

Application Note 16

Batterie-Messungen in der Praxis



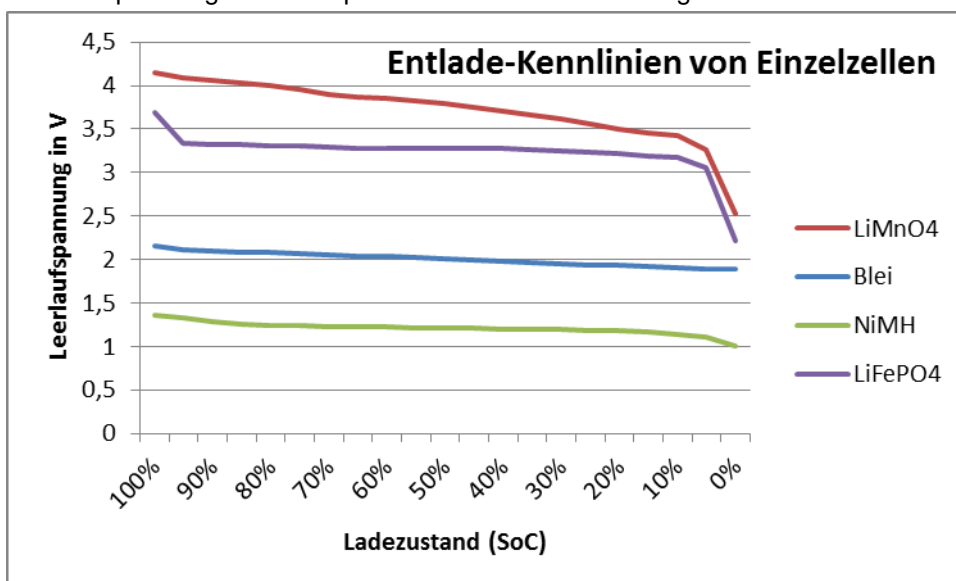
BRS

M E S S T E C H N I K



1) Messung der Leerlaufspannung U_0

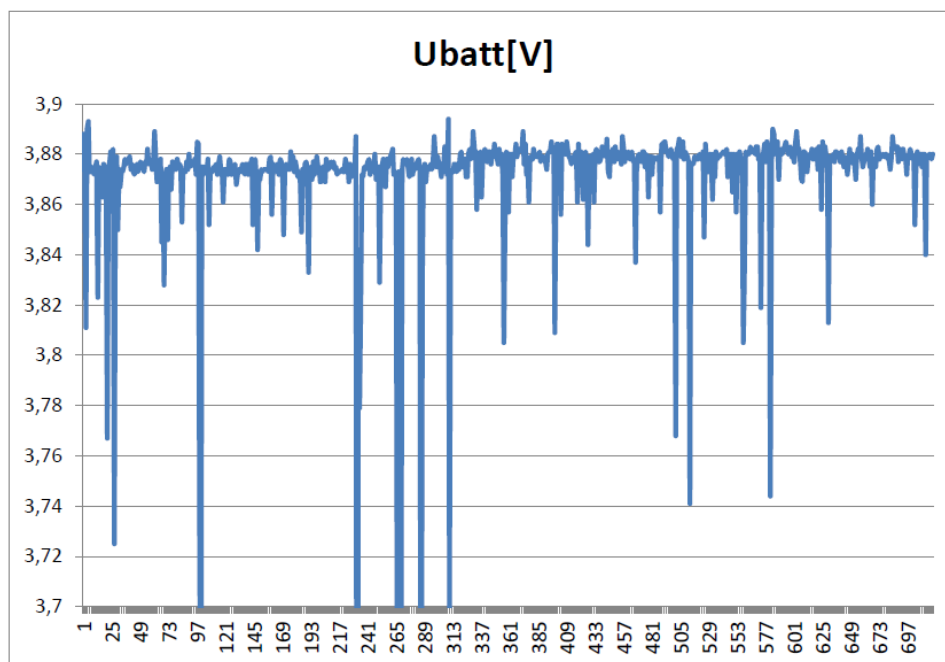
Die Leerlaufspannung U_0 einer Batterie (englisch: open circuit voltage / OCV) hängt über die elektrochemische Spannungsreihe hauptsächlich von der Technologie und vom Ladezustand ab:



Der Einfluss des Zell-Aufbaus ist gering, genauso die Temperaturabhängigkeit (ca. 0,01%/°C...0,05%/°C) Allerdings hängt die Ladezustandsbestimmung auch von der Steilheit der Entladekurve und damit von der Technologie ab. Faustformel: 1%SoC/1°C. Wenn die Temperaturschwankungen also kleiner als $\pm 5^\circ\text{C}$ betragen, so liegen die Messunsicherheiten der Ladezustandsbestimmung bei ca. $\pm 5\%$.

Bei der Wareneingangsprüfung werden die Zellen mit einem einheitlichen Ladezustand angeliefert, die Spannungen sollten sich also innerhalb einer gewissen Streubreite bewegen.

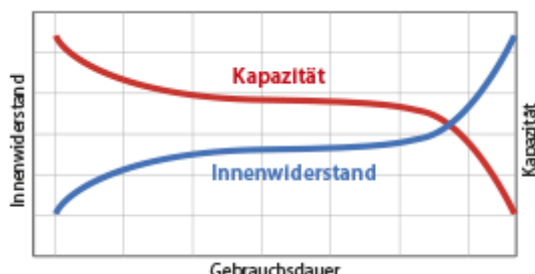
Wenn die Werte zu stark streuen (s. Bild unten), so kann vermutet werden, dass die Zellen unterschiedlich lang gelagert waren bzw. eine unterschiedliche Selbstentladung aufweisen.



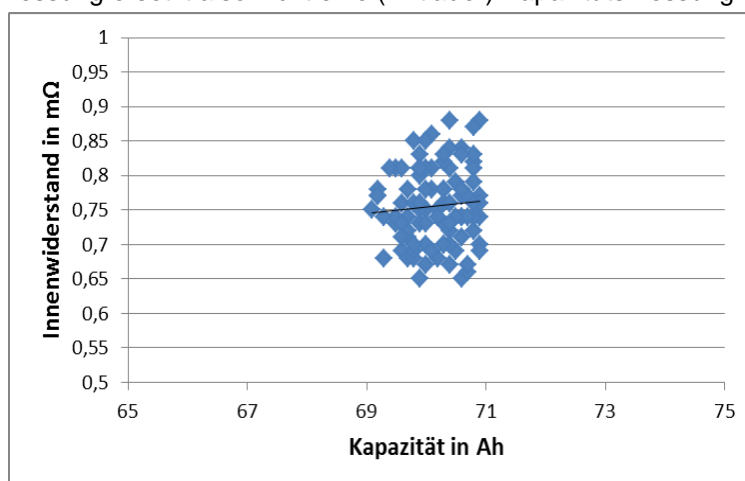
2) Messung des Wechselstrom-Innenwiderstands R_{AC}

Der AC-Innenwiderstand R_{AC} wird bei Frequenzen von ca. 1kHz gemessen. Er erfasst die ohmschen Widerstände einer Batterie: Ableiter, Elektroden und vor allem den Elektrolyten.

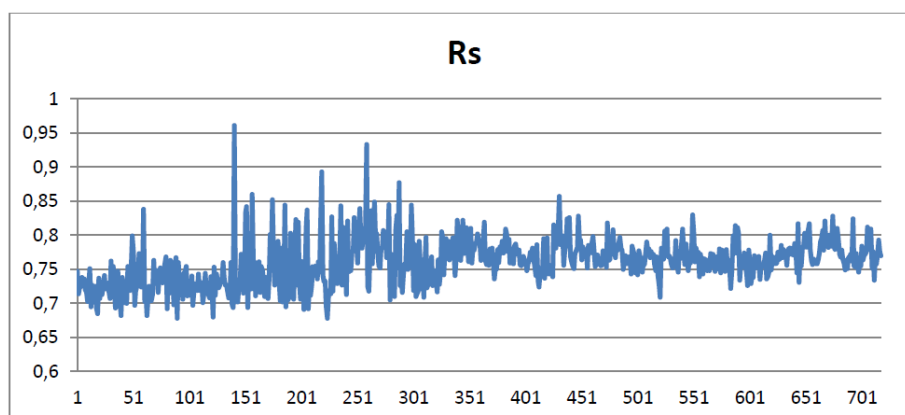
Mit zunehmendem Gebrauch steigt dieser Widerstand an, sodass aus der Widerstands-Zunahme auf die Kapazitäts-Abnahme geschlossen werden kann:



Der Innenwiderstand ist (leider) nicht mit der absoluten Kapazität korreliert (s. Bild unten), die Innenwiderstands-Messung ersetzt also nicht eine (Entlade-) Kapazitätsmessung:



Die Streuung der Innenwiderstandswerte ist allerdings ein Zeichen für die Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses. Ausreißer lassen auf Unregelmäßigkeiten schließen, die betroffene Zelle sollte aussortiert werden:



Der Vorteil einer Innenwiderstands-Wechselstrom-Messung liegt in der verhältnismäßig geringen Temperaturabhängigkeit des R_{AC} , die ca. 1%/°C beträgt. Für Temperaturunterschiede von $\pm 5^\circ\text{C}$ erhält man Messunsicherheiten von $\pm 5\%$.

3) Messung des Gleichstrom-Innenwiderstands R_{DC}

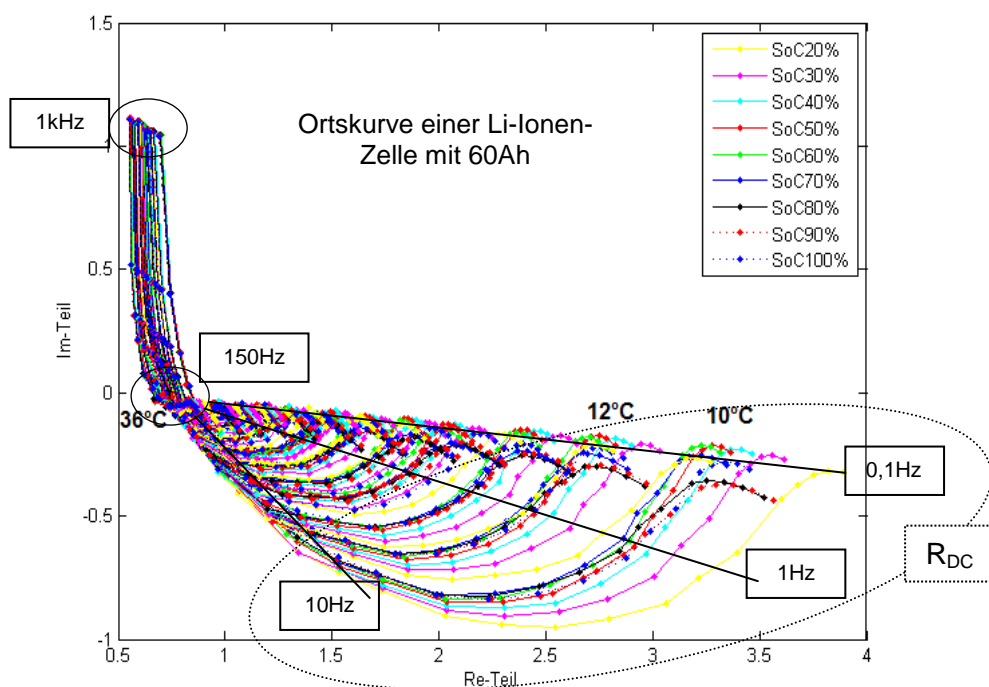
Dieser Widerstand wird nicht – wie der Name suggeriert – bei Gleichstrom gemessen, sondern bei einer geringeren Frequenz als 1kHz.

Auf Grund des Aufbaus einer elektrochemischen Zelle kann man verschiedene Frequenzbereiche unterscheiden:

- Einfluss des Elektrolyten im Millisekundenbereich, typ. Messfrequenz: 100Hz...1kHz
- Doppelschicht-Effekte (Elektroden) im Millisekunden-Bereich, typ. Messfrequenz: 10Hz...50Hz
- Diffusionseffekte im Sekunden-Bereich, typ. Messfrequenz: 0,1Hz...1Hz
- Ladezustands-Effekte im Stunden-Bereich
- Alterungseffekte im Tage/Monate/Jahres-Bereich

Will man also auch das elektrochemische Verhalten beurteilen, so sollte – neben dem Wechselstrom-Widerstand bei 1kHz - bei mindestens einer weiteren, tieferen Frequenz gemessen werden. Allgemein gilt: je tiefer die Frequenz, umso mehr nähert man sich der eigentlich interessanten Ladungsspeicherung; allerdings steigt mit sinkender Frequenz die Messzeit, d.h. die Messungen dauern immer länger, z.B. einige 10sec bei einer Messfrequenz von 0,1Hz.

Ein Nachteil bei der Messung von Gleichstrom-Innenwiderständen ist die verhältnismäßig hohe Temperaturabhängigkeit von ca. 5%/°C...10%/°C. Die nachfolgende Ortskurve zeigt, dass die Temperaturabhängigkeit der Impedanz größer sein kann als die Änderung über dem Ladezustand (SoC).



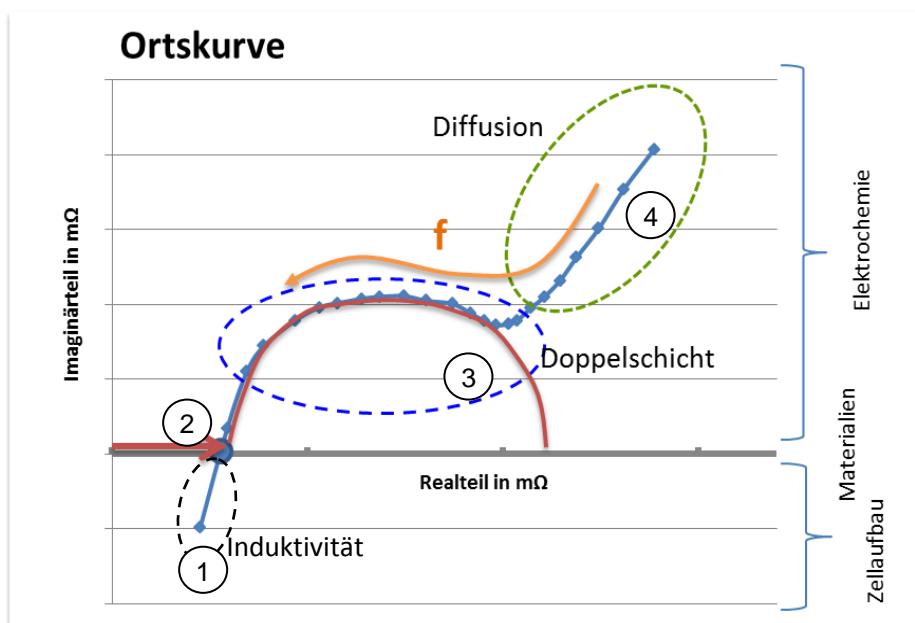
Eine absolute Messung der Impedanz bei niedrigen Frequenzen ist deshalb nur im Labor sinnvoll möglich, wo Temperatur und Ladezustand genau eingestellt werden können.

Für vergleichende relative Messungen bei der Qualitätssicherung oder im Betrieb reicht es jedoch aus, wenn Temperatur und Ladezustand wenigstens für alle Prüflinge gleich sind. Gleiche Temperaturen können erreicht werden durch vorhergehende Lagerung/Temperierung der Prüflinge. Bei Batterie-Anlagen kann man davon ausgehen, dass sich die einzelnen Zellen bzw. Blöcke auf gleicher Umgebungstemperatur befinden, da sie sich in einem Raum befinden. Deshalb ist auch eine Messung der Streuung der Gleichstrom-Widerstände sinnvoll.

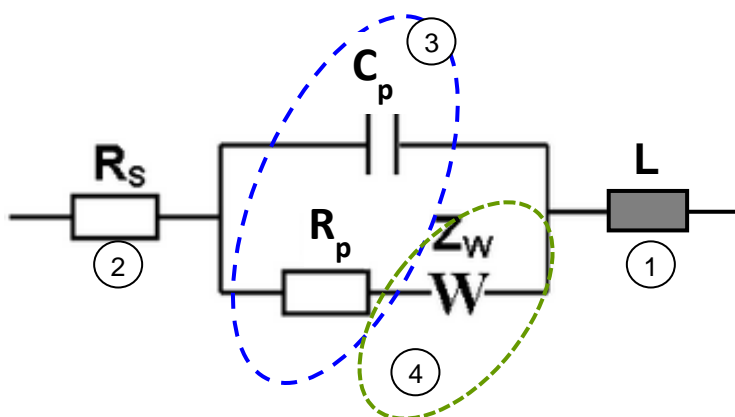
4) Messung der komplexen Impedanz Z

Der Innenwiderstand einer Batterie ist frequenzabhängig: er sinkt mit steigender Frequenz und weist kapazitive Blindanteile auf. Ein rein ohmsches Verhalten existiert nur bei einer Frequenz, die je nach Technologie und Kapazität in der Größenordnung von 1 kHz liegt. (Dies ist ein weiterer Grund, weshalb der Wechselstrom-Innenwiderstand R_{AC} bei 1kHz gemessen wird).

Das Verhalten kann mathematisch elegant durch einen komplexen Widerstand $Z=R+jX$ dargestellt werden, bei dem der Realteil den ohmschen Anteil R repräsentiert, der Imaginärteil den kapazitiven (negatives Vorzeichen) oder induktiven (positives Vorzeichen) Anteil X. Eine übliche grafische Darstellung ist die Ortskurve (Nyquist-Diagramm), bei der der Realteil (Wirkwert) auf der horizontalen Achse aufgetragen wird, der Imaginärteil (Blindwert) auf der vertikalen; die Frequenz bildet den Parameter. Da in der Elektrochemie hauptsächlich kapazitive Anteile vorkommen, hat es sich eingebürgert, die vertikale Achse umzudrehen, d.h. die negativen (kapazitiven) Anteile nach oben aufzutragen.



Um das Umgehen mit der Ortskurve zu vereinfachen, kann man sie durch ein Ersatzschaltbild mit Modellparametern beschreiben (Modell nach Randles):



Mit Hilfe des Modells kann das Systemverhalten simuliert werden.

5) Batterie-Analyse

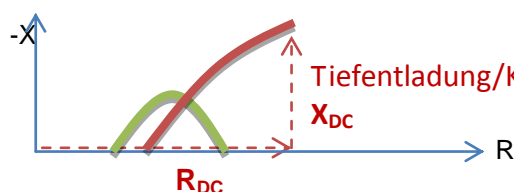
Bei der Messung der spektralen Impedanz (Ortskurve) kann man 4 Bereiche unterscheiden:

1. Abschnitt (1): Er beschreibt das induktive Verhalten und kennzeichnet die Zellgeometrie (Faustformel: $1\mu\text{H}/\text{m} \leftrightarrow 10\text{m}\Omega/\text{m} @ 1\text{kHz}$).
Modellparameter: Induktivität L .
2. Abschnitt (2): Er repräsentiert das rein ohmsche Verhalten und damit die Materialien (Elektroden, Ableiter, Elektrolyt). Dies ist der für Alterungsprozesse interessante Bereich.
Modellparameter: Serienwiderstand R_s . Er kann durch den Wechselstrom-Innenwiderstand R_{AC} angenähert werden ($R_s \approx R_{AC}$).
3. Abschnitt (3): Er beschreibt das kapazitives Verhalten und damit die elektrochemische Prozesse an der Grenzschicht der Elektroden, z.B. Effekte der Porosität, d.h. der Elektrodenoberfläche.
Modellparameter: Doppelschicht-Kapazität C_p und Ladungsdurchtrittswiderstand R_p . Der Gleichstrom-Innenwiderstand entspricht grob der Reihenschaltung von R_s und R_p ($R_{DC} \approx R_s + R_p$).
4. Abschnitt (4): Er spiegelt die Diffusionsprozesse der Ionenleitung und damit Teile der Ladungsspeicherung.
Modellparameter: Warburg-Impedanz Z_w . Sie stellt im Wesentlichen ein Laufzeitglied dar, und kann durch reale Bauelemente nicht nachgebildet werden.

Durch Messung an verschiedenen Frequenzen können die Einflüsse differenziert werden.

Beschädigungen können an Hand von typischen Fehlerbildern erkannt werden. Dazu muss die vollständige Ortskurve gemessen und mit vorher bestimmten Fehlermustern verglichen werden.

Im nachstehenden Beispiel stellt die grüne Kurve schematisch den Gutfall dar, die rote Ortskurve zeigt den Fehlerfall.



Zunahme des Parallelwiderstands R_p bzw. der Parallelkapazität C_p , näherungsweise des Gleichstrom-Innenwiderstands R_{DC} .



Zunahme des Serienwiderstands R_s , näherungsweise des Wechselstrom-Innenwiderstands R_{AC} .

Quellen: Abschlussbericht IQ-Batt, Hochschule Esslingen, INEM

Zusammenfassung

Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Batterie-Qualität sollten folgende Prüfungen vorgenommen werden:

- 1) Leerlaufspannung U_0 , gemessen ohne Last
- 2) Wechselstrom-Innenwiderstand R_{AC} , gemessen bei 100Hz...1 kHz
- 3) Gleichstrom-Innenwiderstand R_{DC} , gemessen bei 10Hz...50Hz oder bei 0,1Hz ...1Hz
- 4) Komplexe spektrale Impedanz (Ortskurve) zur Fehleranalyse bzw. zur Bestimmung der Modellparameter.

Die Prüflinge sollten sich dazu in einem stationären Zustand befinden, d.h. es sollte erst nach einer Ruhephase gemessen werden.






Messungen während des Betriebs, d.h. während die Batterie geladen oder entladen wird, sind schwierig auf Grund der unterschiedlichen elektrochemischen Zeitkonstanten.

Bei Batterie-Anlagen, die aus mehreren/vielen hintereinandergeschalteten Zellen bestehen, ist neben dem absoluten Innenwiderstand auch dessen Homogenität wichtig, d.h. die Innenwiderstände sollten nicht zu sehr streuen.

Anwendungen

	Entwicklung	Befundung	Produktion, QS		Wartung	Service
			WEK	Final Test		
Ziel	Tauglichkeit, Lebensdauer	Ausreißer, Fehleranalyse	Stichprobe, Grading	Validierung	Alterung (absolut, relativ)	Diagnose, Zustand
Impedanz-Messgrößen	Ortskurve, Modellparameter	R_{AC} , R_{DC} (Ortskurve)	R_{AC} , (R_{DC})	R_{AC} , (R_{DC})	R_{AC} (R_{DC})	R_{AC}
Einzelzelle	✓	✓	✓		✓	✓
Modul, Pack		✓	(✓)	✓	✓	✓
System, Anlage		✓		✓	✓	✓

Produkt-Übersicht

	BST 1	BIM 1	BIM HV	BIM 2	BTC 1
					
Positionierung	Servicegerät mit Wechselstrom-Innenwiderstandsmessung	Basisgerät für kleine und mittlere Batterien	Kompaktgerät für Hochvolt-Anwendungen	Standardgerät mit zusätzlichem Messeingang	Universalgerät zur kompletten Charakterisierung von Batterien
Anwendung	Wartung und Service	Produktion	Produktion und Service	Entwicklung und Produktion	Forschung, Entwicklung und Lehre
Spannung	0V – 60V	0V – 60V	0V – 800V	0V – 60V	0V – 60V
Impedanz-Messbereiche	1/10/100/1000 mΩ	10/30/100/300/1000mΩ	100/1000mΩ	1/3/10/30/100/300/1000mΩ	1/3/10/30/100/300/1000mΩ
R _{AC}	1μΩ - 1Ω	10μΩ - 1Ω	100μΩ - 1Ω	1μΩ - 1Ω	1μΩ - 1Ω
R _{DC}	-	10μΩ - 1Ω	100μΩ - 1Ω	1μΩ - 1Ω	1μΩ - 1Ω
Ortskurve	-	1Hz – 1kHz	1Hz – 1kHz	0,1Hz – 1kHz	0,1Hz – 1kHz
Hilfseingang	-	-	-	0°C - +60°C 0V - ±1V	0°C - +60°C 0V - ±1V
Kapazität	-	-	-	-	0 – 10Ah



DHS EIMEA Tools GmbH

Büro Deutschland:
Carl-Zeiss-Straße 43
63322 Rödermark / Ober-Roden
fon +49 6074 / 91 99 08 - 0
fax +49 6074 / 91 96 747
web www.dhs-tools.de
mail info@dhs-tools.de

Büro Austria:
Brüdergasse 1-3, Top B14
A-3430 Tulln
fon +43 2272 / 20522 - 0
fax +43 2272 / 20522 - 17
web www.dhs-tools.at
mail info@dhs-tools.at

BRS Messtechnik GmbH