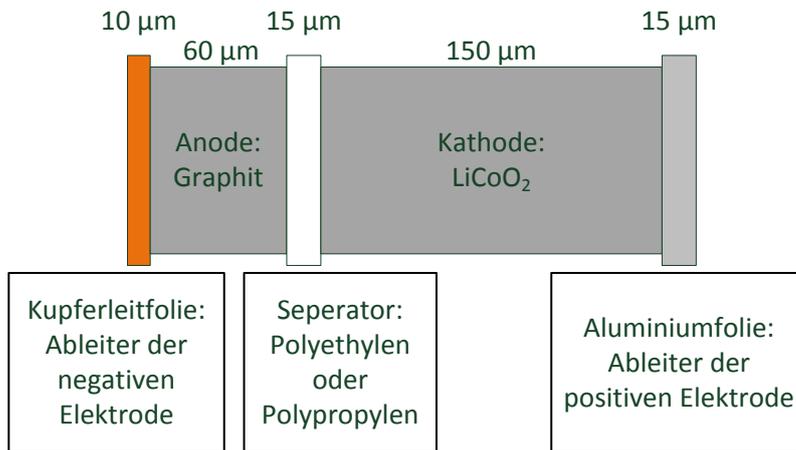
In Abbildung 1 ist eine Schnittansicht einer runden Lithium-Ionen Zelle dargestellt. Anhand dieser Ansicht wird im Folgenden der Aufbau von außen nach innen erläutert.



**Abbildung 1: Aufbau Lithium-Ionen Zelle (Physics Central 2014)**

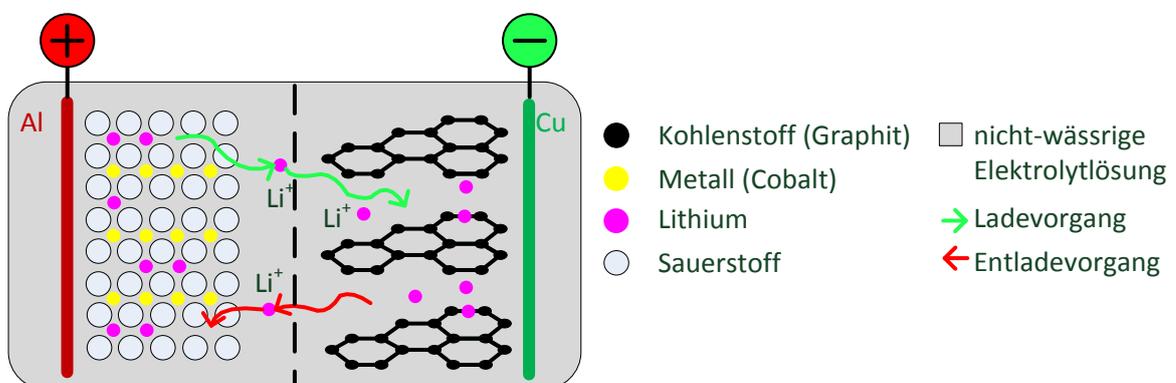
Die Hülle besteht aus einer Metallhülle, die zum Schutz der Zelle und als Minuspol fungiert. Um bei einem Überdruck durch zu hohe Temperaturen eine Explosion zu verhindern, ist am Kopf der

Zelle ein Entlüftungsloch (Vent) angebracht. Zum Schutz vor Überhitzung ist am Kopf ein Kaltleiter (PTC) angebracht, der bei zu hohen Temperaturen keinen Strom durchlässt. Der Kopf der Zelle ist der Pluspolleiter und ist mit der Kathode der Zelle verbunden. Um einen Kurzschluss zu verhindern, sind der Kopf und der Boden der Zelle mit einer Dichtung sowie einem Isolator von der Anode und dem Zellinneren getrennt. Im Inneren der Zelle befindet sich eine Spirale aus zusammengepressten Lagen. Eine solche Lage ist in Abbildung 2 dargestellt und besteht aus einer Anode, einer Kathode und einem Separator. (Jossen et al. 2005)



**Abbildung 2:** Darstellung des Größenverhältnisses der einzelnen Zellschichten zueinander sowie Angaben zu den Partikelgrößen der Aktivmaterialien (Jossen et al. 2005)

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, besteht die Anode (negative Elektrode) einer handelsüblichen Lithium-Zelle aus Graphit und ist mit einem Separator aus Polyethylen oder Polypropylen von der Kathode (positive Elektrode) getrennt. Die Kathode enthält meist Lithium-Metalloxide wie Lithiumcobaltdioxid (LiNiO<sub>2</sub>). Lithium-Ionen stellen in einer Lithium-Ionen Zelle den aktiven Teil dar, die Elektroden hingegen sind nur Wirtsgitter. Als Stromableiter werden, wie in Abbildung 3 zu erkennen, an der Anode eine Kupferfolie und an der Kathode eine Aluminiumfolie verwendet. Nickelfolien eignen sich auch als Ableiter, werden aber aus Kostengründen nicht verwendet. Kupfer wird nur an der Anode verwendet, da es an der Kathode stark korrodieren würde. Aluminium hingegen, kann aufgrund einer starken Reaktion mit Lithium nur an der Kathode verwendet werden. Die unterschiedlichen Dicken der Leiterfolien sind auf die Leitfähigkeit von Aluminium zurückzuführen die der von Kupfer zu 2/3 entspricht. (Buß 2011; Jossen et al. 2005)



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle nach (Elektronik Kompendium 2014)

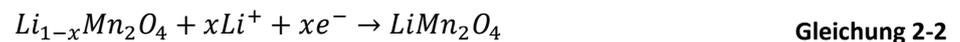
Beim Ladevorgang werden die Lithium-Ionen von der positiven Elektrode durch den Elektrolyten, welcher ebenfalls Lithium-Ionen haltig ist, zur negativen Elektrode transportiert. In der Anode (Graphit) reagieren die Lithium-Ionen mit den durch den äußeren Strompfad transportierten Elektronen zu Lithiumatomen. Die neutralen Lithiumatome lagern sich zwischen den Lagen des Graphits an.

Beim Entladevorgang findet der umgekehrte Prozess statt. Die im Graphit eingelagerten Lithiumatome werden unter Abgabe eines Elektrons zu Lithium-Ionen. Diese wandern anschließend durch den Elektrolyten zur positiven Elektrode, wo sie durch Elektronen neutralisiert und im Gitter des Aktivmaterials wieder eingelagert werden. In Abbildung 3 ist Lithiumcobaltdioxid das Aktivmaterial. Für die Entladung ergeben sich folgende Reaktionen. (Jossen et al. 2005)

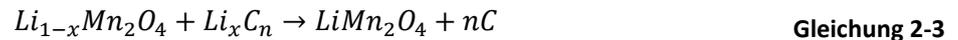
Negative Elektrode:



Positive Elektrode:

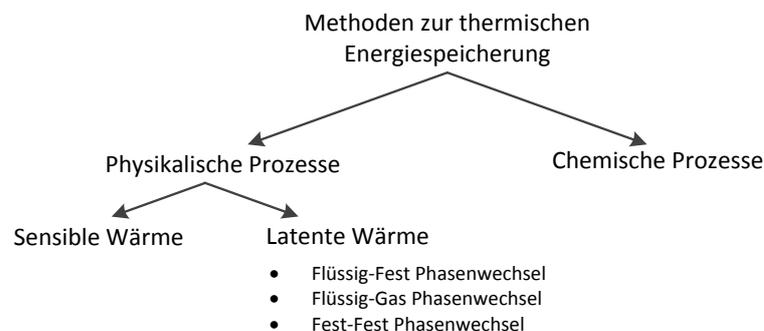


Redox-Gleichung:



## 2.2 Wärmespeicherung

Durch die elektrochemischen Prozesse innerhalb Lithium-Ionen Batteriezellen entsteht eine Verlustwärme welche abgepuffert werden muss, aufgrund dessen werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Wärmespeicherung erläutert. Des Weiteren wird auf die Funktionsweise sowie den Aufbau von Phasenwechselmaterialien eingegangen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, werden die Methoden zur Wärmespeicherung in physikalische und chemische Prozesse unterschieden. Die Wärmespeicherung durch chemische Prozesse wird hier nicht betrachtet und daher nicht weiter erläutert. Die physikalische Wärmespeicherung wird unterteilt in die sensible und die latente Wärme. Zunächst wird die sensible Wärme beschrieben.



**Abbildung 4: Methoden zur reversiblen Energiespeicherung von Wärme**

### 2.2.1 Sensible Wärmespeicherung

Die sensible Wärme ist die bekannteste Wärmespeicherungsmethode. Häufig wird Wasser als Wärmespeichermedium innerhalb von Haushalten als Wärmespeicher für Heizungen oder Warmwasserversorgungen verwendet. Wenn Wärme dem Wärmespeicher zugeführt wird, führt dies zu einem direkten Temperaturanstieg. In Abbildung 5 ist der lineare Temperaturverlauf von Wasser über die zugeführte Wärme dargestellt. Der Vorgang wird durch Gleichung 2-4 beschrieben.

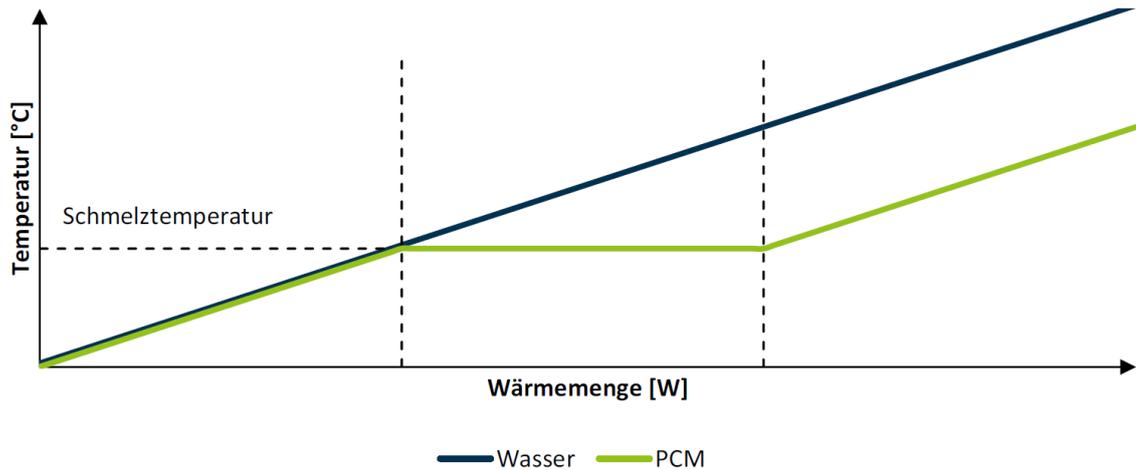


Abbildung 5: Latente und sensible Wärmespeicherung im Vergleich (Mehling 2002)

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Das Verhältnis der gespeicherten Wärme  $\Delta Q$  zu der Temperaturerhöhung  $\Delta T$  ist die Wärmekapazität  $C$ . Diese wird häufig auf die Stoffmenge, das Volumen oder die Masse des Materials bezogen woraus sich die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  ergibt. Sensible Wärmespeicherung wird neben Flüssigkeiten wie Wasser, auch bei Feststoffen wie Steinen oder Ziegeln genutzt. Gase eignen sich aufgrund ihrer geringen volumetrischen Wärmekapazität nicht als sensibler Wärmespeicher. (Mehling et al.)

### 2.2.2 Latente Wärmespeicherung bei Fest-Flüssig Phasenwechsel

Die latente Wärmespeicherung beschreibt den Vorgang der Wärmeaufnahme beim Phasenwechsel. Der reversible Phasenwechsel der Aggregatzustände flüssig/fest benötigt Energie in Form von Wärme, auch latente Wärme genannt. Diese Energie muss für einen Schmelzvorgang zugeführt, und für einen Gefriervorgang abgeführt werden. Durch den Phasenwechsel wird die Gesamtenthalpie des Mediums, jedoch nicht die Temperatur verändert. In Abbildung 5 ist der Temperaturverlauf beispielhaft mit einem Phasenwechselmaterial (PCM) dargestellt.

Durch Anpassen der Phasenwechseltemperatur des Mediums kann dieser Effekt für verschiedenste Einsatzgebiete genutzt werden. Da die Volumenänderung durch den

Phasenwechsel unter 10 Prozent liegt, kann es ohne starke Auswirkungen in Speicherbehältern gelagert werden. Die Wärmeänderung äquivalent zur Enthalpiedifferenz.

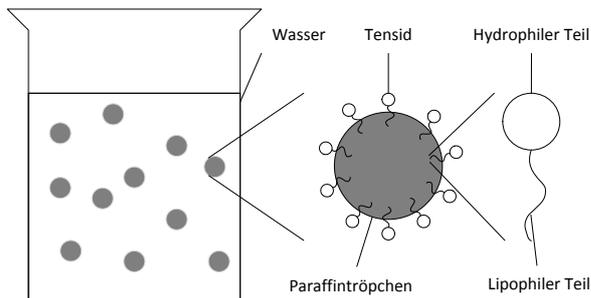
$$\Delta Q = \Delta H = m * \Delta h$$

**Gleichung 2-5**

Die latente Wärme  $\Delta Q$ , auch Schmelzenthalpie genannt, wird aus der Enthalpiedifferenz zwischen der Flüssig- und der Feststoffphase ermittelt. Materialien die für den Phasenwechsel Wärme benötigen, werden auch Phasenwechselmaterialien (Phase Change Material; PCM) genannt. Aufgrund der festen Phase von Phasenwechselmaterialien sind die Verwendungsmöglichkeiten in technischen Bereichen begrenzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Phasenwechselmaterialien in fester Phase nicht pumpbar sind. Eine Lösung dieses Problems können sogenannte Phase Change Slurries (PCS) darstellen welche im nächsten Kapitel erläutert werden. (Mehling 2002)

### 2.2.3 Phase Change Slurries

Ein Phase Change Slurry (PCS) ist eine Flüssigkeit, welche aus einem dispersen Phasenwechselmaterial und einer dauerhaft flüssigen Phase als Trägermedium besteht. Ein Beispiel dafür ist das in der Bachelorarbeit verwendete CryoSol<sup>plus</sup>, eine Dispersion von Paraffin und Wasser. Die Besonderheit dabei liegt darin, dass Tenside, wie in Abbildung 6 dargestellt, für die Stabilität des PCS genutzt werden. Die Tenside haben einen hydrophilen Teil und einen lipophilen Teil. Durch Anhaften an Paraffintröpfchen wird so eine Verbindung mit den anderen Tröpfchen verhindert. (Hanu et al. 2012)



**Abbildung 6: Aufbau einer Paraffin/Wasser Dispersion(Kohnen 2013)**

Der grundlegende Vorteil gegenüber Phasenwechselmaterialien liegt darin, dass Phase Change Slurries, durch das flüssige Trägermedium, auch mit festem Phasenwechselmaterial flüssig, und damit pumpbar bleiben. Durch diese Eigenschaft erweitert sich der technische Einsatzbereich, wodurch auch die Anforderungen an das PCS wachsen. Diese sind unter anderem eine hohe Wärmespeicherdichte, eine hohe mechanische Stabilität und eine geringe Viskosität. Durch die Erhöhung des Phasenwechselmaterialanteils steigen die Wärmespeicherdichte und die Viskosität. Bei steigendem Anteil des Trägermediums sinken die Viskosität sowie die Wärmespeicherdichte. Auch erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit bei steigendem Anteil des Trägermediums. Es muss also je nach Anwendungsbereich ein Verhältnis zwischen den Anteilen gefunden werden. (Huang 2009)

### 2.3 Grundlagen Wärmeübertragung

In einem System mit Wärmespeicher findet ein Wärmeaustausch statt. Um diesen Vorgang verstehen zu können, werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Wärmeübertragung behandelt. Die Wärmeübertragung beschreibt Transport von Energie in Form von Wärme, hervorgerufen durch eine Temperaturdifferenz. Es existieren drei Arten von Wärmeübertragung: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Die Wärmeleitung findet in statischen Systemen und in dynamischen Systemen statt. Die Wärmeleitung in dynamischen Systemen wird Konvektion genannt und ist mit einem Wärmeübergang durch Strömung gekoppelt. In Kapitel 2.3.1 wird zunächst die stationäre Wärmeleitung in Festkörpern oder ruhenden Fluiden erläutert. Anschließend behandelt das Kapitel 2.3.2 die konvektive Wärmeleitung in dynamischen Systemen. Die Wärmeübertragung durch Strahlung wird in dieser Bachelorarbeit zur Ermittlung der Kühlleistung nicht benötigt und deshalb nicht weiter erläutert. (Fiebig 2004)

#### 2.3.1 Stationäre Wärmeleitung

Die stationäre Wärmeleitung findet in Feststoffen oder ruhenden Fluiden statt. Die treibende Kraft der Wärmeleitung ist die Temperaturdifferenz. Ermittelt wird der aus der Temperaturdifferenz resultierende Wärmestrom mithilfe der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/m·K]. Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, wie groß der Wärmestrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz und Strecke ist. In Gleichung 2-6 ist das Fouriersche Gesetz zur Wärmeleitung dargestellt. (Fiebig 2004)

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{b} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

$\dot{q}$	= Wärmestrom	[W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	= Wärmeleitfähigkeit	[W/m·K]
T	= Temperatur	[K]
b	= Breite des Körpers	[m]

Anhand der folgenden Abbildung wird der Vorgang der Wärmeleitung erläutert.

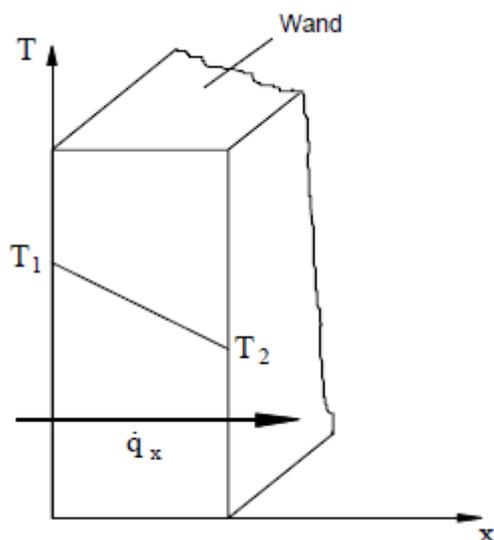
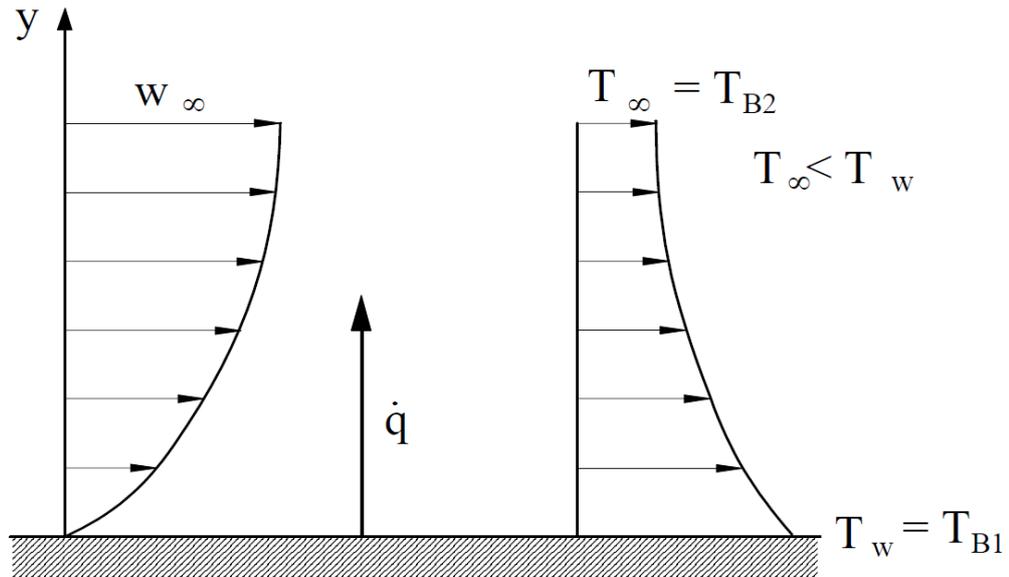


Abbildung 7: Wärmeleitung durch eine Wand (Fiebig 2004)

Die in Abbildung 7 dargestellte ebene Wand weist einen Temperaturabfall über ihre Breite auf. Die Temperaturdifferenz verursacht einen über die Breite  $b$  konstanten Wärmestrom  $\dot{q}$  in Richtung des Temperaturgefälles. Wie aus Gleichung 2-6 zu folgern, wird der Wärmestrom durch eine steigende Breite der Wand und eine sinkende Wärmeleitfähigkeit begrenzt. Somit stellen diese Werte den thermischen Widerstand dar.

### 2.3.2 Konvektiver Wärmeübergang

Der konvektive Wärmeübergang ist der Übergang von Körperenergie, in Form von Wärme, an ein umströmendes Medium. Je nach Strömungsursache dieses Mediums wird in die freie und in die erzwungene Konvektion unterteilt. Bei der freien Konvektion ist das umgebene Medium ursprünglich stationär. Durch den Wärmeübergang an die umgebenden Stoffteilchen des Mediums erhöht sich deren Temperatur und Dichte. Die erwärmten Teilchen steigen auf und kühlere Teilchen strömen nach, wodurch eine Strömung entsteht. Bei der erzwungenen Konvektion wird die wärmeaustauschende Strömung künstlich, z.B. durch einen Ventilator, erzeugt. (Fiebig 2004)



**Abbildung 8: Konvektive Wärmeübertragung an einer Oberfläche (Fiebig 2004)**

In Abbildung 8 ist der Vorgang der konvektiven Wärmeübertragung dargestellt. Dabei wird eine ebene Platte von einem Fluid mit einer Geschwindigkeit  $w$  [m/s] umströmt. Zwischen Platte und Medium herrscht eine Temperaturdifferenz zwischen  $T_w$  und  $T_\infty$  die den Wärmestrom  $q$  verursacht. Bei der Konvektion wird dieser durch den limitierenden Faktor, den Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ , begrenzt. Der Wärmeübergangskoeffizient gibt den Wärmestrom in Abhängigkeit von Temperatur und Fläche wieder. Somit ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad \text{Gleichung 2-7}$$

$q$  = Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>·K]

$T$  = Temperatur [K]

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  kann mithilfe der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke der Temperaturgrenzschicht  $\delta$  ermittelt werden:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Aufgrund ihrer geringen Ausmaße kann die Temperaturgrenzschicht in kleinen Maßstäben nicht gemessen werden, weshalb hier nicht weiter auf sie eingegangen wird. Somit muss der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  als Funktion der Geometrie, der Randbedingungen und der Strömung ermittelt werden. Dabei werden folgende Kennzahlen verwendet.

**Nusseltzahl**

Die Nusseltzahl stellt das Verhältnis der charakteristischen Länge  $d$  und der Dicke der Temperaturgrenzschicht dar:

$$Nu = \frac{d}{\delta} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

Nu	= Nusselt-Zahl	[-]
$\delta$	= Temperaturgrenzschicht	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$d$	= charakteristische Länge	[m]

Somit ergibt sich mit Gleichung 2-7 eine Relation zum Wärmeübergangskoeffizienten:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

Die charakteristische Länge  $d$  hängt von der Geometrie der wärmeübertragenden Wand ab. Bei einem nicht kreisförmigen Querschnitt wird der hydraulische Durchmesser  $d_h$  nach Gleichung 2-3 bestimmt.

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} \quad \text{Gleichung 2-11}$$

A	= Austauschfläche	[m <sup>2</sup> ]
U	= Umfang	[m]

**Reynoldszahl**

Die Reynoldszahl ist das Verhältnis zwischen den Trägheits- und den Reibungskräften.

$$Re_d = \frac{c \cdot d_h}{\nu} = \frac{c \cdot d_h \cdot \rho}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot d_h}{A \cdot \eta} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

$Re_d$	= Reynoldszahl	[-]
$c$	= mittlere Geschwindigkeit	[m/s]
$\nu$	= kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta$	= dynamische Viskosität	[kg/m·s]
$\rho$	= Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]

Die Reynoldszahl gibt an, in welchem Strömungszustand sich das Fluid befindet. Bei Werten unter 2300 liegt eine laminare Strömung vor. Steigt die Reynoldszahl über 2300, geht die Strömung in einen Übergangsbereich über. Eine turbulente Strömung liegt erst ab Werten von  $5 \cdot 10^5$  vor.

### Prandtlzahl

Die Prandtlzahl stellt das Verhältnis der kinematischen Viskosität zur Temperaturleitfähigkeit dar. Wie in Gleichung 2-13 dargestellt, wird sie durch den Quotienten der kinematischen Viskosität und der Temperaturleitfähigkeit gebildet.

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

Bei Gasen nimmt die Prandtlzahl einen Wert von ca. 0,7 an und bei Flüssigkeiten liegt sie etwa bei 10. (Böckh et al. 2009)

### 2.3.3 Erzwungene Konvektion an einer ebenen Wand

Findet der Wärmeübergang an einer ebenen Wand mit einer erzwungenen Konvektion statt wird die Nusseltzahl bei laminaren Strömungen mit Gleichung 2-11 berechnet. Dabei werden die zuvor erläuterten Kennzahlen verwendet.

$$Nu_{lam} = 0,644 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re} \quad \text{für } Re < 10^5 \quad \text{Gleichung 2-14}$$

Liegt eine turbulente Strömung in einem Gas vor, gilt:

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad \text{für } 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \quad \text{Gleichung 2-15}$$

Liegt der Strömungsübergangsbereich mit Reynoldszahlen zwischen  $10^5$  und  $5 \cdot 10^5$  vor, ist dieser mit den Gleichungen 2.11 und 2.12 nicht berechenbar. Da der Übergang zwischen laminarem und turbulentem Strömungsbereich asymptotisch erfolgt, werden die beiden Strömungsbereiche sowie der Übergangsbereich durch folgende Gleichung bestimmt. (Böckh et al. 2009)

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad \text{für } 10 < Re < 10^7 \quad \text{Gleichung 2-16}$$

## 2.4 Druckverlust überströmter Platten

Bei der Strömung von Luft in Rohren entstehen je nach Geschwindigkeit, Querschnitt und Oberflächenbeschaffenheit Druckverluste. Die im System entstehenden Druckverluste müssen durch eine erhöhte Strömungsmaschinenleistung ausgeglichen werden, da sonst, bei konstanter Leistung, ein geringerer Volumenstrom erzeugt wird. Um eine Strömungsmaschine für ein System auszulegen ist es notwendig den Druckverlust zu bestimmen. Im Folgenden werden die zur Berechnung des Druckverlustes notwendigen Formeln dargestellt und erläutert.

### 2.4.1 Druckverlust

Um den Druckverlust berechnen zu können muss zunächst die Art der Strömung, die durchströmte Form und die Oberflächenbeschaffenheit bekannt sein. Da in der Bachelorarbeit ein rechteckiger Querschnitt mit Kuperoberfläche durchströmt wird, wird im Folgenden nur auf den

Druckverlust bei nicht kreisförmigen Rohrquerschnitten und einer glatten Oberfläche eingegangen.

Zu Beginn jeder Rechnung muss mithilfe der Reynoldszahl der Strömungszustand bestimmt werden. Anschließend wird, je nach Strömungszustand, die Reibungszahl  $\lambda$  bestimmt. Liegt eine laminare Strömung vor, wird die Reibungszahl mit folgender Formel bestimmt:

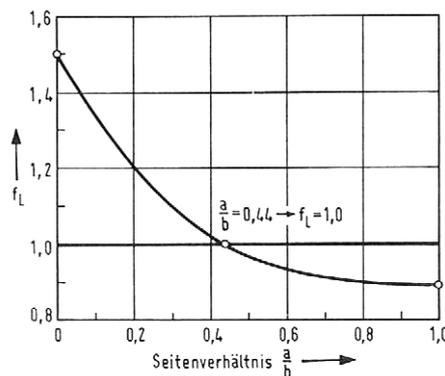
$$\lambda = f_L \cdot \frac{64}{Re} \quad \text{Gleichung 2-17}$$

$\lambda$  = Reibungszahl [-]

$f_L$  = Widerstandskorrekturfaktor [-]

$Re$  = Reynoldszahl [-]

Der Widerstandskorrekturfaktor wird für rechteckige Querschnitte über das Seitenverhältnis mit dem Diagramm in Abbildung 9 bestimmt. (Wagner 1992)



**Abbildung 9: Widerstands-Korrekturfaktor  $f_L$  für rechteckige Querschnitte bei laminarer Strömung in Abhängigkeit der Seitenverhältnisse (Wagner 1992)**

Liegt eine turbulente Strömung im Bereich:  $2300 < Re < 10^5$  vor, wird die Formel von Blasius verwendet. Diese ist in Gleichung 2-18 dargestellt und wird zur Bestimmung der Reibungszahl verwendet.

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad \text{Gleichung 2-18}$$

Zur Ermittlung des Druckverlustes wird die Reibungszahl anschließend in Gleichung 2-19 eingesetzt.

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot w^2}{d_h \cdot 2} \quad \text{Gleichung 2-19}$$

$\Delta p$  = Druckverlust [Pa]

$L$  = Länge des Rohres [m]

$\rho$  = Dichte Luft [ $\text{kg/m}^3$ ]

$w$  = Luftgeschwindigkeit [m/s]

$d$  = hydraulischer Innendurchmesser [m]

Der hydraulische Innendurchmesser wird für Rohre mit nicht kreisförmigem Querschnitt durch Gleichung 2-20 bestimmt.

$$d_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad \text{Gleichung 2-20}$$

a = Breite des Querschnitts [m]

b = Höhe des Querschnitts [m]

Wird der Druckverlust zunächst nach Gleichungen für inkompressible Strömungen berechnet, wird mit Gleichung 2-21 abschließend eine Korrektur für kompressible Strömungen durchgeführt. (Wagner 1992)

$$\Delta p = p_1 \left( 1 - \sqrt{1 - \Delta p_1 \frac{2}{p_1}} \right) \quad \text{Gleichung 2-21}$$

#### 2.4.2 Druckverlustbestimmung bei Parallel- oder Reihenschaltungen

Werden Rohre in einem System mit Parallel- und/oder Reihenschaltungen verbunden, muss zunächst der Widerstandsbeiwert R für die Rohrleitung bestimmt werden:

$$R = \frac{\Delta p}{\dot{V}^2} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

R = Widerstandsbeiwert [kg/m<sup>7</sup>]

Δp = Druckverlust [kg/m·s<sup>7</sup>]

Ṁ = Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

Mithilfe des Widerstandsbeiwertes kann anschließend der Druckverlust in Schaltungen bestimmt werden. Der Druckverlust bei Reihenschaltung wird dabei wie folgt berechnet:

$$\Delta p_{ges} = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots) \cdot \dot{V}^2 \quad \text{Gleichung 2-23}$$

Der Volumenstrom bleibt über die gesamte Reihenschaltung konstant.

Bei einer Parallelschaltung hingegen wird der gesamte Volumenstrom aufaddiert:

$$\dot{V}_{ges} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 + \dot{V}_4 \dots \quad \text{Gleichung 2-24}$$

Zur Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwertes wird Gleichung 2-25 verwendet.

$$\sqrt{\frac{1}{R_{ges}}} = \sqrt{\frac{1}{R_1}} + \sqrt{\frac{1}{R_2}} + \sqrt{\frac{1}{R_3}} + \sqrt{\frac{1}{R_4}} \dots \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Abschließend wird wie bei der Reihenschaltung der Druckverlust mithilfe des Volumenstroms berechnet:

$$\Delta p_{ges} = R_{ges} \cdot \dot{V}^2$$

Gleichung 2-26

Um bei einem System mit Parallel- und Reihenschaltungen den Gesamtdruckverlust zu berechnen, werden die einzelnen Druckverluste unter Beachtung der geschilderten Gleichungen zusammengefügt. (Prof. Dr. R. Cousin 2005; Höffer 2009)

## 2.5 Fahrzyklus

Um die für das Elektroauto notwendige Energiemenge bei Betrieb berechnen zu können, werden in der Kraftfahrzeugindustrie Fahrzyklen verwendet. Durch diese lässt sich die durch die Reibungs-, Höhen-, Beschleunigungs- und Luftwiderstände aufzubringende Energie berechnen. Auf Basis dieser Energiemengen, sowie der Energie die durch zusätzliche Elektronik wie Klimaanlage, Licht und Radio, wird die von der Batterie abgeführte Energiemenge bestimmt. Durch den Innenwiderstand der Batterie entsteht innerhalb der Batterie Verlustleistung in Form von Wärme. Im Folgenden werden die für die Tests verwendeten Fahrzyklen erläutert. (Taetz et al. 2012)

### 2.5.1 ADAC Elektrofahrzeug Zyklus

Der ADAC Elektrofahrzeug Zyklus, zu sehen in Abbildung 10, wird in dieser Bachelorarbeit verwendet, da er aus drei bewährten Fahrzyklen besteht und ein breites Spektrum der zu erwartenden Einsatzgebiete des Elektrofahrzeugs bietet. Die drei bewährten Fahrzyklen sind der Neue Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), die Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure (WLTP) und der für Elektrofahrzeuge angepasste ADAC Autobahnzyklus.

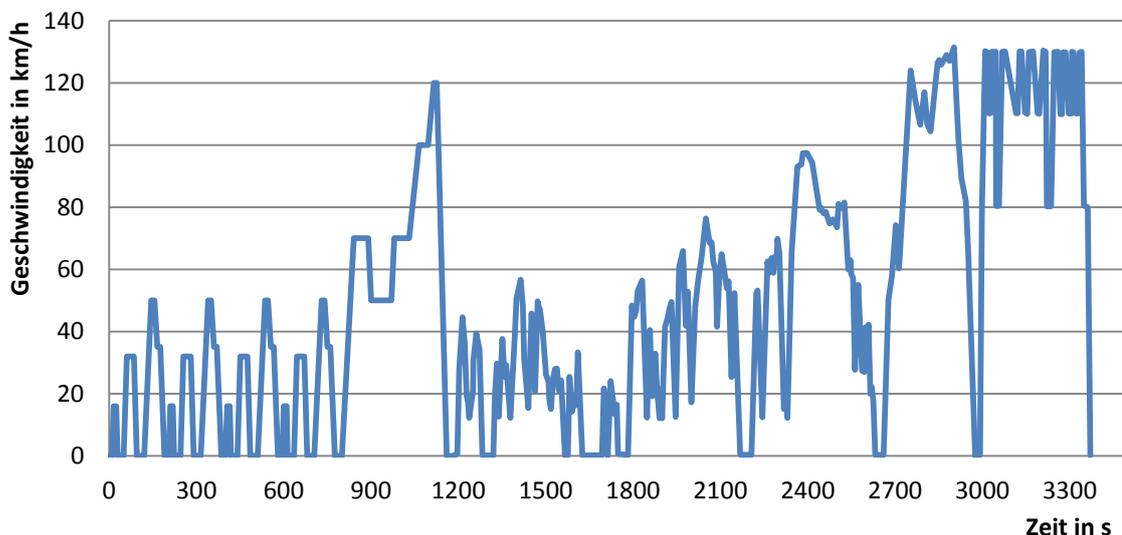


Abbildung 10: ADAC Elektrofahrzeug Zyklus

### 2.5.2 Neuer Europäischer Fahrzyklus

Der verwendete NEFZ ist ein synthetischer Fahrzyklus den es in verschiedenen Ausführungen gibt. Wie in Abbildung 11 zu sehen, gibt es eine Stadt und eine Landausführung. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in Dauer, Geschwindigkeit und der Anzahl der Stopps.

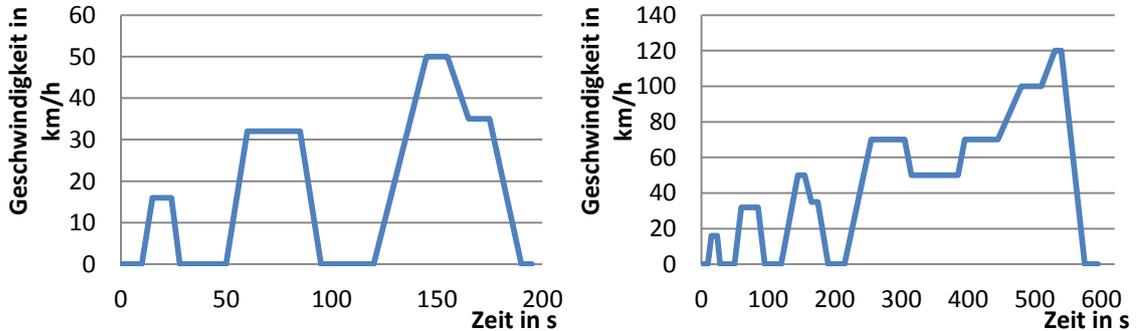
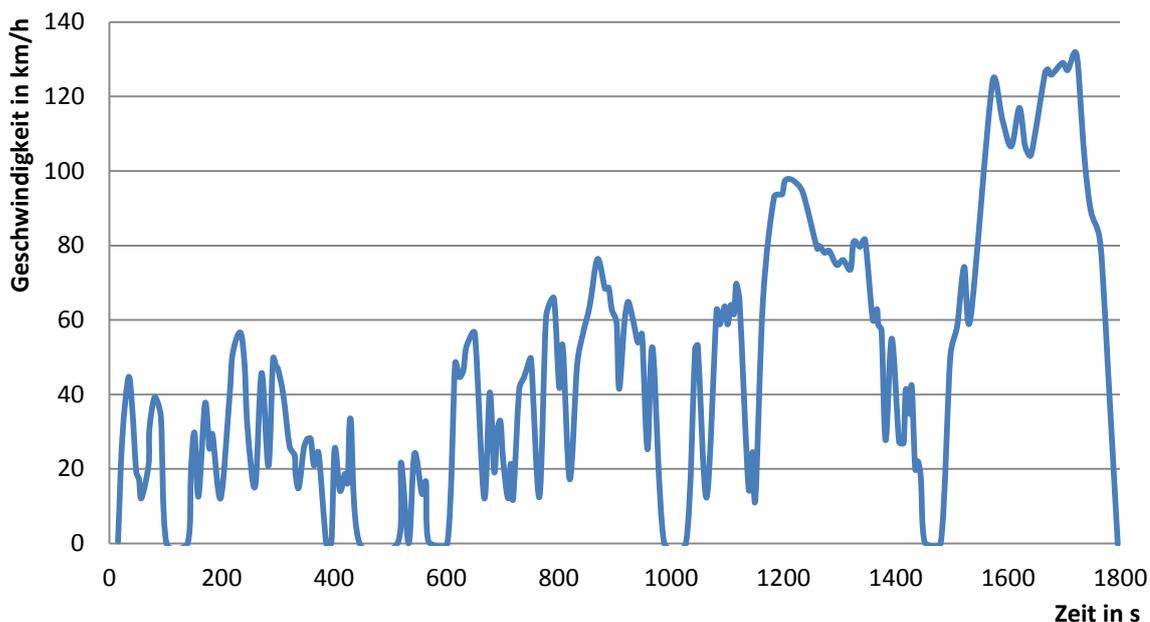


Abbildung 11: NEFZ-Stadt und NEFZ-Land

Im ADAC Elektrofahrzeug Zyklus wird der NEFZ in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase, die Stadtphase, stellt den innerstädtischen Betrieb dar und besteht aus drei aneinandergereihten Stadt NEFZ. Um möglichst realitätsnah zu sein, sind diese mit vielen Stop-and-Go-Szenarien bestückt. Die zweite Phase, siehe Abbildung 11 rechte Hälfte, simuliert den außerstädtischen Betrieb und beinhaltet auch eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Der kombinierte NEFZ hat eine Dauer von ca. 20 Minuten und die Strecken betragen in der ersten Phase ca. 4 Kilometer und in der zweiten Phase ca. 7 Kilometer.

### 2.5.3 Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure

Der WLTP ist ein realer Fahrzyklus, er unterscheidet sich dabei deutlich von den NEFZ und beinhaltet standardmäßig vier Phasen. Diese Phasen sind: Phase eins: low, Phase zwei: middle, Phase drei: high, Phase vier: extra high, und simulieren dabei alle Spektren eines Fahrbetriebes.

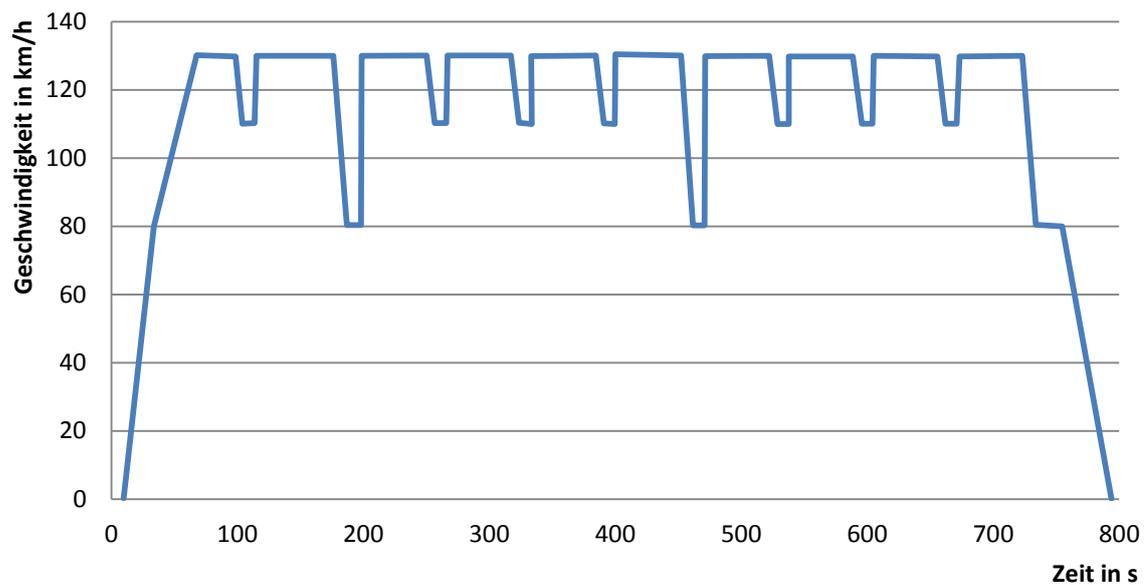


**Abbildung 12: Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure**

Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, dauert der WLTP ca. 30 Minuten und erreicht Spitzengeschwindigkeiten von 130 km/h. Er umfasst eine Strecke von insgesamt 22,7 Kilometern.

#### 2.5.4 ADAC Autobahnfahrzyklus

Der letzte Teil des ADAC Elektrofahrzeug Zyklus besteht aus dem ADAC Autobahnfahrzyklus. Durch Vollast-Beschleunigungen sowie einer Geschwindigkeit von 130 km/h, welche in vielen Europäischen Ländern die zugelassene Höchstgeschwindigkeit ist, wird die Batterie maximal belastet und bildet ein Extremszenario.



**Abbildung 13: ADAC Autobahn-Fahrzyklus**

Da die Geschwindigkeit während einer Autobahnfahrt nie konstant ist, sind in Abbildung 13 Geschwindigkeitswechsel, bedingt durch Baustellen oder Lastkraftwagen, dargestellt. Die Dauer beträgt ca. 14 Minuten und die Strecke ist ca. 10 Kilometer lang.

### 3 METHODIK UND ANSATZ

In diesem Kapitel werden die zur Auslegung des Kühlkonzeptes notwendigen Berechnungen und Auswahlmöglichkeiten vorgestellt. Als Basis eines Kühlkonzeptes dient zunächst die abzuführende Wärme. Die abzuführende Batteriewärme kann durch den Energieumsatz sowie dem Batterieinnenwiderstand berechnet werden. Der Energieumsatz wird in Kapitel 3.1 für den ADAC Fahrzyklus für Elektromobile berechnet. Anschließend werden in Kapitel 3.2 der Versuchsaufbau zu Untersuchungen an einer Lithium-Ionen Zelle der Größe 18650 beschrieben.

In Kapitel 3.3 werden zwei Batterieblockformen vorgestellt. Ein Batterieblock dient dem Schutz und der Kühlung der in ihm eingesetzten Batteriezellen. Die Kühlung findet durch eine Luftüberströmung der Platte sowie durch das Wärmespeicherfluid CryoSol<sup>plus</sup> statt. Im letzten Teil des Kapitels werden zwei Arten des Wärmespeicherfluides CryoSol<sup>plus</sup> vorgestellt.

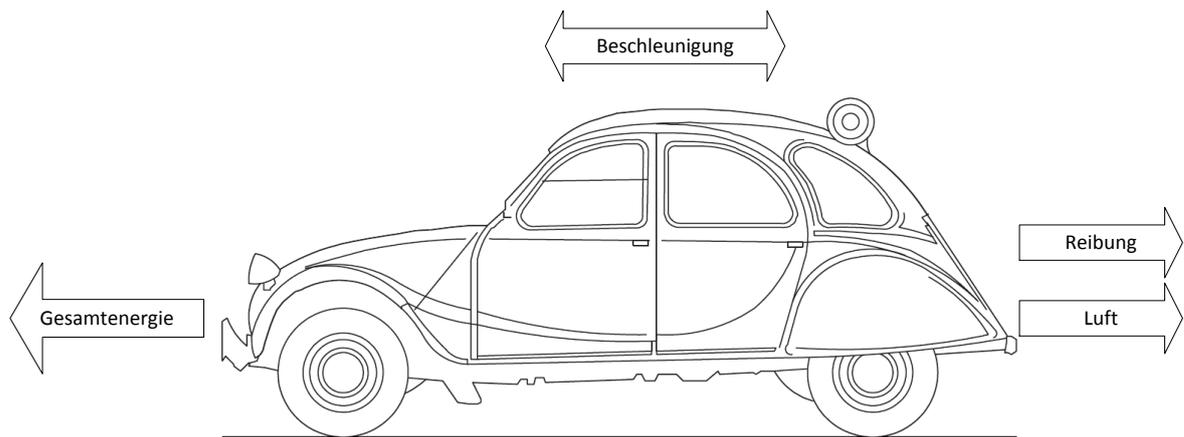
#### 3.1 Berechnungen Energieverbrauch Kraftfahrzeug

Um den Energieverbrauch eines Kraftfahrzeuges zu bestimmen, wird der in Kapitel 2.5 beschriebene Fahrzyklus verwendet. Die Energie, die ein Kraftfahrzeug während des Betriebes benötigt, setzt sich aus der Bewegungsenergie und der Energie aus der Grundlast zusammen. Die Bewegungsenergie wird mithilfe eines Fahrzyklus ermittelt und besteht aus der kinetischen und potentiellen Energie. Die Grundlastenergie mit einer Leistung von 2 Kilowatt repräsentiert die Energie, welche z.B. für Klimaanlage und Licht benötigt wird (Niekamp 2012). Eine Höhenänderung ist kein Bestandteil des vorhandenen Fahrzyklus. Deswegen wird im Folgenden die potentielle Energie ausgelassen. Mit Gleichung 3-1 wird zunächst der Energieverbrauch berechnet. Diese Gleichung wird in abgewandelter Form (Gleichung 3-2) verwendet um den Energieumsatz zu berechnen, welcher ausschlaggebend für die Batterieverlustwärme ist. Traffic steht dabei für den Energieumsatz.

$$E_{\text{Verbrauch}} = E_{\text{Beschl.}} + E_{\text{Luft}} + E_{\text{Reib.}} + P_{\text{Grund}} \cdot t \quad \text{Gleichung 3-1}$$

$$E_{\text{Traffic}} = |E_{\text{Beschl.}}| + E_{\text{Luft}} + E_{\text{Reib.}} + P_{\text{Grund}} \cdot t \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 14 die Energiebilanz eines Autos dargestellt. Die Fahrtrichtung liegt in Pfeilrichtung der Gesamtenergie. Zu beachten ist dabei, dass die Beschleunigungskraft bei steigender Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung ausgerichtet ist, und bei einem Abbremsvorgang mit der Fahrtrichtung.



**Abbildung 14: Energiebilanz eines Autos mit Fahrtrichtung links (Online1 & Minder.Webdesign)**

Da in einem Fahrzyklus nur Geschwindigkeiten und deren Dauer angegeben sind, wird zunächst die positive und negative Beschleunigung des Fahrzeugs ermittelt. Um die benötigten Leistungen zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen und anschließend mit der Zeit die Energie berechnen zu können, sind folgende Werte notwendig: die Masse, der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ , die Stirnfläche der Fahrzeugs, sowie der Rollwiderstandsbeiwert  $c_r$ .

### 3.1.1 Beschleunigung

Durch eine Beschleunigung des Kraftfahrzeugs steigt die kinetische Energie, dessen Indikator die Geschwindigkeit ist. Mit Gleichung 3-3 wird die zum Erreichen einer Geschwindigkeit notwendige Energie berechnet.

$$E_{\text{Beschl.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad \text{Gleichung 3-3}$$

m = Masse [kg]

v = Geschwindigkeit [m/s]

Bei einem Bremsvorgang wirkt die Massenträgheit des Systems und wird mit ebenfalls mit Gleichung 3-3 berechnet.

### 3.1.2 Reibung der Reifen

Die Energie die aufgrund des Rollwiderstands aufzubringen ist, wird mit Gleichung 3-4 berechnet. Die Energie ist dabei von der Masse des Fahrzeuges, dem Rollwiderstandsbeiwert, der Erdbeschleunigung und der zurückgelegten Strecke abhängig. Der Rollwiderstandsbeiwert ändert sich je nach Gummimischung der Reifen und der Oberflächenbeschaffenheit der Straße, wird hier aber konstant angenommen.

$$E_{\text{Reib.}} = c_r \cdot g \cdot m \cdot s \quad \text{Gleichung 3-4}$$

$C_r$	= Rollwiderstandsbeiwert	[-]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$s$	= zurückgelegte Strecke	[m]

### 3.1.3 Luftreibung

Die Energie, die zur Überwindung des Luftwiderstandes aufgebracht werden muss, ergibt sich durch Gleichung 3-5. Erwähnenswert dabei ist, dass die Geschwindigkeit einen quadratischen Einfluss auf den Energieaufwand hat.

$$E_{Luft} = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot s \quad \text{Gleichung 3-5}$$

$C_w$	= Luftwiderstandsbeiwert	[-]
$A$	= Stirnfläche des Fahrzeugs	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	= Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$s$	= zurückgelegte Strecke	[m]

### 3.1.4 Gesamtenergie

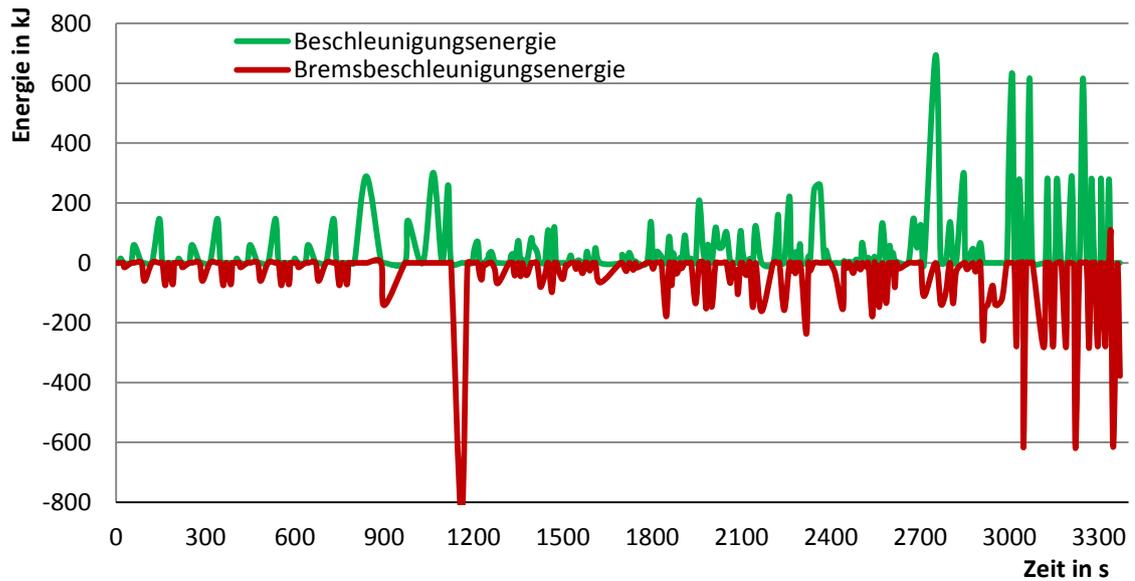
Bei den Berechnungen der Energiewerte werden in dieser Bachelorarbeit die Werte eines Golf VI verwendet, da der Golf in Deutschland eines der meistgefahrenen Autos ist. Die verwendeten fahrzeugspezifischen Werte sind in Tabelle 4 gezeigt.

**Tabelle 2: Fahrzeugspezifische Werte**

Indize	Wert	Einheit
Masse Fahrzeug	1532	kg
Rollwiderstandsbeiwert	0,017	[-]
Dichte Luft	1,2	kg/m <sup>3</sup>
Luftwiderstandsbeiwert	0,31	[-]
Stirnfläche Fahrzeug	2,114	m <sup>2</sup>

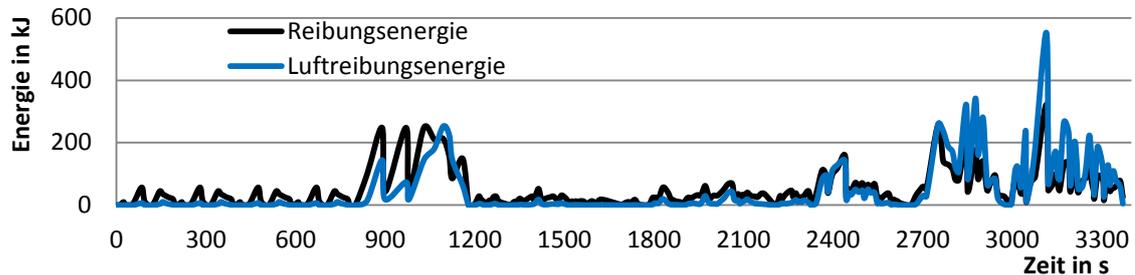
Mittels der Gleichungen aus Kapitel 3.1 und der Fahrzeugwerten aus Tabelle 2 wird die Fortbewegungsenergie bestimmt. Die Energiewerte werden für die Zeitschritte des Fahrzyklus berechnet und in eine Tabelle eingetragen. Zwecks der besseren Übersichtlichkeit werden die Verläufe in drei Abbildungen aufgeteilt.

In Abbildung 15 ist der Energieverlauf der positiven und negativen Beschleunigung während des ADAC Elektrofahrzeug Zyklus dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass jeweils nur eine Art der Beschleunigung angewandt wird. Die Beschleunigungs- und Bremsbeschleunigungsenergien würden sich bei einer vollständigen Rekuperation ausgleichen.



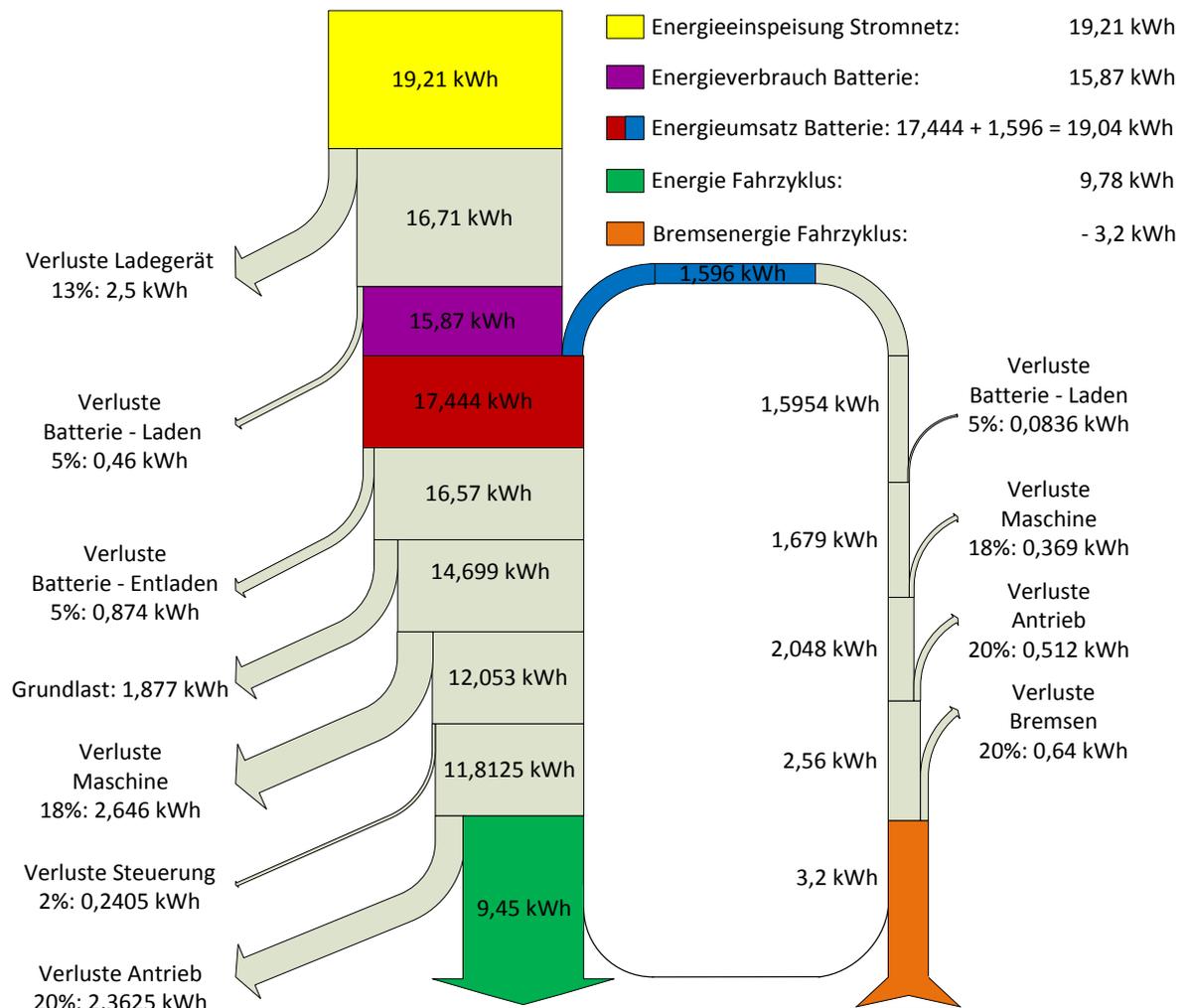
**Abbildung 15: Verlauf der Beschleunigungs- und Bremsenergie während des ADAC Fahrzyklus**

Durch Abbildung 16, unter Betrachtung des Fahrzyklus in Abbildung 10, wird vor allem der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Lufttreibungsenergie deutlich. Die Energien sind nicht rekuperierbar und können nur durch eine verbesserte Aerodynamik und einen besseren Rollwiderstandsbeiwert durch z.B. härtere Gummimischungen verringert werden.



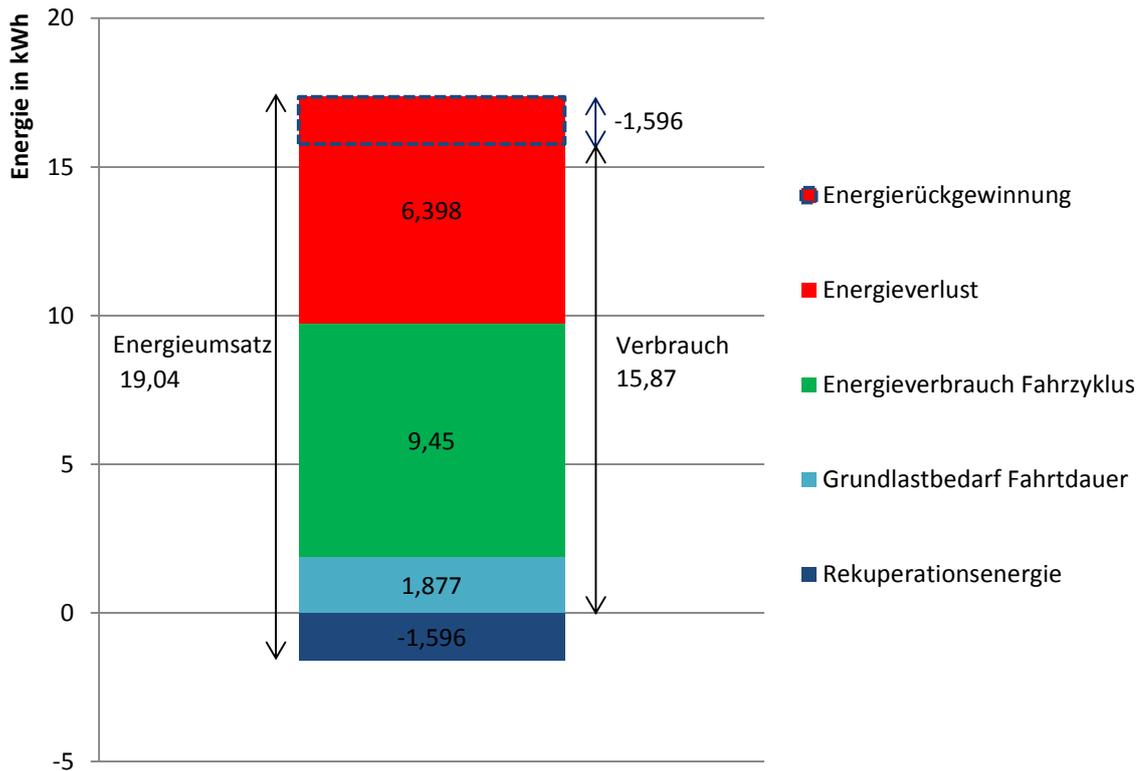
**Abbildung 16: Verlauf der Straßen- und Lufttreibungsenergie während des ADAC Fahrzyklus**

Nachdem die Fortbewegungsenergie bestimmt wurde, wird mithilfe des Gesamtwirkungsgrades des Fahrzeugs die Energie bestimmt, die tatsächlich verbraucht und umgesetzt wird. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems setzt sich aus den Wirkungsgraden des Antriebes, der Steuerung und der Maschine zusammen. Bei dem Rekuperieren entstehen neben den Wirkungsgradverlusten zusätzlich Verluste durch die Radbremsung. Zur Bestimmung der Gesamtenergie wird die Grundlastenergie einbezogen. In Abbildung 17 ist ein Sankey Diagramm mit den Energieverläufen und Wirkungsgraden dargestellt.



**Abbildung 17: Energiebilanz ADAC Fahrzyklus**

Durch die Verlustenergie und die Rekuperation steigt der Energieumsatz zusätzlich an. Der Verbrauch hingegen sinkt durch die Rekuperation leicht. Die gesamten Energiemengen, die im ADAC-Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge fließen, sind zur besseren Übersicht in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Energiemengen: ADAC Elektrofahrzeug Zyklus**

Der Energieumsatz setzt sich aus der Fortbewegungsenergie, der Verlustleistung, dem Grundlastbedarf und der Rekuperationsenergie zusammen. Beim Energieverbrauch wird die Rekuperationsenergie von der Gesamtenergie abgezogen und somit kleiner.

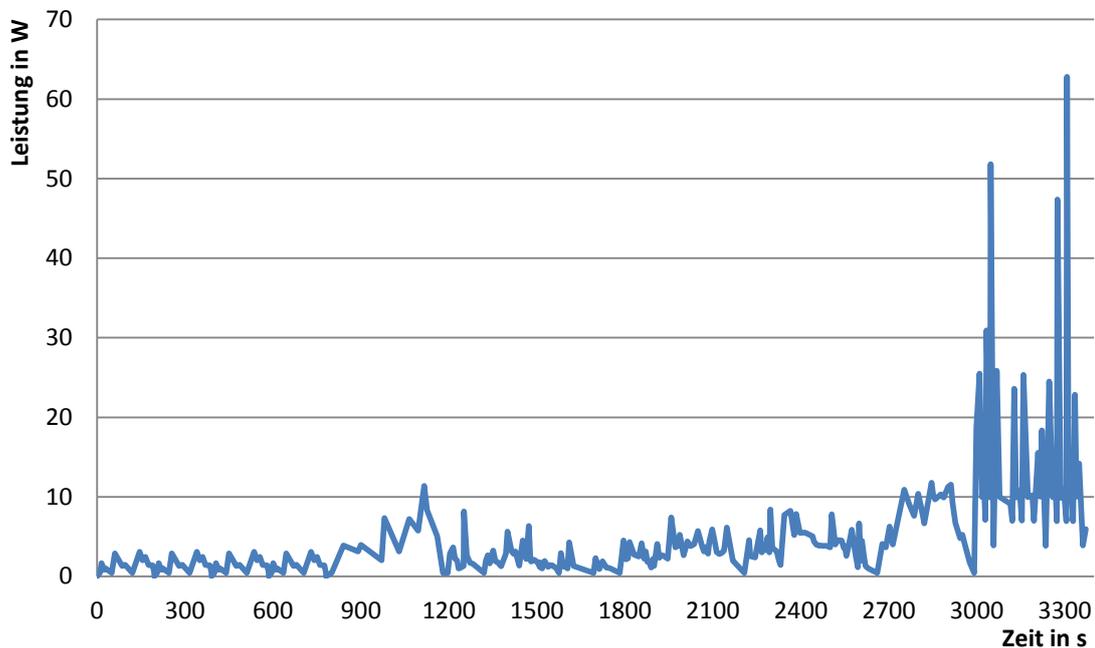
### 3.1.5 Berechnung Zelleistung

Für die folgenden Betrachtungen werden die energetischen Daten des Fahrzyklus dargestellt. Dabei werden Werte für den Verbrauch und den Energieumsatz angegeben. Um die abgefragte Leistung auf eine einzelne Batteriezelle spezifizieren zu können wird von einer vorgeschlagenen Gesamtkapazität von 44,16 kWh, verteilt auf 4800 Zellen, ausgegangen. In Tabelle 3 werden die Verbrauchswerte der Kapazität gegenübergestellt. Zusätzlich wird die theoretisch mögliche Reichweite dargestellt.

**Tabelle 3: Vergleich der Energiedaten einer Gesamtbatterie (4800 Zellen) mit einer einzelnen Zelle**

	Kapazität	Verbraucht ADAC	Verbrauch auf 100 km	Reichweite	Energieumsatz	⊙ Leistung
<b>Batterie (gesamt)</b>	44,16 kWh	15,75 kWh	34,73 kWh	127 km	41,73kWh	20,35 kW
<b>Zelle</b>	9,2 Wh	3,28 Wh	7,24 Wh	-	8,69 Wh	4,24 W

Bei den experimentellen Untersuchungen einer Zelle in Kapitel 3.2 werden die Leistungsverläufe während eines Fahrzyklus verwendet. Die durchschnittliche Leistung einer Zelle beträgt, wie in Tabelle 3, dargestellt 4,24 Watt. Der zeitlich aufgelöste Leistungsverlauf einer einzelnen Zelle ist in Abbildung 19 dargestellt.



**Abbildung 19: Leistungsverlauf einer einzelnen Batteriezelle während des ADAC Fahrzyklus**

### 3.2 Experimentelle Untersuchungen an einer Sanyo 18650 Zelle

Die experimentellen Untersuchungen an einer Sanyo 18650 Lithium-Ionen Zelle wurden zur Lokalisierung der Wärmequellen und Bestimmung des Innenwiderstandes durchgeführt. Der Innenwiderstand ist maßgeblich für die Abwärme verantwortlich. In der Fachliteratur wird bei Lithium-Ionen Zellen eine Abwärme der Batteriezellen erwartet, die etwa 5 Prozent des Energieumsatzes entspricht. Um diesen Wert genauer zu erfassen, wird innerhalb der Bachelorarbeit die Zelle mit einem Batterietestgerät der Marke BaSyTec geprüft. Die Wärmeentwicklung wird dabei mit einem Datenlogger des Typs Delfin und einer Wärmebildkamera aufgezeichnet.

Im ersten Unterkapitel werden die grundlegenden Batteriedaten sowie der Versuchsaufbau, inklusive notwendiger Vorbereitungen, beschrieben. Anschließend werden die vier durchgeführten Versuche genauer beschrieben. Der erste Versuch dient der Bestimmung des Innenwiderstandes der Batteriezelle. Der Innenwiderstand wird in den drei folgenden Versuchen verwendet, um die Verlustleistungen berechnen zu können. Bei den anschließenden Versuchen zur energetischen und thermischen Darstellung des Batterieverhaltens werden drei verschiedene Zyklen verwendet. Diese sind: ein Ladezyklus bei zwei Ampere, ein Entladezyklus bei 5 Ampere und der ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge. Bei der Entladung mit 5 Ampere wird zusätzlich die Wärmeverteilung bei unterschiedlicher Minuspolkontaktierung dargestellt. Um Messfehler zu minimieren, wurde jeder Versuch dreimal wiederholt.

### 3.2.1 Versuchsaufbau und Vorbereitung

Die Versuche wurden an einer Zelle von Sanyo des Typs 18650F durchgeführt. Die Zelle stammt aus einem Batteriepack des Herstellers Enerdan der Bauform 18650. Diese Zelle ist auf Abbildung 20 dargestellt und hat eine Höhe von 64,7 mm, sowie einen Durchmesser von 18,05 mm.



Abbildung 20: Batterie zelle mit Halterung

Die Batterie zelle besitzt laut Hersteller eine typische Kapazität von 9,62 und eine minimale Kapazität von 9,25 Wattstunden. Die Zelle wird zur Bestimmung der Wärmeverteilung mit maximalen Lade- und Entladeströmen, 2 und 5 Ampere, belastet. Die Entladeschlussspannung von 3 Volt und die maximale Spannung von 4,2 Volt sind unbedingt einzuhalten, da sonst eine lokale Überhitzung bis zur Entzündung möglich ist. Um einen thermal Runaway zu verhindern, werden innerhalb des Versuchs die Betriebstemperaturen eingehalten. Zur Übersicht sind diese und andere wichtige Daten des Herstellers in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Datenblatt der Lithium-Ionen Batterie zelle (Enerdan)

<b>Empfohlene Spannung</b>	3,7V
<b>Typische Kapazität</b>	2600mAh (9,62Wh)
<b>Minimale Kapazität</b>	2500mAh (9,25Wh)
<b>Normalladen</b>	500mA x 5,5 Std. bis 4,2V
<b>Schnellladen</b>	1250mA x 2.5 Std. bis 4,2V
<b>Maximaler Ladestrom</b>	2000mA
<b>Maximaler Entladestrom</b>	5000mA (kontinuierlicher Modus)
<b>Entladeschlussspannung</b>	3,0V
<b>Farbe</b>	Weiß / Rot
<b>Betriebstemperatur</b>	0 – 45°C (Laden) -20 – 60°C (Entladen)
<b>Lagertemperatur</b>	-20 – 50°C (1 Woche) -20 – 35°C (6 Monate)

Vorbereitend ist die Zelle von dem PVC-Shrink-Schlauch befreit worden um genaue Temperaturmessungen durchführen zu können. Anschließend wurde die Batterie mittels einer Halterung auf einer Trägerplatte befestigt. Abschließend wurde die Konstruktion inklusive Batterie mit mattschwarzem Lack besprüht um auf den Wärmebildaufnahmen störende Reflektionen zu vermeiden.

Für den Versuch wurde die geschwärzte Halterung in einem Versuchsschrank befestigt. Die Wärmebildkamera wurde in einem Abstand von ca. 30 cm zur Batterie angebracht. Die Kontakte der Batterie wurden mit dem BaSyTec verbunden, um Ströme sowie Spannungen vorgeben und

messen zu können. Zur Messung der Umgebungstemperatur wurde an den BaSyTec ein Widerstandsthermometer vom Typ PT-100 angeschlossen. Anschließend wurden vier PT-100 Messsonden mit Vierleitermesstechnik, sowie zwei Kabel zur Batteriespannungsmessung an den Delphin Datenlogger angeschlossen. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 21 dargestellt.



**Abbildung 21: Versuchsaufbau mit schwarz lackierter Batterie sowie Wärmebildkamera**

### **3.3 Vorstellung Batterieblöcke**

In diesem Unterkapitel werden zwei Batteriemodelle vorgestellt. Beide Modelle beherbergen die Lithium-Ionen Zellen der Größe 18650 und können mit CryoSol<sup>plus</sup> gefüllt werden. Im Folgenden wird genauer auf die geometrischen und kühlungsspezifischen Daten eingegangen.

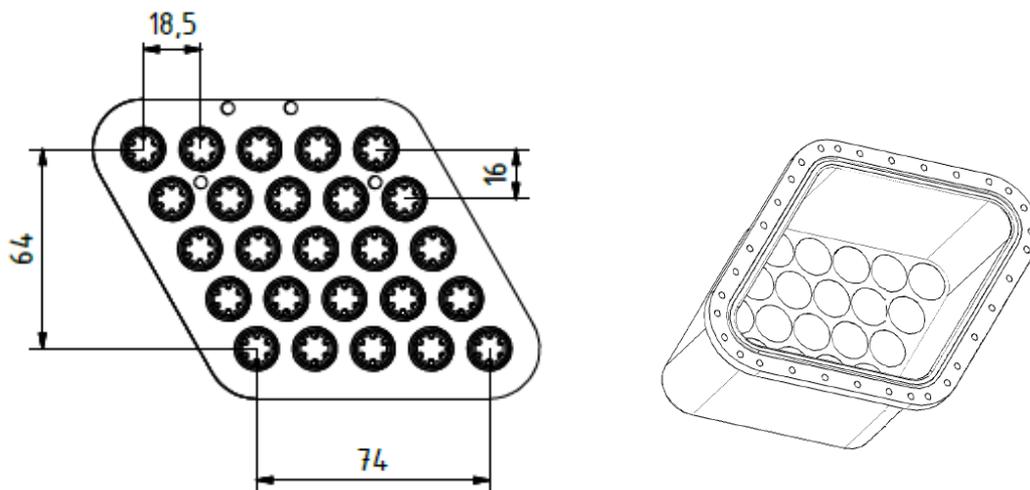
#### **3.3.1 Rhombischer Batterieblock**

Im Rahmen des Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II Projektes wurde im Vorfeld ein Batterieblockmodell mit einer rhombischen Form entwickelt. Das Modell beherbergt 25 Zellen der Größe 18650 mit einer Gesamtkapazität von ca. 230 Wattstunden. Wie in Abbildung 22 zu erkennen, besteht es aus zwei Teilen, einem Kunststoffbehälter und einer Kupferdeckplatte zur Kontaktierung.



**Abbildung 22: Rhombischer Batterieblock Prototyp**

Im Folgenden wird genauer auf die Eigenschaften des Modells eingegangen, dazu wird in Abbildung 23 eine Draufsicht sowie eine 3D- Ansicht des Modells verwendet. Auf der linken Hälfte der Abbildung ist zu erkennen, dass die Zellen in fünf Reihen und fünf Spalten gleichmäßig im Modell angeordnet sind. Die Deckplatte hat eine Oberfläche von ca. 140 cm<sup>2</sup>. Durch eine direkte Kontaktierung der Batteriezellen agiert sie zum einen als Stromleiter und zum anderen als Wärmeleiter.

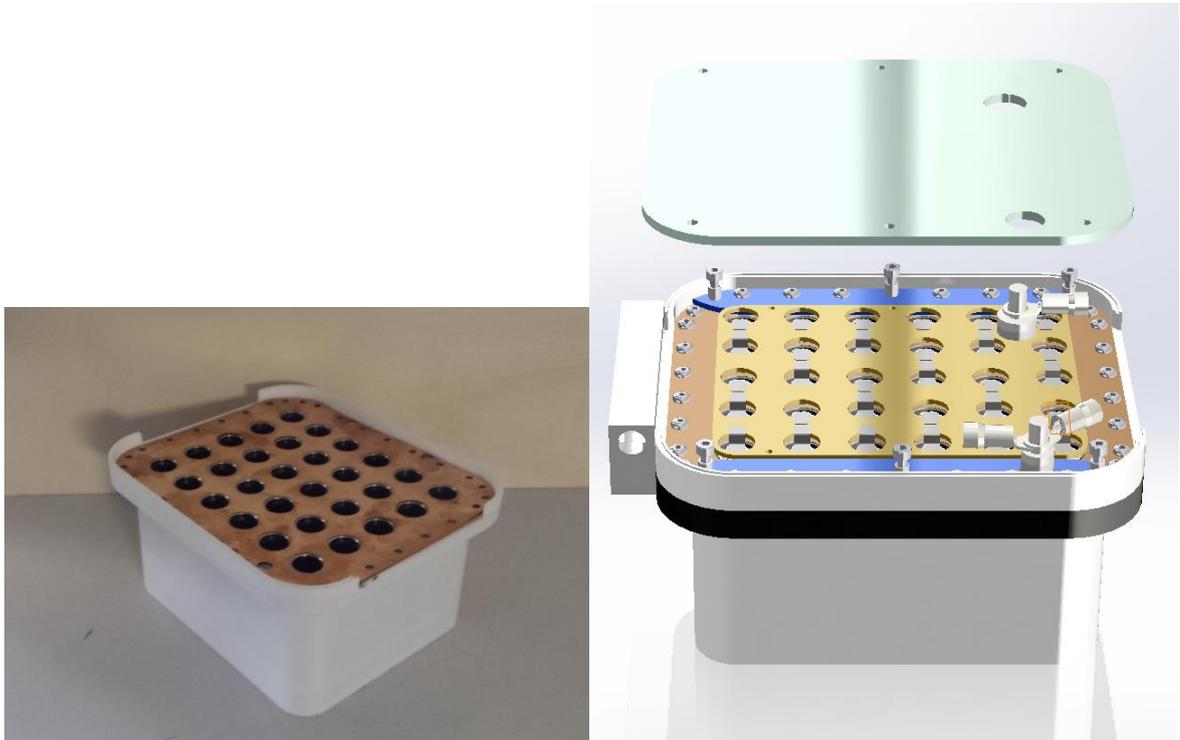


**Abbildung 23: Rhombisches Batteriemodell**

Der in Abbildung 23 auf der rechten Hälfte dargestellte Behälter wird durch Schrauben mit der Deckplatte verbunden. Durch eine Gummidichtung zwischen den Teilen wird die Kontaktstelle abgedichtet. Dies ermöglicht es, während des Fahrbetriebes 150 ml des PCS zwischen den Zellen und dem Behälter zur Wärmespeicherung zu lagern.

### 3.3.2 Batteriemodell Rechteck

Das rechteckige Batteriemodell fasst insgesamt 30 Batteriezellen der Größe 18650 und hat somit eine Gesamtkapazität von ca. 276 Wattstunden. Auf der linken Seite der Abbildung 24 ist ein Prototyp mit Boden und Kontaktplatte dargestellt.

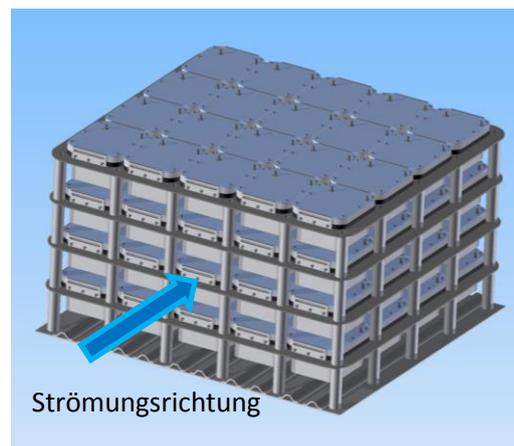


**Abbildung 24: Rechteckiges Batteriemodell**

Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein 3D Konstruktionsplan des fertigen Modells dargestellt. Es werden zwei Kupferplatten zur Kontaktierung der Batterien verwendet. Die untere Platte dient der Minuspolkontaktierung der Platte und ebenfalls, wie beim rhombischen Modell zur Wärmeleitung. Die hier etwas heller dargestellte Platte ist durch kleine Föhnchen mit den Pluspolen der Batteriezellen verbunden. Der Plattenzwischenraum, mit einer Höhe von einem Zentimeter, wird von Luft zur Kühlung durchströmt. Damit der Luftstrom nicht unkontrolliert aus dem Modell entweichen kann, liegt der auf Abbildung 24 angehobene Deckel dicht auf dem Behälter auf.

Die Minuspolkontaktplatte hat eine gesamte Fläche von ca.  $180 \text{ cm}^2$ , wovon  $145,22 \text{ cm}^2$  tatsächlich mit dem Luftstrom in Kontakt treten. Mit der Höhe von  $1 \text{ cm}$  ergibt sich ein Volumen des Kühlkanals von  $145,22 \text{ cm}^3$ . In den Zwischenräumen der Zellen und dem Boden können insgesamt  $320 \text{ ml}$  PCS vorgehalten werden.

80 dieser Blöcke sollen zu einem Stack verschaltet werden, wobei für eine Elektroauto zwei parallele Stacks vorgesehen sind. Dabei werden, in der dargestellten Strömungsrichtung, je vier Blöcke in Reihe geschaltet. Jede Reihe wird mit fünf weiteren Reihen parallel geschaltet und anschließend viermal gestapelt. Zum besseren Verständnis ist ein Stack in Abbildung 25 dargestellt.

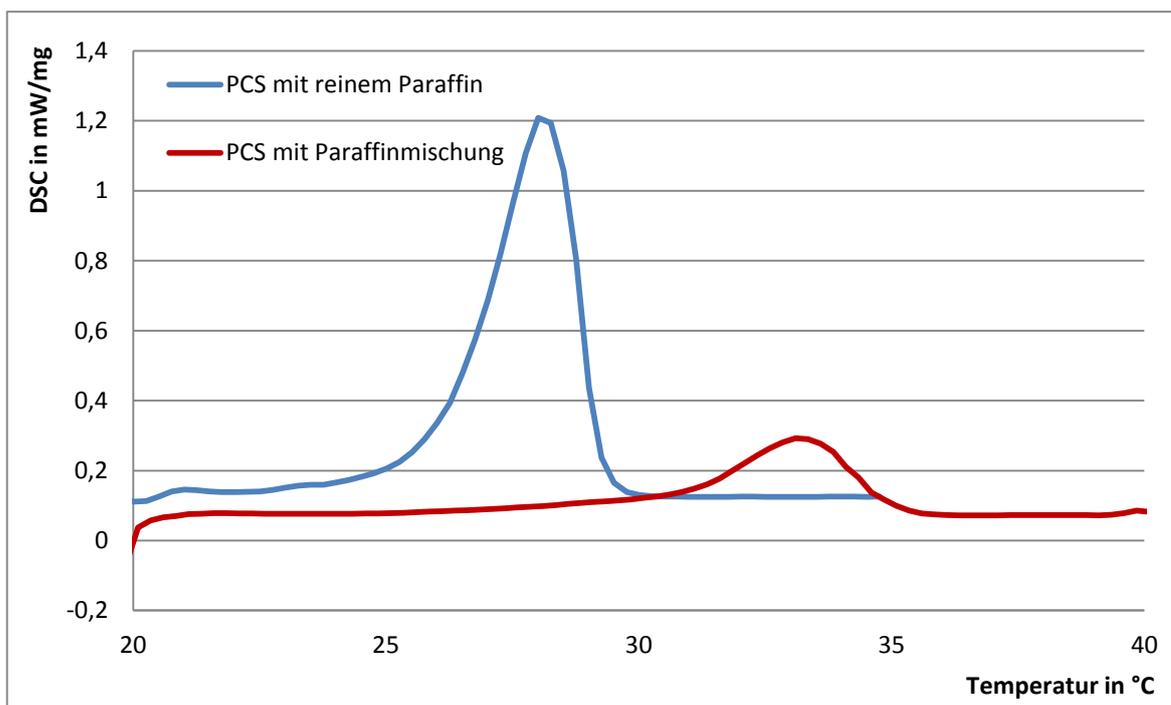


**Abbildung 25: Ein Stack mit 80 Batterieblöcken**

### **3.4 Wärmespeicherung durch CryoSol<sup>plus</sup>**

In dieser Arbeit wurden zwei Varianten des PCS CryoSol<sup>plus</sup> betrachtet. Durch den Einsatz verschiedener Paraffine ist es möglich den Schmelzpunkt des CryoSol<sup>plus</sup> für den jeweiligen Einsatzbereich anzupassen. Kann ein Schmelzpunkt durch den Einsatz eines reinen Paraffins nicht eingestellt werden, können zwei Paraffine miteinander vermischt werden um die gewünschte Temperatur einzustellen. Die Schmelzenthalpie einer Mischung liegt deutlich unter der eines reinen Paraffins. Für den Einsatz in dem Batterieblock wurden während der Bachelorarbeit zwei Varianten des CryoSol<sup>plus</sup> hergestellt, eine aus einem reinen Paraffin und eine aus einer Mischung. Das reine CryoSol<sup>plus</sup> wurde mit dem Paraffin Parafol 18 hergestellt und das gemischte CryoSol<sup>plus</sup> aus Parafol 18 und Parafol 20.

Durch eine dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) Messung können die thermischen Eigenschaften vermessen werden. Zu diesen gehören die Schmelzenthalpie und der Schmelzbereich. Beide Werte sind für die Auslegung eines Kühlkonzepts notwendig. In Abbildung 26 sind beide DSC Messungen dargestellt.



**Abbildung 26: DSC Messung von CryoSol<sup>plus</sup> mit einem reinen und einem gemischten Paraffin**

Die Schmelzenthalpie des CryoSol<sup>plus</sup> mit einem reinen Paraffin liegt bei 68,81 J/g und der Schmelzbereich erstreckt sich von ca. 24 °C bis 30 °C. Die Mischung hat eine Schmelzenthalpie von 44,33 J/g und einen Schmelzbereich von ca. 30 °C bis 35 °C.

## 4 ERGEBNIS UND DISKUSSION: KÜHLKONZEPT

In diesem Kapitel soll mithilfe der in Kapitel 3 dargestellten Komponenten ein Kühlkonzept vorgestellt werden. Ausschlaggebend für die Kombination der Komponenten ist dabei, dass die Batterietemperatur nicht über 35 °C ansteigen soll (Zhang et al. 2013). Zusätzlich soll darauf geachtet werden dass möglichst wenig Energie der Batterie zur Kühlung aufgewendet werden muss.

Zunächst werden mithilfe von Wetterdaten die Randbedingungen bestimmt. Mithilfe des in Kapitel 4.2 ermittelten Innenwiderstandes und den Energieumsätzen des ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge, können anschließend die Wärmeströme berechnet werden. Mithilfe der Randbedingungen wird eine geeignete PCS-Blockdesignkombination ausgewählt. Unter Beachtung der Wärmeströme und der Kühlkontaktfläche des Batterieblocks kann anschließend ein Lüfter zur konvektiven Wärmeabfuhr vorgeschlagen werden. Abschließend wird ein Batterietemperaturverlauf, mithilfe der ausgewählten Komponenten, berechnet und grafisch dargestellt.

### 4.1 Einflussfaktor Umgebungstemperatur

Bei der Kühlung von Batterien in Elektromobilen ist die Umgebungstemperatur der wichtigste äußere Einflussfaktor. Ohne den Einfluss von aktiver Kühlung oder der Verlustwärme nehmen die Batterien, sowie das PCS, die Umgebungstemperatur an. Werden Umgebungstemperaturen nahe der Batteriewohlfühltemperatur von 35 °C erreicht, ist eine passive Kühlung aufgrund der geringen Temperaturdifferenz, ineffizient. Dies bedeutet, dass eine aktive Kühlung zugeschaltet werden muss. Im Folgenden wird der Temperaturverlauf in München des Jahres 2013, grafisch dargestellt und ausgewertet. München wurde deshalb gewählt, weil aufgrund der südlichen Lage die Temperatur dort meist höher ist als im Rest Deutschlands. Zu bemerken ist, dass die Kühlung auch unter widrigen Bedingungen funktionieren muss. Der Temperaturverlauf wird deshalb zunächst genutzt um die Durchschnittlichen Bedingungen zu charakterisieren.

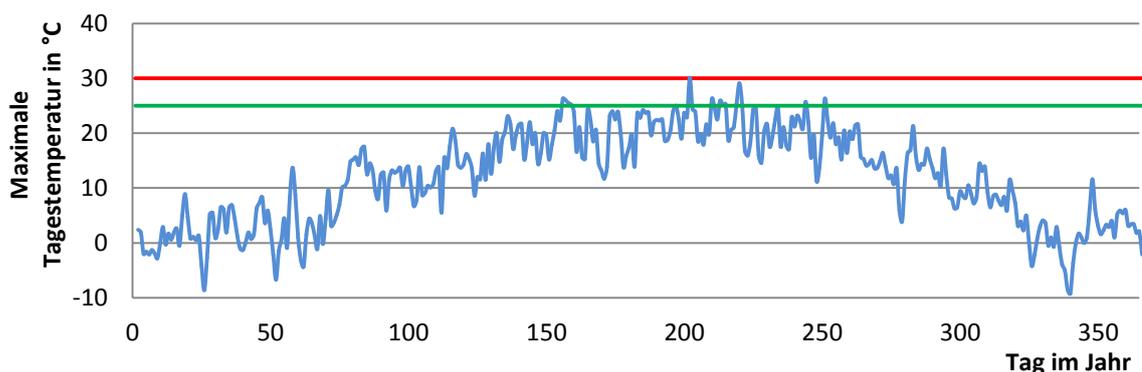


Abbildung 27: Verlauf der maximalen Tagestemperatur in München aus dem Jahr 2012

In Abbildung 27 ist der Verlauf der maximalen Tagestemperaturen dargestellt, dabei sind die Temperaturen 25 °C und 30 °C für eine bessere Übersichtlichkeit farblich markiert. Während des Verlaufs liegen die höchste Temperatur bei 30,1 °C und die niedrigste bei -9,2 °C. Der Großteil der Temperaturen befindet sich im Bereich zwischen 0 °C und 25 °C.

Aus diesen Werten folgt, dass ein Kühlung vor allem im Bereich zwischen 0 °C und 25 °C funktionieren muss. Da ein Kraftfahrzeug über den gesamten Jahresverlauf betrieben wird, sollten aber auch die Extremtemperaturen unter 0 °C und über 25 °C im Kühlkonzept berücksichtigt werden. Da diese Extremtemperaturen im über den Jahresverlauf selten auftreten, kann die Temperierung der Batterien in Ausnahmefällen mittels Energieverbrauchenden Anwendungen ermöglicht werden. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt beeinflussen die Batteriekapazität drastisch, deswegen sollte die Batterie durch eine Wärmequelle, wie Heizdrähte warmgehalten werden. Bei Temperaturen über 30 °C kann die Batterie durch die geringe Temperaturdifferenz mit der Luft nicht ausreichend gekühlt werden. Eine Möglichkeit die Kühlung zu unterstützen ist die Vorkonditionierung der Kühlungsluft durch einen Wärmetauscher.

## 4.2 Innenwiderstand und Wärmeverteilung einer 18650 Lithium-Ionen Zelle

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Untersuchungen einer 18650 Lithium-Ionen Zelle dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse des Innenwiderstandes der Zelle dargestellt. In den anschließenden Kapiteln wird mithilfe des Innenwiderstandes, zusätzlich zur Auswertung der Wärmeverteilung, die Verlustwärme dargestellt.

### 4.2.1 Messung Innenwiderstand Zelle

Um die Abwärmemenge der sich im Betrieb befindlichen Batteriezelle berechnen zu können, ist es notwendig den Innenwiderstand der Batteriezelle bestimmen. Dieser ist maßgeblich für die Abwärmeleistung verantwortlich. Mittels BaSyTec wird die Batterie abwechselnd, mit Leerläufen, geladen und entladen. Um eine Entwicklung des Innenwiderstandes während eines Zyklus zu ermitteln, wurde der Test im vollen und im leeren Zustand durchgeführt. Da die Batterietemperatur im Einsatz in der Regel zu Beginn der Umgebungstemperatur entspricht und zum Ende hin warm ist, wurde die volle Batterie bei 24,5 °C und die leere Batterie bei 52 °C gemessen. Aus den ermittelten Werten kann der Innenwiderstand mit Gleichung 4-1 ermittelt werden.

$$R_{Batt} = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

$V_1, I_1$  = Messwert im belasteten Zustand

$V_2, I_2$  = Leerlaufmesswert

In Tabelle 5 sind jeweils vier Messpunkte bei voller und bei leerer Batterie dargestellt.

**Tabelle 5: Widerstand in Ohm**

	Volle Batterie [ $\Omega$ ]; 24,5 °C	Leere Batterie [ $\Omega$ ]; 52 °C
	0,099280826	0,095436238
	0,096340847	0,090687041
	0,099506978	0,090687041
	0,100863891	0,092270107
<b>Mittelwert</b>	<b>0,098998135</b>	<b>0,092270107</b>

Tabelle 5 zeigt, dass der Innenwiderstand mit bei einer vollen Batterie und einer niedrigen Temperatur geringer ist, als bei einer leeren Batterie bei einer hohen Temperatur. Dabei beeinflusst, laut Literatur, vor allem die Temperatur die Höhe des Innenwiderstandes. Für weitere Berechnungen wird der Innenwiderstandsmittelwert einer vollen Batterie bei 24,5 °C verwendet. Da eine Temperatur von 24,5 °C der angestrebten Batterietemperatur näher kommt, wird die somit der entsprechende Innenwiderstand für weitere Berechnungen gewählt. Der Einfachheit halber wird ein aufgerundeter Wert von 0,099 Ω verwendet.

**Tabelle 6: Innenwiderstandeinstufung Lithium-Ionen Zellen**

Innenwiderstand [mΩ]	Batteriespannung [V]	Einstufung
75-150	3,6	<b>Exzellent</b>
150-250	3,6	<b>Gut</b>
250-350	3,6	<b>Grenzwertig</b>
350-500	3,6	<b>Schlecht</b>
Über 500	3,6	<b>Mangelhaft</b>

In Tabelle 6 ist eine Einstufung des Innenwiderstandes von Lithium-Ionen Batterien dargestellt. Der Wert von 99 mOhm liegt im exzellenten Bereich der Tabelle. Laut Hersteller hat die Batteriezelle einen Innenwiderstand unter 151 mOhm. Da die Batterie zum Messzeitpunkt neuwertig ist, stimmt das Ergebnis mit den Erwartungen überein. Mit steigender Zyklenanzahl steigt der Innenwiderstand, was auch zu einer steigenden Wärmeentwicklung führt. Die Abwärmeleistung wird mit Gleichung 4-2 berechnet.

$$P_{W\ddot{a}rme} = I^2 \cdot R_{innen} = U_{innen} \cdot I \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$P_{W\ddot{a}rme}$  = Abwärmeleistung [W]

$I$  = Strom [A]

$R_{innen}$  = Innenwiderstand [Ω]

$U_{innen}$  = innerer Spannungsabfall [V]

Zu Beginn wird der im gesamten System fließende Strom bestimmt. Hierzu wird folgende Gleichung verwendet.

$$I = \frac{P}{U} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Die Abwärmeleistung ergibt sich aus dem inneren Spannungsabfall und dem fließenden Strom. Der innere Spannungsabfall entsteht durch den Batterieinnenwiderstand und steht mit der Quellspannung und der Klemmspannung in folgender Relation:

$$U_{Quell} = U_{Klemm} + U_{innen} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

$U_{Quell}$  = Quellspannung [V]

$U_{\text{Klemm}}$  = Klemmspannung [V]

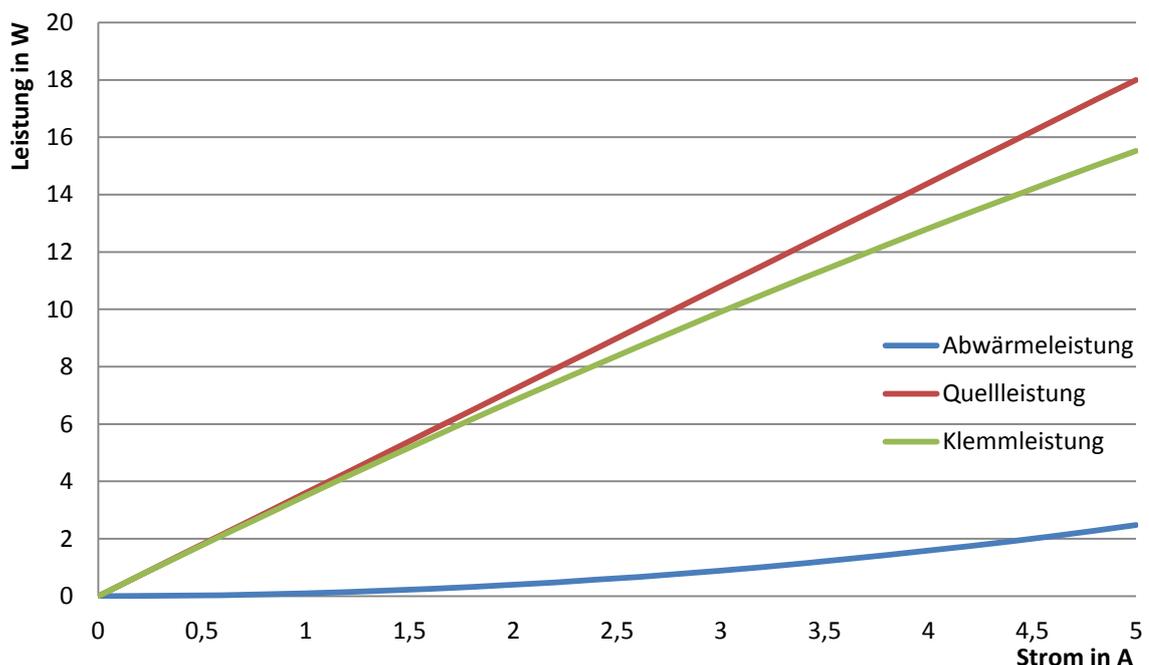
$U_{\text{innen}}$  = innerer Spannungsabfall [V]

Die Klemmspannung ist die Spannung, die beim Verbraucher ankommt, und energetisch genutzt werden kann. Die Spannung, die von der Zelle ausgeht (Quellspannung), ist höher als die nutzbare Klemmspannung. Die Differenz der beiden Spannungen ist der innere Spannungsabfall. Je höher dieser ist, desto weniger Energie kann der Batterie entnommen werden. Der innere Spannungsabfall ist direkt von dem fließenden Strom und dem Innenwiderstand abhängig und wird mit Gleichung 4-5 bestimmt:

$$U_{\text{innen}} = I \cdot R_{\text{innen}} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

Der innere Spannungsabfall steigt mit dem fließenden Strom und dem Innenwiderstand. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, steigt der Innenwiderstand durch Alterungsmechanismen innerhalb der Zelle. Bei einer neuwertigen Batteriezelle und einem geringen fließenden Strom ist der Wirkungsgrad der selbigen am höchsten.

Mithilfe von Gleichung 4-2 kann nun die Abwärmeleistung der Batterie zu jedem Betriebszustand berechnet werden. Zum Verständnis ist der Verlauf der Abwärme-, der Quell- und der Klemmleistung innerhalb der Herstellergrenzangaben in Abbildung 28 dargestellt.



**Abbildung 28: Theoretisch berechneter Leistungsverlauf einer Sanyo 18650F Zelle mit einem gemessenen Innenwiderstand von 0,099 mOhm**

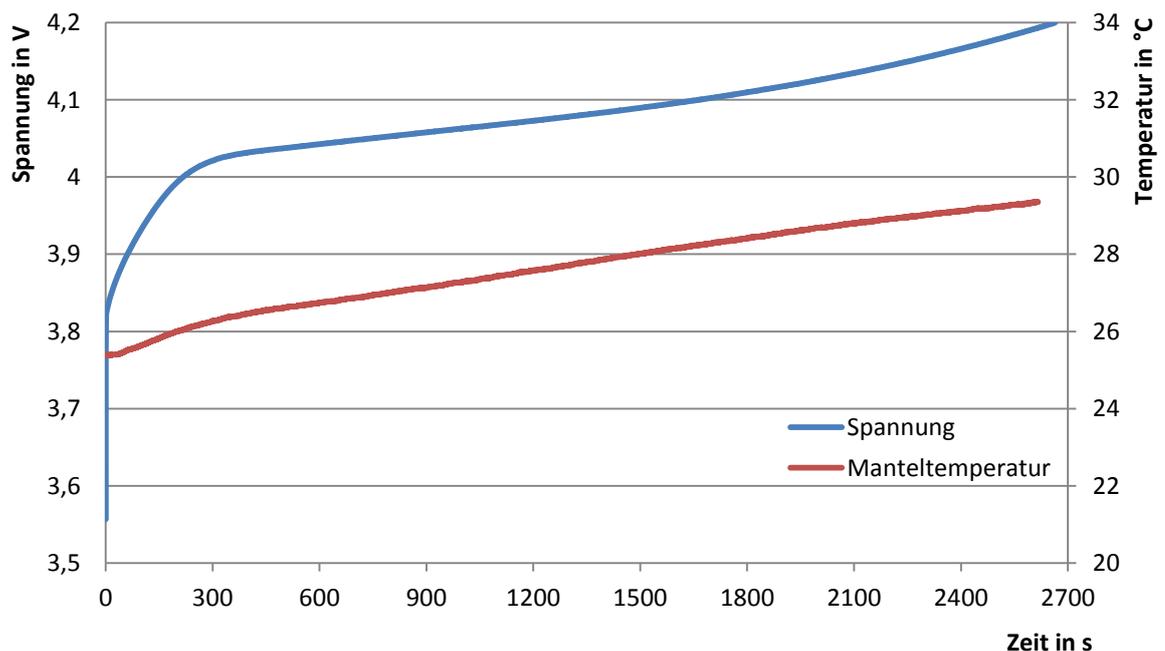
Die in Abbildung 28 dargestellten Leistungen ergeben sich durch den im gesamten Netz fließenden Strom. Für die Berechnungen wurde eine Zellspannung von 3,6 Volt angenommen. Es ergibt sich ein Wirkungsgrad von 98,625 Prozent bei einer Leistung von 1,8 Watt und einem Strom von 0,5 Ampere. Bei einer Leistung von 18 Watt und 5 Ampere ergibt sich ein Wirkungsgrad von 86,25 Prozent.

#### 4.2.2 Ladezyklus mit 2A

In Abbildung 29 ist der Spannungs- und Temperaturverlauf der Batteriezelle dargestellt. Dabei wurde die Batteriezelle mit einem Konstantstrom-Ladeverfahren mit 2 Ampere geladen. Die maximale Spannung der Zelle von 4,2 Volt wurde nicht überschritten. Aufgrund des integrierten Spannungsschutzes musste auf ein Konstantspannungs-Ladeverfahren verzichtet werden.

Die Spannung springt bei Beginn des Ladevorgangs auf ca. 3,85 Volt an, und flacht mit zunehmender Ladung ab. Der Spannungsanstieg bei  $t = 0$  zeigt den Einfluss des Innenwiderstandes. Durch den Verlauf wird deutlich, dass sich die Spannung nicht linear zur Ladung verhält. Der starke Anstieg zu Beginn ist durch die Zellchemie und der anschließend sinkende Anstieg durch den Einfluss der Temperatur auf den Innenwiderstand zu begründen. Die Spannung nimmt, sobald die Ladung beendet ist, um den Betrag des inneren Spannungsabfalls ab. Von Beginn des Versuchs bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums von 4,2 Volt dauert es ca. 45 Minuten.

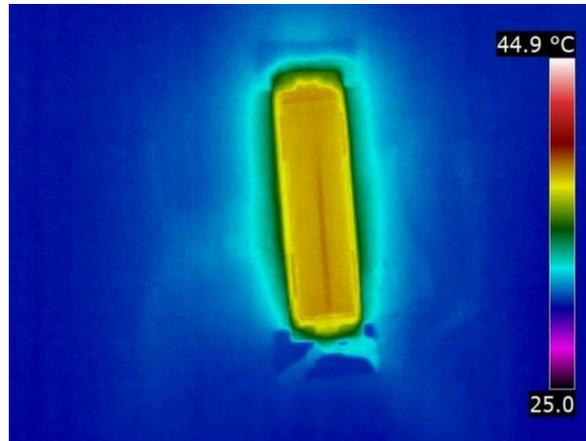
Der Temperaturverlauf zeigt, dass die Batterie bei einer Umgebungstemperatur von ca. 25,5 °C eine Temperaturerhöhung von insgesamt 4 °C aufweist. Diese Temperaturerhöhung der Batteriezelle ist nicht kritisch, die freiwerdende Wärme muss dennoch abgeführt werden.



**Abbildung 29: Spannungs- und Temperaturverlauf bei 2 A Ladezyklus**

Die gesamte übertragene Energie beträgt 9,01 Wattstunden. Davon wurden ca. 8,67 Wh in die Batterie eingespeist und ca. 0,34 Wattstunden, bedingt durch den Innenwiderstand, als Verlustenergie in Form von Wärme abgegeben. Durch den im Batteriepack eingebauten Spannungsschutz konnte die Batterie nicht auf eine Spannung von 4,2 Volt geladen werden.

Durch Gleichung 4-2 wird ein innerer Spannungsabfall von 0,198 Volt bei einem Strom von 2 Ampere berechnet. Mit Gleichung 4-4 folgt mit der Entladeschlussspannung von 4,2 Volt am Kontakt, eine Quellspannung von 4 Volt. Dadurch dass die Quellspannung nicht bis auf 4,2 Volt geladen wurde und durch die Verlustenergie konnte die vom Hersteller angegebene minimale Kapazität von 9,25 Wattstunden nicht erreicht werden.

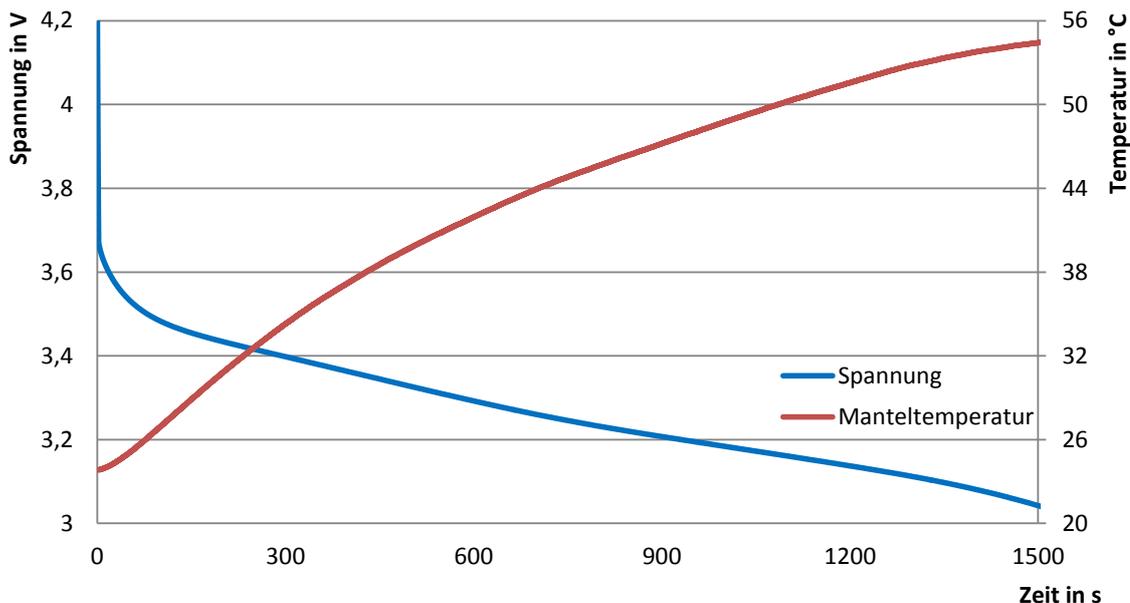


**Abbildung 30:Wärmebildaufnahme nach einem 2 A Ladezyklus**

In Abbildung 30 ist eine Wärmebildaufnahme der Batteriezelle nach einem kompletten Ladezyklus bei 2 Ampere abgebildet. Es wird deutlich, dass die Wärmeleistung nicht zur Ausbildung eines Temperaturgradienten über die Zelle führt.

#### **4.2.3 Entladezyklus mit 5 A**

Bei der Entladung mit einem konstanten Strom von 5 Ampere, ist die elektrische Leistung und somit die Wärmeentwicklung deutlich höher als bei der Messung mit 2 Ampere. In Abbildung 31 sind der Spannungs- und Temperaturverlauf über die Zeit dargestellt. Nach ca. 26 Minuten ist die Entladeschlussspannung von 3 Volt erreicht. Während der Entladung wurde vom Batterietestgerät eine Energie ca. 7,2 Wattstunden abgenommen. Bedingt durch den hohen Strom wurde von der Batterie zusätzlich eine Verlustenergie von ca. 1,09 Wattstunden in Form von Wärme abgegeben. Insgesamt wurde der Batterie eine Leistung von ca. 8,29 Wattstunden entnommen. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 86,85 Prozent. Die vom Hersteller angegebene minimale Kapazität von 9,25 Wattstunden wird nur mithilfe einer Entladung mit konstanter Spannung erreicht.



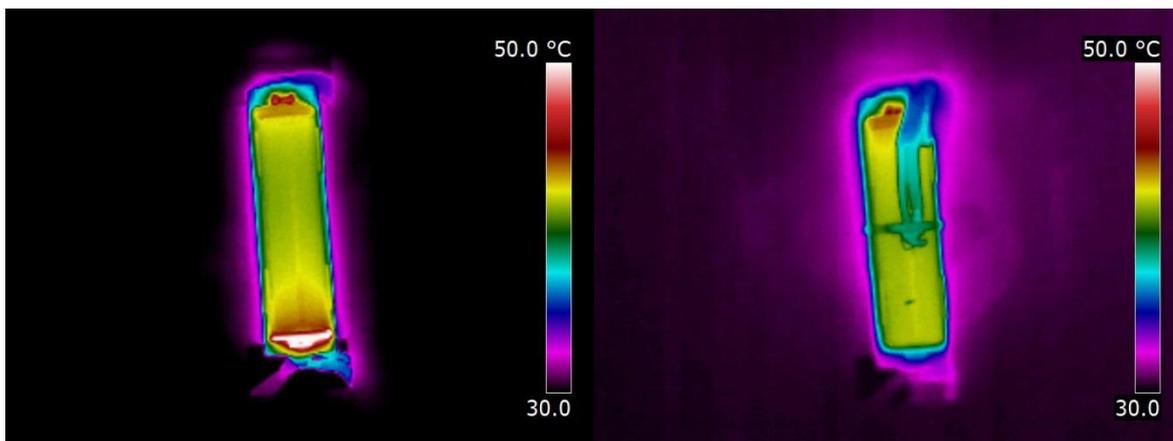
**Abbildung 31: Spannungs- und Temperaturverlauf bei 5 A Entladezyklus**

Der Temperaturverlauf zeigt, dass die Batteriezelle bei einer Umgebungstemperatur von 25,5 °C innerhalb von 25 Minuten einen Temperaturanstieg von 30 °C erfährt. Dies macht deutlich, dass bei maximaler Batterieentladeleistung ein erheblicher Kühlungsbedarf vorhanden ist. Auch die Temperaturdifferenz innerhalb der Batteriezelle erreicht bei einer Kontaktierung über den Zellboden einen Wert von 5 °C.

#### **Vergleich Boden/- Mantelkontaktierung bei 5 Ampere**

Zur Lokalisierung der Zellwärmequellen wurde der Minuspol an zwei verschiedenen Stellen kontaktiert. Bei ersten Versuchen mit der Batteriezelle ist aufgefallen, dass der Minuspol deutlich wärmer wird als der Zellkörper. Zellen, bei denen die Wärme am Boden freigesetzt wird, wären schlecht geeignet, da diese Wärme so nur schwer abzuführen ist. In diesem Versuch soll ermittelt werden, ob freiwerdende Wärme aufgrund der Kontaktierung oder des Zellaufbaus entsteht. Falls die Wärme durch eine Kontaktierung entsteht, kann die Wärmequelle durch Änderung des Kontaktes beeinflusst werden. Entsteht die Wärme durch zellinnere Strukturen, muss diese lokalisiert und das Kühlkonzept angepasst werden.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erreichen, wurden beide Versuche bei einer Entladung von 5 Ampere durchgeführt. Der Minuspol ist, wie auf der rechten Hälfte der Abbildung 32 zu erkennen, mittig auf der Zelle kontaktiert.



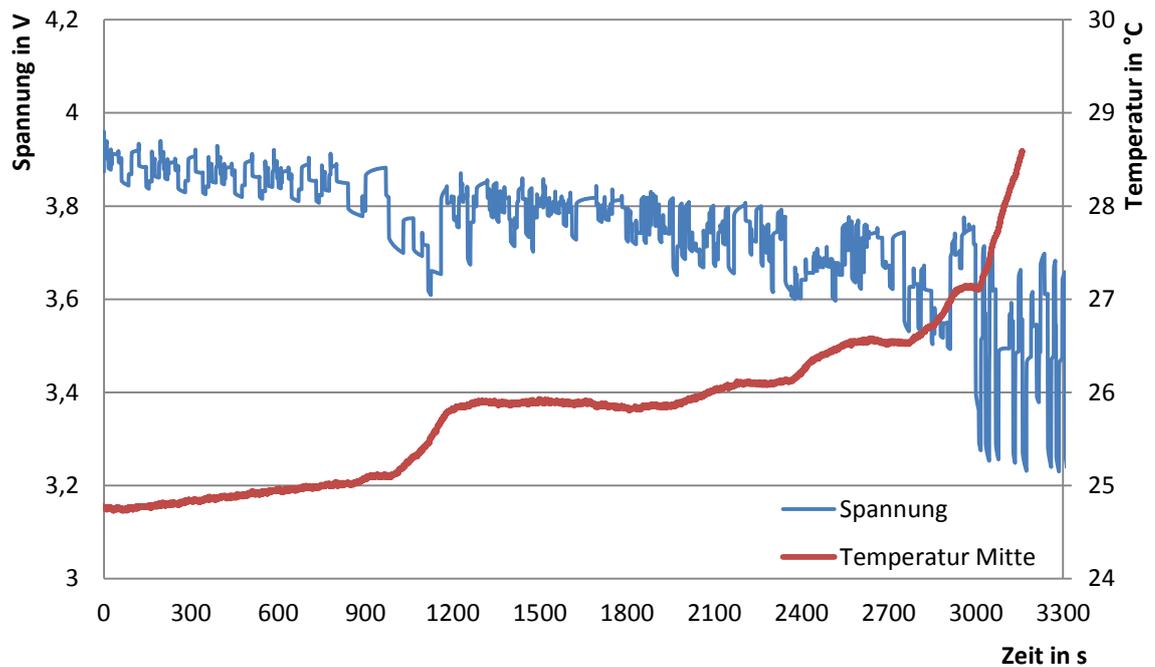
**Abbildung 32: Vergleich Wärmequellen durch Kontaktierung: Boden – Mantel**

Wie auf der linken Hälfte der Abbildung 32 zu erkennen ist, wird bei einer Kontaktierung über den Boden dieser deutlich wärmer als der Rest der Zelle. Auf der rechten Hälfte der Abbildung ist die Mantelkontaktierung zu sehen. Bei dieser ist, wie bei der Bodenkontaktierung, nur eine höhere Temperatur am Kopf der Zelle zu orten. Die Wärme der Minuspolkontaktierung hat sich auf dem gesamten Mantel verteilt. Insgesamt wird vermutet, dass zusätzlich zu der durch den Innenwiderstand entstehende Wärme noch Wärme durch eine kleine Kontaktierungsfläche am Boden der Zelle entstanden ist. Es sollte somit darauf geachtet werden, dass möglichst große Flächen zur Kontaktierung genutzt werden. Da jedoch bei jeder Kontaktierung Wärme frei wird ist die geplante Zellkopfkontaktierung gut zur Wärmeabgabe geeignet.

#### **4.2.4 Entladezyklus ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge**

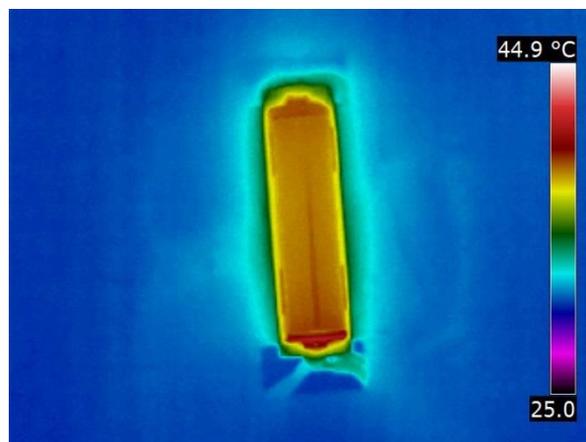
In Abbildung 21 ist der Spannungs- und Temperaturverlauf einer Zelle, mit den Belastungen des ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge, dargestellt. Der dargestellte Spannungsverlauf ist dabei idealisiert und beinhaltet noch nicht die Wirkungsgradverluste.

Bedingt durch Lastwechsel des Fahrzyklus ist am Spannungsverlauf eine Unregelmäßigkeit zu beobachten. Auch sinkt die Spannung im letzten Abschnitt deutlich, was durch die erhöhte Leistungsabfrage bedingt ist.



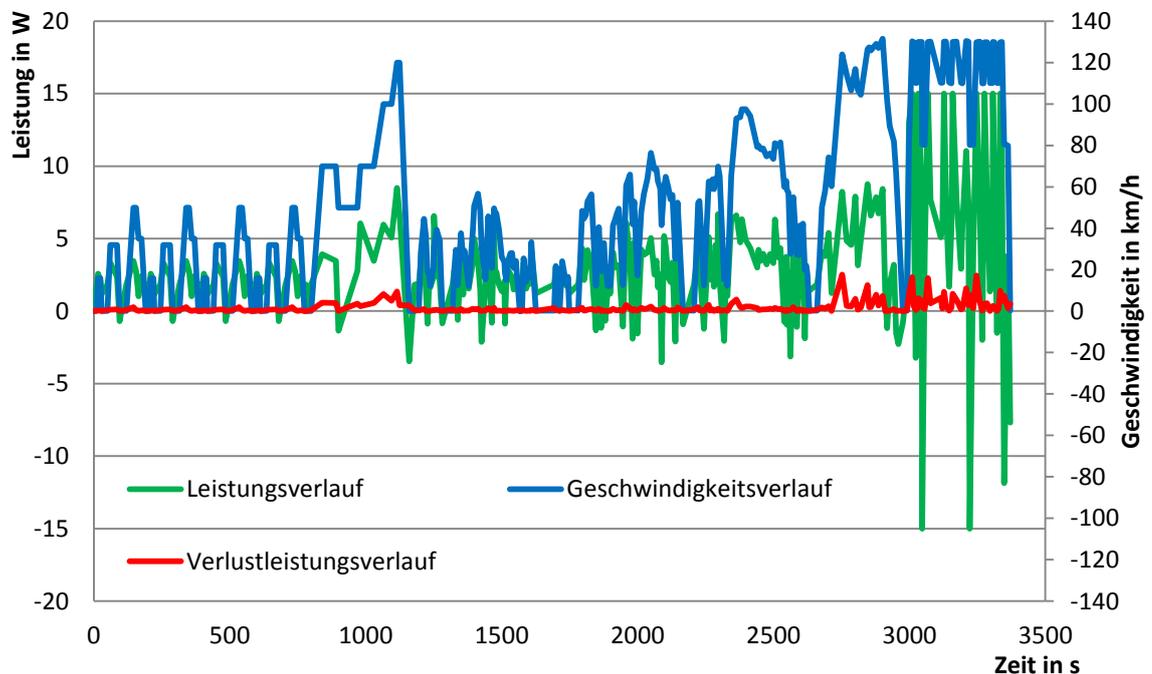
**Abbildung 33: Spannungs- und Temperaturverlauf einer Batteriezelle während des ADAC Fahrzyklus**

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Temperatur der Zelle bei einer Umgebungstemperatur von 24.75 °C nach einem Fahrzyklus mit einer Dauer von ca. 55 Minuten einen Temperaturanstieg von 3,5 °C bis 4 °C zu verzeichnen hat. Es wird deutlich, dass im Rahmen einer Autobahnfahrt, hier ab ca. 2700 Sekunden, die Wärmeproduktion am größten ist.



**Abbildung 34: Wärmebildaufnahme nach einem ADAC Fahrzyklus**

Abbildung 34 zeigt, dass durch geringe Leistungsabgabe die Temperatur nach einem Zyklus den kritischen Bereich nicht überschreitet, aber deutlich über der Wohlfühltemperatur von 35 °C liegt. Da gegen Ende des Zyklus eine höhere Leistung bei der Simulation einer Autobahnfahrt fließt, ist auf der Zelle ein kleiner Temperaturgradient von den Polen zum Zellkörper zu erkennen.



**Abbildung 35: Leistungsverlauf einer Zelle im Vergleich zur Geschwindigkeit**

In Abbildung 35 ist der Leistungsverlauf einer Batteriezelle inklusive Verlustleistungsverlauf im Vergleich zur Geschwindigkeit dargestellt. Durch die Abbildung wird deutlich, dass die Batteriezelle durch die Rekuperation wieder Energie aufnimmt, aber auch dabei eine Verlustleistung in Form von Wärme auftritt. Dies ist damit zu begründen, dass der Innenwiderstand bei Energieaufnahme und Energieabgabe mit Strom durchflossen wird. Bei der Auslegung einer Kühlung muss also auch darauf geachtet werden, dass auch bei einer Rekuperation Wärme entsteht und diese abgeführt werden muss. Bei diesem Fahrzyklus wurden ca. 3,2 Wattstunden von der Batterie abgegeben. Davon wurden 3,06 Wattstunden für den Fahrzyklus verbraucht und 0,14 Wattstunden wurden als Verlustwärme abgegeben. Es ergibt sich ein Batteriewirkungsgrad von 95,5 Prozent, folglich liegt der Verlustwärmeanteil bei 4,5 Prozent.

### 4.3 Berechnung Wärmeströme

In diesem Kapitel wird mithilfe des Leistungsverlaufes aus Abbildung 19 und des Innenwiderstandes aus Kapitel 4.2 der Abwärmeleistungsverlauf des gesamten Systems bestimmt. Dabei wird zunächst die Leistung einer Zelle ausgewertet und anschließend auf einen Batterieblock sowie auf das gesamte System hochgerechnet.

Für eine Zelle ergibt durch Gleichung 2-3, bei einer durchschnittlichen Spannung von 3,7 Volt für jeden Leistungswert, ein bestimmter Strom.

Mithilfe dieses Stromwertes kann nach Gleichung 4-2 die Verlustleistung, auch Abwärmeleistung genannt, bestimmt werden. Da die Batteriezelle, laut Hersteller wie in Tabelle 4 gezeigt, nur mit einem maximalen Entladestrom von 5 Ampere belastet werden darf, sind die Werte dahingehend begrenzt worden. Dadurch ergibt sich folgender Abwärmeleistungsverlauf.

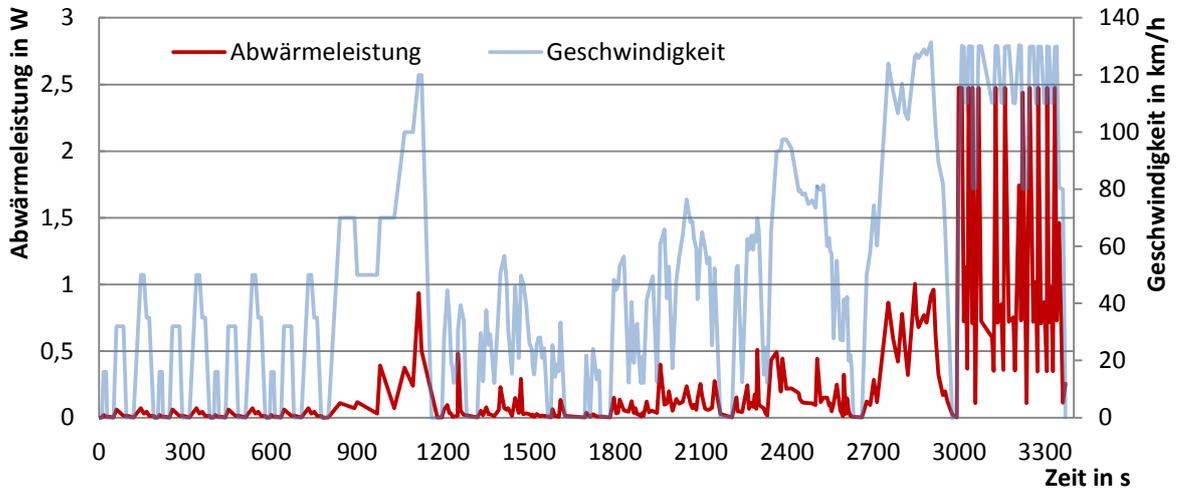


Abbildung 36: Abwärmeleistungsverlauf einer Zelle

Durch die Begrenzung des Entladestromes von 5 Ampere ergibt sich eine maximale Zellabwärmeleistung von 2,475 Watt. Anhand Abbildung 36 wird deutlich, dass vor allem durch die Beschleunigung und hohe Geschwindigkeiten eine starke Abwärmeleistung entsteht. Solange das Fahrzeug im Stadt bzw. Landbereich betrieben wird, hier bis zur 2700 Sekunde dargestellt, liegt die Abwärmeleistung einer Batteriezelle unter 1 Watt. Der Autobahnbetrieb führt jedoch zu Abwärmeleistungen von bis zur 2,475 Watt. Daraus ergibt sich, dass bei kritischen Kühlbedingungen ein Autobahnbetrieb möglichst vermieden werden sollte. In Tabelle 7 sind alle für die weiteren Berechnungen notwendigen Daten aufgelistet.

Tabelle 7: Energie und Wärmedaten ADAC Fahrzyklus

	Zelle	Block (30 Zellen)	Gesamt (4800 Zellen)
<b>Energieumsatz ADAC</b>	3,97 Wh	119,106 Wh	19056,976 Wh
<b>Wärme ADAC</b>	0,2138 Wh	6,412 Wh	1025,983 Wh
<b>Durchschnittliche Abwärmeleistung</b>	0,228 W	6,847 W	1095,549 W
<b>Maximale Abwärmeleistung</b>	2,475 W	74,25 W	11880 W

Die Abwärme nimmt im gesamten einen Anteil der umgesetzten Energie einen Wert von ca. 5,38 Prozent an. Dies liegt leicht über den literarischen Daten von 5 Prozent. Da der Innenwiderstand der Zelle je nach Hersteller variieren kann, ist der Wert akzeptabel. Die

durchschnittliche Abwärmeleistung kann für weitere Betrachtungen verwendet werden, da durch das eingesetzte PCS ein Wärmepuffer geschaffen wird und die Temperatur gleichmäßig ansteigt.

#### 4.4 Blockdesign

Um ein für die Kühlung von Batteriezellen geeignetes Blockdesign zu finden, werden die Konzepte sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Blockmodelle erläutert. Um das Temperaturverhalten des rhombischen Batteriemodells bestimmen zu können, wurden im Rahmen der Bachelorarbeit Untersuchungen durchgeführt. Das rechteckige Modell konnte aufgrund von konstruktiven Änderungen während der Bachelorarbeit nicht mehr getestet werden.

Das rhombische Blockdesign wurde mit der Zielstellung entwickelt, bei einem Aufprall die kinetische Energie in eine Verschiebung der Blöcke gegeneinander abzubauen, sodass diese selbst nicht beschädigt werden. Ein platzsparender Einbau in ein Fahrzeug als Traktionsbatterie lässt die Batterieform nicht zu. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Geometrie in Fahrzeugen rechteckig ausgelegt ist, und somit beim Einbau durch die rhombische Form Zwischenräume entstehen würden. Im Rahmen der Tests zum Temperaturverhalten sind weitere Nachteile aufgefallen. Durch die geringen Batteriezellenräume wird die freie Konvektion des Kühlmediums im Batterieblock stark begrenzt. Dies führt dazu, dass eine ausreichende Wärmeabfuhr aus den blockinneren Batteriezellen nach außen nicht stattfinden kann. Bei einer Blockabwärmeleistung von 10 Watt wurden Wärmenester mit Temperaturdifferenzen von bis zu 2 °C gemessen. Dies ist nachteilhaft, da Temperaturdifferenzen der Batterien zu einer verringerten Lebensdauer führen. Durch die geringe Speicherdichte kann das Kühlpotential des Phasenwechselmaterials nicht ausgeschöpft werden.

Im rechteckigen Batterieblock wird, bedingt durch größere Zellzwischenräume, die Batterieabwärme besser verteilt. Auch das Speichervolumen von 320 ml ermöglicht es, ausreichend Wärme speichern zu können. Durch die rechteckige Form ergibt sich für das Modell eine hohe Packungsdichte. Nachteilig ist die Form bei einem Autounfall, bei dem die Modelle sich nicht verschieben können und somit gequetscht werden können.

Für das Kühlkonzept der Bachelorarbeit der rechteckige Batterieblock ausgewählt, da er ein hohes Speichervolumen mit einer hohen Packungsdichte vereint. Die Gefahr einer Quetschung könnte im Eingebauten Zustand durch einen starken Autorahmen sowie eine mittige Platzierung im Fahrzeug reduziert werden.

Da das CryoSol<sup>plus</sup> in einem Temperaturbereich von 4 °C bis 50 °C eine Volumenausdehnung von bis zu zehn Prozent gemessen wurde, ist es nicht möglich das gesamte Volumen des Batterieblocks zu füllen. Dadurch ändert sich die einsetzbare CryoSol<sup>plus</sup>-Menge, außerdem wird der Wärmeübergang zwischen dem im Behälter befindlichen CryoSol<sup>plus</sup> und der Kontaktplatte durch eine Luftschicht deutlich begrenzt. Als ein möglicher Lösungsvorschlag könnte in der Wand des Behälters ein elastisches Gummistück angebracht werden. Durch dieses Gummistück könnte die Volumenänderung ausgeglichen und somit eine vollständige Füllung des Behälters ermöglicht werden.

#### 4.5 Auswahl des CryoSol<sup>plus</sup>

Mithilfe der DSC-Messung aus Abbildung 26, dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Temperaturbereich und der angestrebten maximalen Batterietemperatur von 35 °C wird deutlich, dass das CryoSol<sup>plus</sup> mit einem reinen Paraffin besser für das Kühlkonzept geeignet ist. Dies ist zunächst dadurch zu Begründen, dass die Schmelzenthalpie des CryoSol<sup>plus</sup> mit einem reinen Paraffin deutlich über der des CryoSol<sup>plus</sup> mit einem gemischten Paraffin liegt, und somit mehr Wärme aufgenommen werden kann. Auch ist der Schmelzbereich des reinen Paraffins besser für das Deutsche Klima und der angestrebten Batterietemperatur geeignet. Da die Temperatur in Deutschland in der Regel unter 25 °C liegt, kann der Schmelzbereich von 24 °C bis 30 °C effizient genutzt werden. Dies ist dadurch zu begründen, dass der Wärmeübergang in diesem Bereich aufgrund der geringen Temperaturdifferenz noch nicht ausgeprägt ist. Würde der Schmelzbereich, wie bei dem gemischten Paraffin im Bereich von 30 °C bis 35 °C liegen, würde der Schmelzbereich aufgrund des größeren Wärmeübergangs an Wirkung einbüßen. Somit kann der Temperaturbereich von 24 °C bis 30 °C durch das CryoSol<sup>plus</sup> mit einem reinen Paraffin effektiv gekühlt werden.

#### 4.6 Auslegung der passiven Kühlung

In diesem Kapitel werden unter Benutzung des rechteckigen Blockdesigns, der Wärmeübergang und der Druckverlust bei einer Durchströmung dessen Kühlkanals berechnet und grafisch dargestellt.

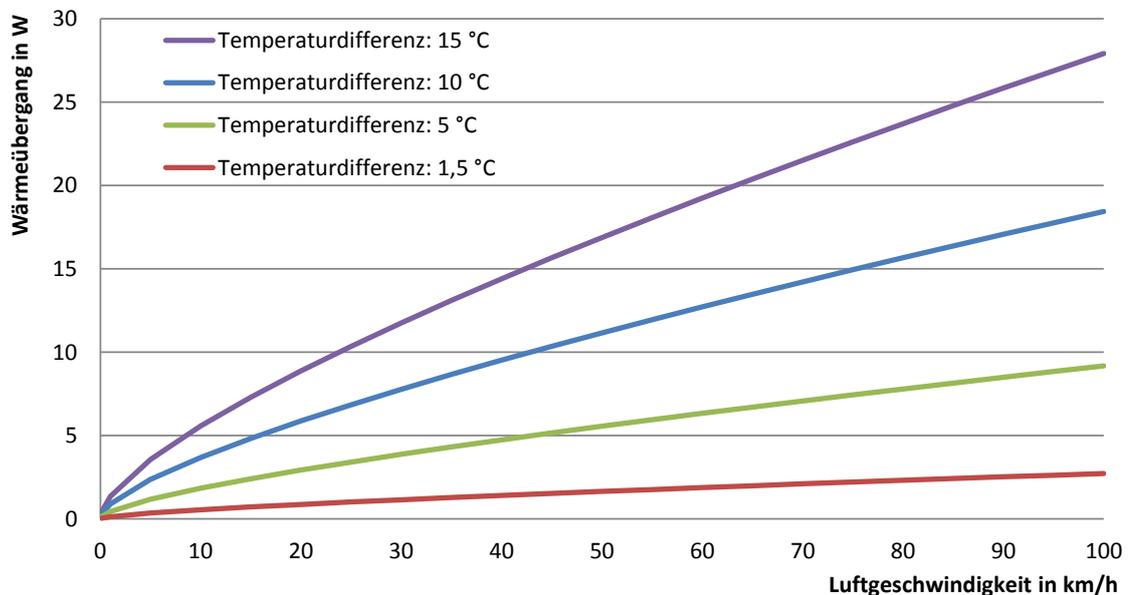
Durch Anwenden der Gleichungen aus den Grundlagenkapiteln der Wärmeübertragung und des Druckverlustes können Kühl- und Druckverlustkurven über die Luftgeschwindigkeit erstellt werden. Insbesondere werden auch die geometrischen Daten des rechteckigen Blockdesigns aus Kapitel 3.3.1 verwendet. Die zur Berechnung notwendigen Stoffdaten sind dem VDI-Wärmeatlas entnommen und in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8: Stoffdaten Luft (Verein Deutscher Ingenieure 2006)**

Temperatur [°C]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [ W/(m K)	$\nu$ [m <sup>2</sup> ·10 <sup>-7</sup> /s]	Pr
-10	1,3245	0,02359	126,2	0,7126
0	1,2758	0,02436	135,0	0,7110
10	1,2306	0,02512	144,0	0,7095
20	1,1885	0,02587	153,2	0,7081
25	1,1689	0,02625	157,9	0,7075
30	1,1492	0,02662	162,6	0,7068
33,5	1,1372	0,02688	165,9	0,7064
35	1,1308	0,02699	167,5	0,7062

#### 4.6.1 Wärmeübergang

Durch Einsetzen der Stoffwerte in die Gleichungen aus Kapitel 2.3.2 kann der Wärmeübergang für den rechteckigen Batterieblock berechnet werden. Die dargestellten Temperaturdifferenzen herrschen zwischen dem Batterieblock und der durchströmenden Luft. Mithilfe der Auftragung über die Luftgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturdifferenzen ist es somit möglich, ein breites Spektrum des möglichen Wärmeübergangs darzustellen.



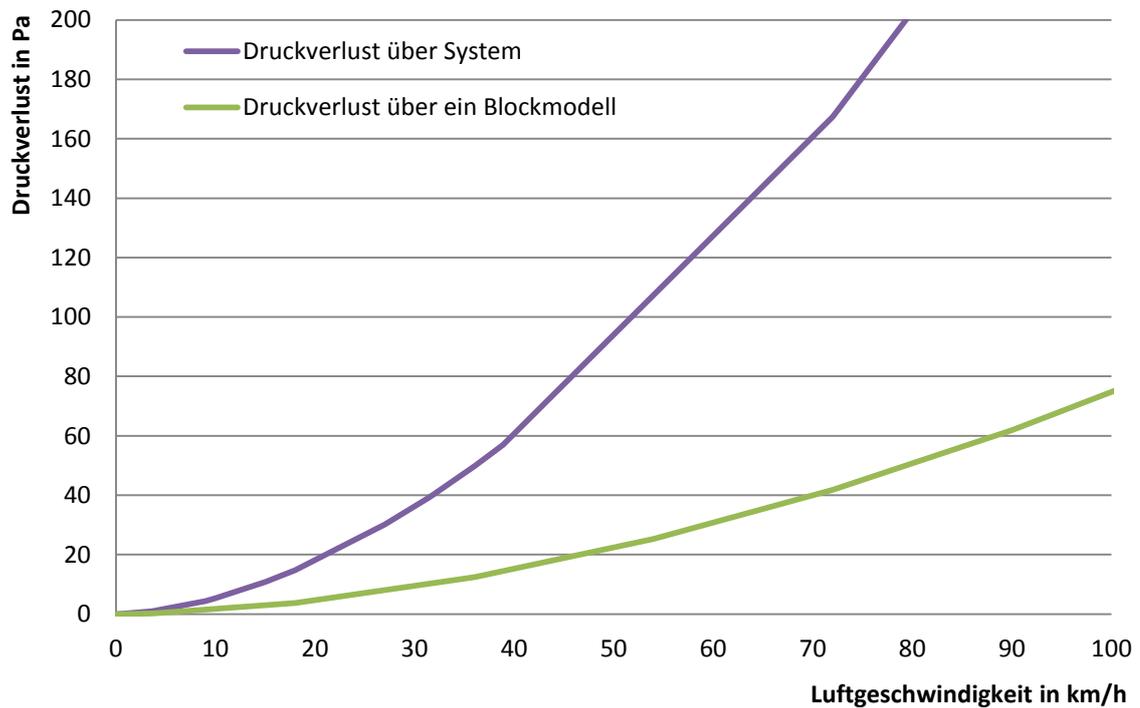
**Abbildung 37: Konvektiver Wärmeübergang bei verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Batterie und durchströmender Luft**

Durch die Betrachtung der Abbildung 37 wird deutlich, dass der Wärmeübergang mit einer steigenden Temperaturdifferenz zunimmt. Auch eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit hat einen positiven Einfluss auf den konvektiven Wärmeübergang. Dabei ist zu beobachten, dass der Einfluss der Temperaturdifferenz deutlich stärker ist als der Einfluss der Luftgeschwindigkeit. Bei einer Temperaturdifferenz von 1,5 °C ist eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit nahezu wirkungslos. Daraus folgt, dass bei niedrigen Temperaturdifferenzen zwischen Batterie und Luft eine aktive Kühlung der Luft der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit vorgezogen werden sollte.

#### 4.6.2 Druckverlust

Zur Berechnung des Druckverlustes werden die geometrischen Daten aus Kapitel 3.3.2 sowie die Stoffdaten der Luft aus Kapitel 3.4 verwendet. Dabei sollte erwähnt werden, dass der Druckverlust des Systems durch Zu- und Abführungen weiter steigen kann. Aufgrund der Tatsache, dass diese noch nicht definiert sind wird in den Berechnungen auf den Einfluss verzichtet. Es ist der Druckverlust eines einzelnen Batterieblockes sowie der des gesamten Batterieblocksystems in Abbildung 38 dargestellt. Der Druckverlust des gesamten Systems wird mithilfe der Gleichung 2-23 und der Gleichung 2-25 für die in Abbildung 25 dargestellte

Anordnung bestimmt. Der Druckverlust des Systems steigt dabei nur durch eine Reihenschaltung der Blöcke, eine Parallelschaltung hat keinen Einfluss auf den Druckverlust.



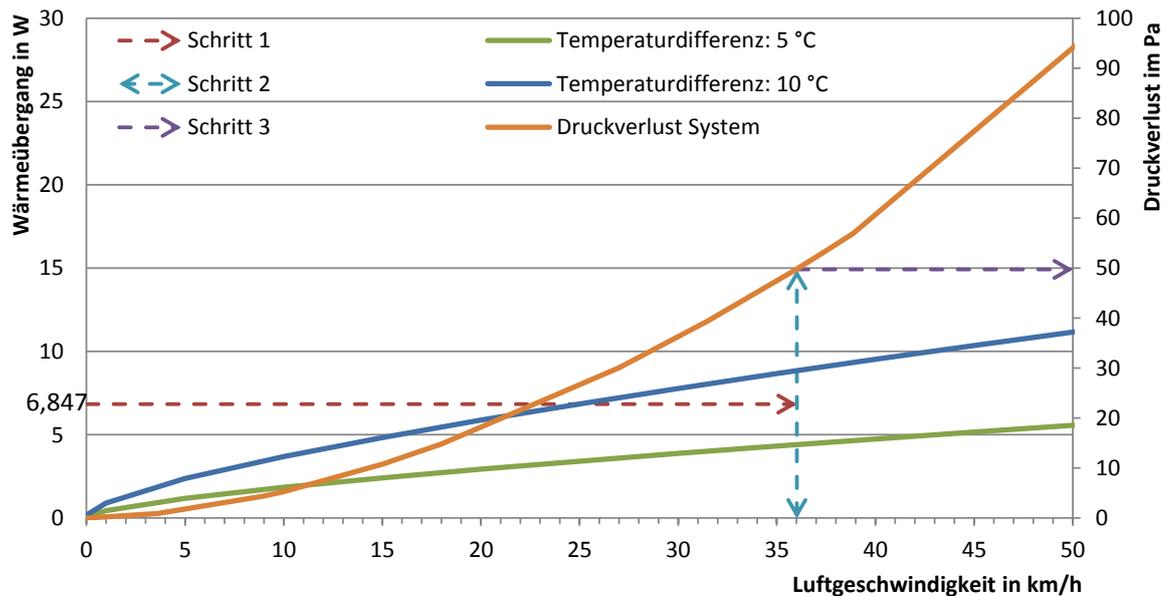
**Abbildung 38: Druckverlust über Luftgeschwindigkeit**

Durch die Betrachtung der Abbildung wird der quadratische Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den Druckverlust deutlich. Um bei einer Verwendung einer Strömungsmaschine einen niedrigen Stromverbrauch zu erreichen, muss das System möglichst so ausgelegt werden, dass es einen niedrigen Druckverlust hat. Durch die Abbildung wird deutlich, dass ein niedriger Druckverlust durch einen niedrigen Volumenstrom erreicht werden kann. Auch ist es möglich die Batterieblöcke in einer Parallelschaltung anzuordnen, da der Druckverlust nur durch eine Reihenanordnung steigt.

#### 4.6.3 Auslegung der passiven Kühlung

Aus den vorherigen Kapiteln wird deutlich, dass der Volumenstrom der passiven Kühlung so ausgelegt werden muss, dass er so gering wie möglich und so groß wie nötig ist.

Für die Auslegung der passiven Kühlung werden die Ergebnisse der vorherigen Kapitel verwendet. Dabei werden in Abbildung 39 der Wärmeübergang und der Druckverlust über die Luftgeschwindigkeit aufgetragen.

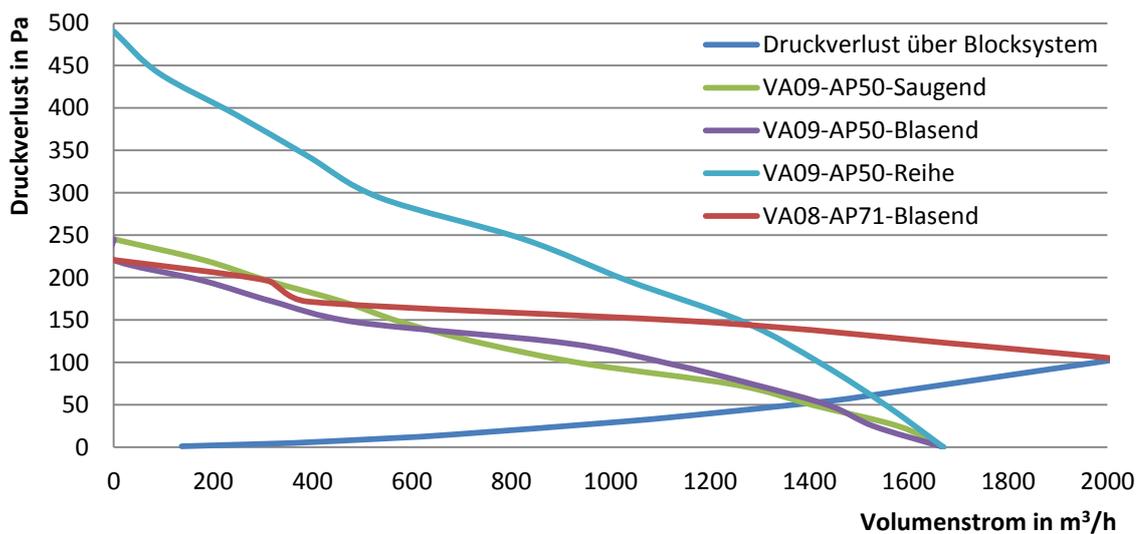


**Abbildung 39: Auswertung Luftgeschwindigkeit und Druckverlust**

Mithilfe der Abbildung 39 kann eine Luftgeschwindigkeit von 36 km/h sowie ein entsprechender Druckverlust von 49,7 Pascal ermittelt werden. Die Luftgeschwindigkeit ergibt sich durch die Abwärmeleistung des Batterieblocks bei dem ADAC Fahrzyklus von 6,847 Watt, die bei einer Temperaturdifferenz von ca. 7,5 °C abgetragen werden kann. Die Abwärmeleistung muss, um die Batterietemperatur auf Dauer konstant zu halten, von der Luftüberströmung abgeführt werden. Die Temperaturdifferenz von ca. 7,5 °C wurde gewählt, da in der bei einer niedrigeren Temperaturdifferenz die Luftgeschwindigkeit und somit der Stromverbrauch der Strömungsmaschine deutlich zu hoch wäre. Der Druckverlust kann durch die Schritte zwei und drei abgelesen werden.

Als Strömungsmaschinen werden im Folgenden Ventilatoren, aufgrund des niedrigen Stromverbrauches bei hohen Volumenströmen, verwendet. Das somit auszulegende Ventilatorsystem muss einen Volumenstrom von 1368 m<sup>3</sup>/h mit einem Druckverlust von ca. 50 Pascal bewältigen. Da die Zu- und Ableitungen noch einen zusätzlichen Druckverlust zur Folge haben werden, diese aber noch nicht definiert sind, werden die Systeme großzügig ausgelegt.

In Abbildung 40 sind der Druckverlust sowie die Gerätekennlinien zweier Systeme dargestellt. System 1 besteht aus einem blasenden Ventilator und System 2 aus einem blasenden und saugenden Ventilator.



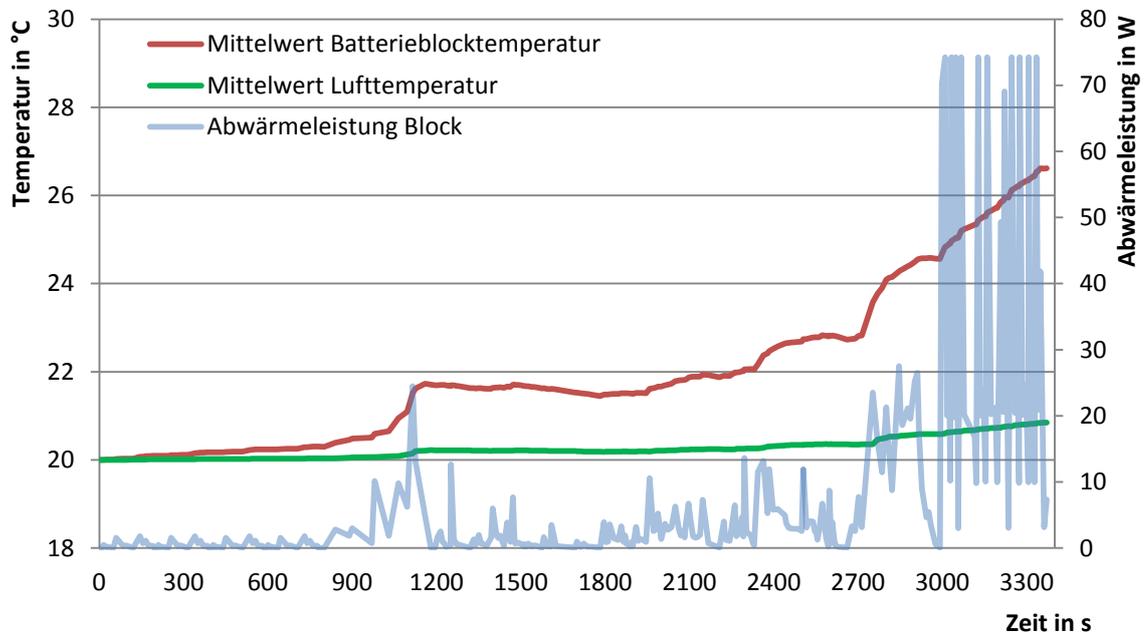
**Abbildung 40: Kennliniendiagramm des Systems und verschiedener Ventilatoren**

Das erste Ventilatorsystem besteht nur aus dem blasenden Ventilator des Typs VA08-AP71 der Firma Spal. Das zweite Ventilatorsystem besteht aus dem Ventilator VA09-AP50 in blasender und saugender Ausführung. Die Kennlinie des ersten Ventilatorsystems schneidet die Druckverlustkennlinie des Blocksystems erst bei einem Volumenstrom von ca. 2000 m<sup>3</sup>/h und die Kennlinie des zweiten Ventilatorsystems bei einem Volumenstrom von ca. 1525 m<sup>3</sup>/h. Beide Systeme sind somit mehr als ausreichend für die Kühlung der Batterieblöcke geeignet. Falls der Einfluss der Kanalzuführungen auf den Druckverlust gering ist und sich die Druckverlustkennlinie nicht stark ändert, können die Ventilatoren nur mit einer Teilleistung betrieben werden um den Stromverbrauch zu minimieren. Die Wahl des Systems muss demnach je nach Einbau der Batterieblöcke und der möglichen Ansaugstellen gefällt werden. Das erste Ventilatorsystem würde sich aufgrund des großen Lüftungsquerschnittes eignen, wenn es direkt vor einem Batteriestack angebracht werden soll. Das zweite Ventilatorsystem ist aufgrund der zwei kleinen Ventilatoren für kleine Ansaugstellen, sowie eine gezielte Strömungsführung geeignet. Die Wahl des Systems wird erst bei der endgültigen Prototypenherstellung entschieden. Die zugehörigen Datenblätter der Ventilatoren sind im Anhang zu finden.

#### 4.7 Kühlkonzept

In diesem Kapitel wird der Temperaturverlauf der Batteriezellen in einem Kühlsystem simuliert, in welchem alle Komponenten wie in den vorherigen Kapiteln besprochen, ausgelegt sind. Um eine möglichst realitätsnahe Simulation zu erhalten, ist der Wärmeübergang der aktuell herrschenden Temperaturdifferenz zwischen Batterieblock und Luft dynamisch angepasst. Durch den Wärmeübergang sinkt die Temperaturdifferenz zwischen Batterieblock und Luft, weshalb wiederum der Wärmeübergang über die Blockreihe abnimmt. Dies ist in dem Simulationsmodell berücksichtigt. Da das System aus parallel geschalteten vierer Blockreihen besteht, ist es ausreichend eine solche Reihe darzustellen.

Die folgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf eines Batterieblockes bei einer Umgebungs- und Starttemperatur von 20 °C unter der berechneten Belastung des ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge. Zur besseren Übersicht werden nur der gemittelte Temperaturverlauf der vier Blöcke, sowie die herrschende Lufttemperatur dargestellt. Auf die Differenzen wird in Abbildung 42 weiter eingegangen. Zum besseren Verständnis ist die Abwärmeleistung der Batterien eines Blockes des Fahrzyklus auf einer zweiten Achse dargestellt.



**Abbildung 41: Simulierter Batterieblocktemperaturverlauf unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept**

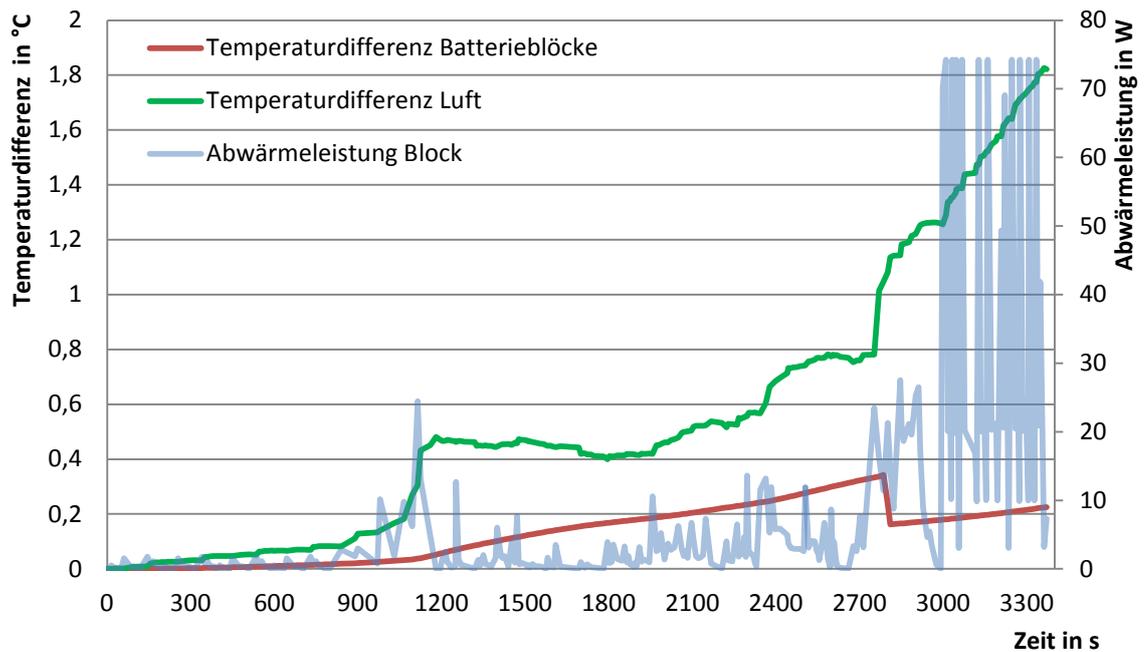
Die dargestellte mittlere Lufttemperatur ist, da die Luftgeschwindigkeit konstant eingestellt ist, nur von dem aktuellen Wärmeübergang abhängig. Dies liegt daran, dass bei einer Luftgeschwindigkeit von 36 km/h das Volumen innerhalb von 0,06 Sekunden ausgetauscht wird. Interessanter ist hier der Temperaturverlauf der Batterien, da dieser durch die gespeicherte Wärme ansteigt. Bis zu einer Temperatur von 24 °C wird die Temperatur nur durch die sensible Wärmespeicherung sowie den Wärmeübergang beeinflusst. Ab 24 °C ist zu erkennen, dass der Temperaturanstieg während des Autobahnteils durch den Einfluss der Schmelzenthalpie stark gedämpft ist. Während des ca. 55 Minuten andauernden Fahrzyklus wird eine Höchsttemperatur von ca. 26,68 °C erreicht. In Tabelle 9 sind weitere Höchsttemperaturen des Fahrzyklus, in Abhängigkeit der Start- und Umgebungstemperatur, dargestellt. Die Temperaturen sind nach Ampelfarben markiert, um Grenzen des Kühlsystems zu verdeutlichen.

**Tabelle 9: Höchsttemperaturen bei unterschiedlichen Umgebungs- und Starttemperaturen unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept**

Umgebungstemperatur [°C]	10	15	20	25	30	35
Starttemperatur Batterie [°C]						
10	23,72	25,19	26,38	27,82	29,88	37,6
15	24,085	25,39	26,63	28,04	30,60	39,03
20	24,29	25,58	26,71	28,44	32,29	40,61
25	25	25,75	27,20	29,22	35,75	43,51
30	30	30	30,40	38,11	43,81	48,26
35	35	35	35	39,63	44,37	48,82

Es wird deutlich, was für einen Einfluss das CryoSol<sup>plus</sup> auf das Temperaturverhalten hat. Liegt die Starttemperatur über 30 °C ist die komplette Schmelzenthalpie des CryoSol<sup>plus</sup> aufgebraucht. Dadurch liegen die Batterieblockhöchsttemperaturen bereits ab einer Umgebungstemperatur von 25 °C im roten Bereich. Ist hingegen die Schmelzwärme zum großen Teil noch verfügbar, kann der Fahrzyklus bei Umgebungstemperaturen bis zu 30 °C durchlaufen werden, ohne deutlich zu hohe Temperaturen zu erreichen. Ab Umgebungstemperaturen von 35 °C kann auch durch die Schmelzenthalpie die Batterietemperatur nicht im grünen Bereich gehalten werden. Somit muss bei den Rot markierten Feldern die Temperatur durch aktive Kühlung gesenkt werden, was einen zusätzlichen Stromverbrauch und somit eine geringere Reichweite zur Folge hat.

In Abbildung 42 sind die Temperaturdifferenzen in den Batterieblöcken und der durchströmenden Luft dargestellt. Um den Temperaturverlauf besser einschätzen zu können, wird auch hier die Abwärmeleistung der Batterien eines Blockes mit dargestellt.



**Abbildung 42: Simulierter Verlauf der Temperaturdifferenzen innerhalb einer Blockreihe unter Abwärmeleistungen eines ADAC Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge bei einem definierten Kühlkonzept**

Durch Abbildung 42 wird deutlich, dass die Lufttemperaturdifferenzen über die Länge der Durchströmung auch zu Temperaturdifferenzen zwischen den Batterieblöcken führen. Der Anstieg der Lufttemperaturdifferenz ähnelt dabei dem Verlauf der Verlustwärmeleistung, ist also direkt abhängig. Die Temperaturdifferenzen innerhalb der Batterieblockreihe steigen auch zunächst, sinken aber sobald der Schmelzbereich des CryoSol<sup>plus</sup> erreicht ist. Das CryoSol<sup>plus</sup> bewirkt somit eine Vergleichmäßigung der Temperaturdifferenzen innerhalb der Batterieblockreihe. Diese Vergleichmäßigung ist für die Lebensdauer der Batterien förderlich.

Durch Tests an dem rhombischen Batteriemodell mit CryoSol<sup>plus</sup> konnte beobachtet werden, dass die Schmelzenthalpie nicht in dem Maße wirksam ist, wie in der Simulation berechnet. Dabei wurde das Temperaturverhalten bei einer Füllung mit Wasser sowie einer Füllung mit CryoSol<sup>plus</sup> miteinander verglichen. Bei Aufheizungen bis zu 45 °C konnten am Temperaturverlauf geringere Unterschiede als erwartet, beobachtet werden. Dies könnte dadurch begründet werden, dass die Wärmeleitfähigkeit des CryoSol<sup>plus</sup> nur innerhalb dessen Schmelzbereich höher ist als die Wärmeleitfähigkeit von Wasser (Sarosiek 2013). Somit wird deutlich, dass der entscheidende Vorteil des PCS vermutlich nur voll genutzt werden kann, wenn die Einsatztemperaturbereich in der Regel nicht deutlich über dem Schmelztemperaturbereich liegt. Da dies aber nur eine Vermutung ist, sollte dies unbedingt in einem Versuch überprüft werden.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde mittels experimenteller Untersuchungen sowie theoretischer Berechnungen ein Kühlkonzept zur Temperierung von Traktionsbatterien erstellt. Das Kühlkonzept wurde durch den Einsatz einer Paraffin/Wasser Dispersion und einer passiven Luftkühlung möglichst energiesparend ausgelegt.

Zur Ermittlung des Innenwiderstands und der resultierenden Wärmeverteilung der verwendeten Batteriezelle Sanyo 18650F wurden Voruntersuchungen entsprechend des Leistungsabrufs durch den ADAC-Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge durchgeführt. Der ermittelte Innenwiderstandswert wurde anschließend dazu verwendet die Batterieverlustwärme zu bestimmen. Zusätzlich wurden zwei Ausführungen einer Paraffin/Wasser Dispersion sowie zwei mögliche Batterieblöcke vorgestellt. Anhand der geometrischen Daten der Batterieblöcke wurden abschließend der Wärmeübergang einer Luftkühlung sowie der Druckverlust für verschiedene Luftströmungen ermittelt.

Als Speichermedium wurde ein Phasenwechselfluid (PCS) gewählt, welches mit dem reinen Paraffin Parafol 18 hergestellt wird. Es eignet sich, aufgrund der hohen Schmelzenthalpie von ca. 69 J/g und einem Schmelzbereich von 24 °C bis 30 °C, für die Temperierung von Traktionsbatterien in der deutschen Klimazone. Um die Batterien durch das PCS sowie durch nicht vorgekühlte Luft temperieren zu können, wurde ein rechteckiger Batterieblock mit einem Speichervolumen von 320 ml und einer Kühlkontaktplattenfläche von ca. 145 cm<sup>2</sup> gewählt. Unter Berücksichtigung der latenten Wärmespeicherung wurde für die Luftströmung eine Geschwindigkeit von 36 km/h gewählt. Für den insgesamt, bei einer Verschaltung von 160 Batterieblöcken, zu fördernden Luftvolumenstrom von 1360 m<sup>3</sup>/h mit einem Druckverlust von ca. 50 Pascal wurden zwei Ventilatorsysteme der Firma Spal vorgeschlagen. Die Auswahl eines der beiden Systeme, bestehend aus einem blasenden oder einem blasenden und einem saugenden Ventilator, wird vorgenommen wenn die Konstruktionsdaten des Fahrzeugs zur Verfügung stehen. Unter Berücksichtigung der Komponenten wurde ein Batterietemperaturverlauf über den Fahrzyklus berechnet. Durch Auswertung der zu erwartenden Höchsttemperaturen, bei unterschiedlichen Umgebungs- und Batteriestarttemperaturen, konnte die Eignung des PCS überprüft werden.

Die Auswertung ergab, dass das PCS CryoSol<sup>plus</sup> gut für die Kühlung von Traktionsbatterien geeignet ist. Die vorgesehene Pufferkapazität reicht für typische Fahrzyklen aufgrund der Aufnahme von Schmelzwärme für den Betrieb bei üblichen Umgebungstemperaturen aus, ohne dass die Luftkühlung durch eine energieintensive Vortemperierung unterstützt werden muss. Zusätzlich werden die Zelltemperaturen innerhalb der Batterie durch die hohe Temperaturkonstanz im Schmelzbereich vergleichmäßig, was zu einer Effizienzsteigerung und verlängerter Lebensdauer der Batterie führt.

### Ausblick

Während der Bachelorarbeit wurde ein Versuchsaufbau zur Validierung der Berechnungen erstellt, der Versuch konnte aufgrund des Umfangs und wegen Lieferschwierigkeiten nicht mehr durchgeführt werden. Eine Darstellung des Aufbaus ist im Anhang A3 dargestellt. Mithilfe des Versuchsaufbaus ist es möglich einen definierten Luftstrom bei einstellbaren Temperaturen über

---

den Batterieblock zu leiten. Somit kann die angedachte Luftkühlung bei verschiedenen Umgebungsbedingungen simuliert werden.

**LITERATURVERZEICHNIS**

Böckh, Peter; Wetzels, Thomas (2009): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 2., bearb. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bundesregierung: Elektromobilität. Online verfügbar unter [http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/\\_no\\_de.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/_no_de.html), zuletzt geprüft am 20.03.2014.

Buß, Katja (2011): Testzyklen für Energiespeicher im Bereich Elektromobilität. Masterarbeit. Universität Duisburg Essen.

Elektronik Kompendium (2014): Lithium-Ionen-Akkus. Online verfügbar unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2014.

Enerdan: Datenblatt: 3,7V Lithium-Ionen Akkumulator 18650 mit PCB, 2600 mAh.

Fiebig, M. (2004): Wärme- und Stoffübertragung. Vorlesungsskript. Ruhr-Universität Bochum. Bochum.

Fraunhofer ISI (2014): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“. Endbericht. Online verfügbar unter [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e/de/publikationen/Schlussbericht\\_Early\\_Adopter.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e/de/publikationen/Schlussbericht_Early_Adopter.pdf), zuletzt aktualisiert am 25.03.2014, zuletzt geprüft am 25.03.2014.

Gerhard Babel (2007): Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik. Lehr- und Arbeitsbuch. 1. Aufl.: Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.

Hanu, Lucian George; Kappels, Tobias; Pollerberg, Clemens; Knels, Armin; Jahangiri, Pooyan (2012): Phase Change Slurries in Panel Cooling Systems for Buildings. Innostock 2012 - The 12th international Conference on Energy Storage. Lleida, 16.05.2012.

Höffer, R. (2009): Strömungsmechanik, Teil 2. Skriptum zur Vorlesung. Ruhr-Universität Bochum. Bochum.

Huang, L. (2009): Paraffin/water phase change emulsion for cold storage and distribution applications. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

Jossen, Andreas; Weydanz, Wolfgang (2005): Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. 1. Aufl.

Kohnen, Tobias (2013): Auslegung und Planung eines Kältespeichers auf Basis einer Paraffin/Wasser-Dispersion. Masterarbeit. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

Kraftfahrtbundesamt: Bestand der Personenkraftwagen am 1. Januar 2014. Online verfügbar unter [http://www.kba.de/ckn\\_031/nn\\_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014\\_\\_b\\_\\_umwelt\\_\\_dusl\\_\\_absolut.html](http://www.kba.de/ckn_031/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014__b__umwelt__dusl__absolut.html), zuletzt geprüft am 20.03.2014.

Mehling, H. (2002): Latentwärmespeicher. In: *Themeninfo. BINE Informationsdienst. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen (4).*

Mehling, Harald; Cabeza, L. F.: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications: Springer.

Niekamp, Julia (2012). Bachelorarbeit. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. VTP.

Online1 & Minder.Webdesign (Hg.): Auto 2CV. Online verfügbar unter <http://www.kinder-malvorlagen.com/zum-ausmalen/vorlagen-transport-autos-fahrzeuge.php>.

Physics Central (2014): Lithium-ion Batteries. Online verfügbar unter <http://www.physicscentral.com/explore/action/lithium.cfm>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2014, zuletzt geprüft am 27.03.2014.

Prof. Dr. R. Cousin (2005): Strömungsmechanik I. Vorlesungsinhalten im Überblick. Skript. Fachhochschule Köln, Köln.

Sarosiek, Karol L. W. (2013): Untersuchung des Wärmeübergangs in ein Phase Change Slurry bei erzwungener Kovektion. Masterarbeit. Bochum, Bochum.

Taetz, Christoph; Hanu, Lucian George; Kappels, Tobias; Pollerberg, Clemens; Doetsch, Christian; Weidner, Eckard (2012): Battery Thermal Management using Phase Change Slurries. In: IIR Proceedings Series 'Refrigeration Science and Technology' (Hg.): 10th International Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning. 10th IIR Conference on PCMs and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning. Kobe, Japan, 29.07.-01.08. Kobe, Japan, zuletzt geprüft am 18.07.2013.

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.) (2006): VDI-Wärmeatlas. Übereinstimmend mit 10. Berlin [u.a.]: Springer.

Wagner, Walter (1992): Strömung und Druckverlust. Mit Beispielsammlung. 3. Aufl. Würzburg: Vogel (Vogel-Fachbuch).

Zeck, Tobias (2012): Implementierung eines thermischen Batteriemodells für Li-Ionen Batterien in ein PCS Thermomanagementmodell. Bachelorarbeit. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. VTP.

Zhang, Xiongwen; Kong, Xin; Li, Guojun; Li, Jun (2013): Thermodynamic assessment of active cooling/heating methods for lithium-ion batteries of electric vehicles in extreme conditions. In: *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.088.

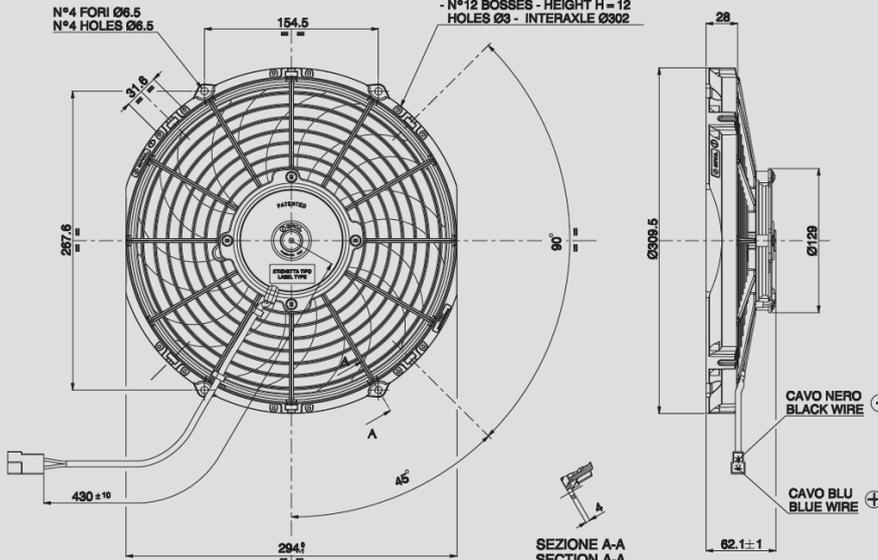
ANHANG

**12V** C.C. - D.C.

**VA09-AP50/C-54A**  
**VA09-AP50/C-54S**



N°4 FORI Ø6.5  
N°4 HOLES Ø6.5



SEZIONE A-A  
SECTION A-A

- N°12 BORCHIE - ALTEZZA H = 12  
FORI Ø3 - INTERASSE Ø302  
- N°12 BOSSES - HEIGHT H = 12  
HOLES Ø3 - INTERAXLE Ø302

CAVO NERO  
BLACK WIRE (-)

CAVO BLU  
BLUE WIRE (+)

AMP connector Code 180908  
AMP terminal Code 42098-2  
Suggested mounting torque: 3(+1/-0) Nm with screw M5  
Weight 1,49 Kg. approx.

Connettore AMP Cod. 180908  
Terminali AMP Cod. 42098-2  
Coppia di serraggio consigliata: 3(+1/-0) Nm con vite M5  
Peso 1,49 Kg. circa

Ø 280 mm

Ø 11"

Static pressure Pressione statica mm H <sub>2</sub> O	suction / aspirante			blowing / soffiante			Static pressure Pressione statica in H <sub>2</sub> O
	Airflow Portata m <sup>3</sup> /h	Current input Corrente assorbita A	Airflow Portata CFM	Airflow Portata m <sup>3</sup> /h	Current input Corrente assorbita A	Airflow Portata CFM	
0	1670	8,4	985	1670	7,6	985	0
2,5	1560	8,6	920	1530	8,1	903	0,1
5	1410	8,8	832	1440	8,5	850	0,2
7,5	1250	8,8	738	1290	8,7	761	0,3
10	950	8,1	561	1120	8,9	661	0,4
12,5	740	8,4	437	910	9,0	537	0,5
15	580	8,6	342	490	8,1	289	0,6
17,5	460	8,7	271	320	8,1	189	0,7
20	310	8,7	183	180	8,3	106	0,8
22,5	180	8,9	106	0	8,4	0	0,9
25	0	8,9	0	0	8,4	0	1,0

PRODUCT FEATURES  
CARATTERISTICHE PRODOTTO

Waterproof motor, IP 68 <i>Motore chiuso, IP 68</i>	✓
Long life / Lunga durata	✓
Low noise / Bassa rumorosità	✓
LL and VLL version* <i>Versione LL e VLL*</i>	✓
Waterproof connector <i>Connettori a tenuta stagna</i>	✓
Accessories: all the fixing kits <i>Accessori: tutti i kit di fissaggio</i>	✓

Test voltage 13 V. d.c. - Tensione di prova 13 V. c.c.

\* for OEM applications only. ✓ = Standard feature  
\* per applicazioni OEM Caratteristiche standard

✓ = Available upon request  
Disponibile su richiesta

Abbildung A1: Datenblatt des Ventilators Spal VA09-AP50/C-54 in saugender und in blasender Ausführung





**Anhang A3: Versuchsaufbau zur Validierung der Berechnungen mit einem einstellbaren Gebläse, einer Strömungsführung mit eingebautem Kühler zur Lufttemperierung und einem noch nicht fertig konstruierten rechteckigen Batterieblock**

**ERKLÄRUNG**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe sowie die Stellen der Arbeit, die in anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, durch Angaben der Quellen sichtbar gemacht wurden. Ich versichere zudem, dass diese Arbeit bisher zu keiner anderen Prüfung vorgelegt wurde.

Datum

Unterschrift