

Digitalisierte Batteriezellenproduktion

Gewichtstracking mit intelligenten Werkstückträgern

T. Iseringhausen, R. Kleinert

Eine flexible Assemblierung für zylindrische Batteriezellen im Labormaßstab mit Fokus auf die Digitalisierung wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA aufgebaut. Sowohl das Gesamtgewicht als auch die Gewichtsverteilung auf einzelne Komponenten sind wesentliche Qualitätsmerkmale der Zelle. Um über gravimetrische Schwankungen zuverlässig Rückschlüsse auf die Qualität zu ziehen, ist eine schnelle und präzise Erfassung des Gewichtes zwischen den Prozessen nötig.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Digitalisierung, Industrie 4.0

Weight tracking with intelligent workpiece carriers in battery cell production

A flexible assembly unit for cylindrical battery cells focused on digitization was build up at laboratory scale at the Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA. Crucial quality criteria of the cell are both total weight and weight distribution of the single components. Drawing conclusion from gravimetric fluctuations requires a fast and precise weight measurement between the processes.

1 Einleitung

Um die Fertigungsschritte in der Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen zu optimieren, ist es nötig, Abhängigkeiten der Prozesse untereinander und zu den Umgebungsbedingungen zu analysieren und wesentliche Qualitätstreiber zu identifizieren [1]. Dazu müssen Produktionsparameter und Umgebungsbedingungen entlang der gesamten Prozesskette aufgezeichnet werden [2]. Die Umgebungsbedingungen in der Zellfertigung und die Massenverteilung der Halbzeuge haben einen großen Einfluss auf die Qualität von Lithium-Ionen-Batteriezellen [3, 4]. Der Werkstückträger bietet als eng mit den Batteriezellen verknüpft Element die Chance zum kontinuierlichen Tracking und Tracing von qualitätsbezogenen Parametern direkt am Produkt [1].

In der Fertigung von zylindrischen Batteriezellen werden üblicherweise einfache, kompakte und kostengünstige zylindrische Trägermodule oder Werkstückträger mit V-förmigen Vertiefungen in hoher Stückzahl eingesetzt [5]. Diese Varianten werden in vollautomatisierten Fertigungslinien verwendet und sind auf feste Prozessketten mit hohem Durchsatz ausgelegt. Für die nicht vollständig prozessübergreifend verkettete Prototypenfertigung im Labormaßstab werden andere Lösungen benötigt. Mit dem intelligenten Werkstückträger wird ein neuer Ansatz zur Handhabung von Batteriezellen vorgestellt, welcher die kontinuierliche elektronische Erfassung von Umgebungs- und Prozessparametern während und zwischen den Fertigungsprozessen der Batteriezellfertigung gewährleistet.

Die elektronische Aufzeichnung von Fertigungsdaten und das Zusammenführen in integrierte Systeme haben den Vorteil, dass die Erkennung von Trends, die auf Qualitätsmängel und Fehler hinweisen, wesentlich schneller möglich ist. Die Fehleranfälligkeit der Messwertaufzeichnung wird reduziert und die Nachverfolgbarkeit unterstützt [6]. So lässt sich der Ausschuss reduzieren, indem Prozessschritte, falls notwendig, korrigiert, wiederholt oder Schlechteile vor der Bearbeitung durch kostenintensive Folgeprozessschritte ausgeschleust werden [6, 7].

Die hier vorgestellte Messvorrichtung konzentriert sich auf die Erfassung von gravimetrischen Einflüssen auf die Zellqualität. So ist eine exakte Ausführung und Überwachung der Elektrolytbefüllung nötig, um optimale und gleichbleibende Zelleigenschaften zu erzielen [1]. Eine zu geringe Elektrolytmenge reduziert die Kapazität und Lebensdauer, während eine zu große Dosiermenge die Energiedichte verringert [8]. Eine rein volumetrische Kontrolle der dosierten Elektrolytmenge ist nicht empfehlenswert, da die Elektrolyt-Lösung mit enthaltenen Gasblasen detektiert wird. Die gravimetrische Kontrolle der Dosiermenge durch Wiegen der Zelle vor und nach dem Dosieren ist derzeit die bevorzugte Methode [5]. Für einen hohen Energieinhalt optimierte Zellen unterscheiden sich von Zellen, die für eine hohe Batterieleistung entwickelt wurden, hinsichtlich der relativen Gewichtsverhältnisse ihrer Materialkomponenten [9]. Außerdem können Fertigungstoleranzen der Komponenten oder auch durch Umgebungsbedingungen beeinflusste Parameter, wie der Feuchtegehalt des Elektrodenwickels, über das Gewicht überprüft werden.

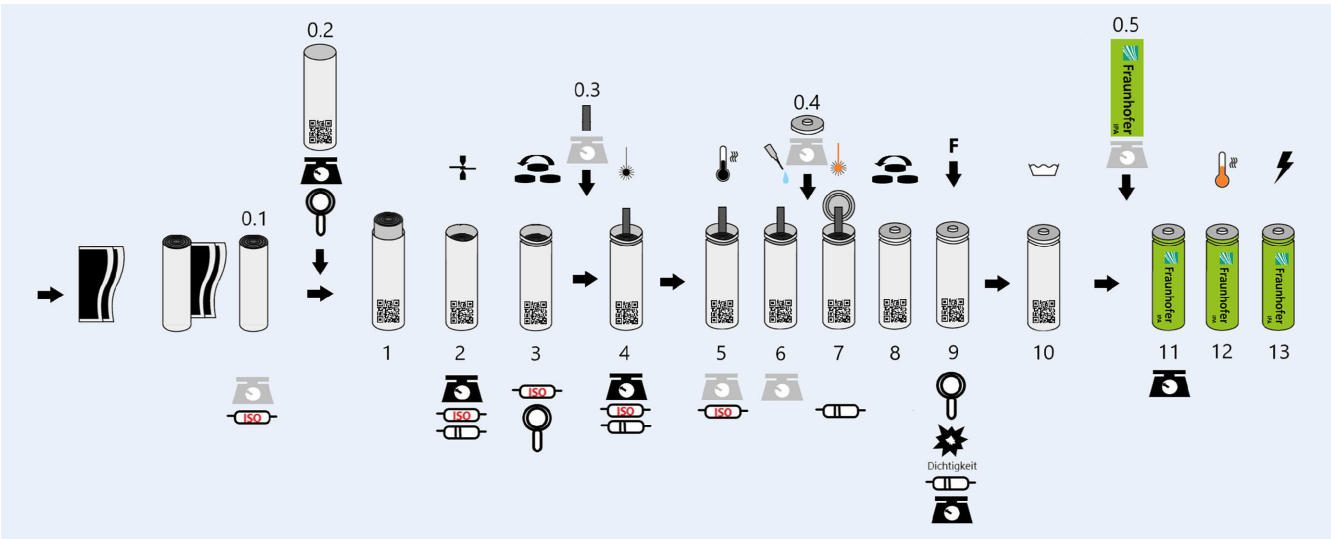


Bild 1. Prozesskette der Batteriezellenproduktion im ZDB (Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion). Grafik: Fraunhofer IPA

2 Ergebnisse und Diskussion
2.1 Anforderungen an die Gewichtserfassung der Batteriezellenproduktion im Labormaßstab

Die Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen kann in die drei Hauptprozessschritte Fertigung der Halbzeuge, Zellassemblierung sowie Zellfinishing unterteilt werden. Diese umfassen wiederum eine Vielzahl von Teilprozessschritten. Bild 1 zeigt die Prozesskette der Batteriezellenproduktion des Zentrums für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB).

Die Fertigungsschritte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Derzeit werden die Assemblierung sowie das Zellfinishing selbst durchgeführt, während Halbzeuge wie Wickel, Zellbecher und Deckelbaugruppe vorgefertigt von externen Lieferanten bezogen werden.

Die Waagen-Symbole in Bild 1 kennzeichnen Prozessschritte, nach denen eine Gewichtserfassung der Halbzeuge oder der teilassemblierten Batteriezele stattfindet. Die schwarz eingefärbten Symbole kennzeichnen die Gewichtserfassung mit dem in diesem Beitrag vorgestellten Gewichtsmesssystem. Die grau eingefärbten Symbole zeigen an, dass ein anderes Messsystem eingesetzt wird. Die Anforderungen an das hier vorgestellte Gewichtsmesssystem ergeben sich aus den Prozessschritten der Assemblierung. Die Prozessschritte zur Fertigung der Halbzeuge sowie für das Zellfinishing sind nicht relevant, da das Gewichtsmesssystem nur für die Assemblierung der Batteriezellen eingesetzt wird. Die Schritte Elektrolytbefüllung, Laserschweißen des Deckels an Ableiter sowie Bördeln und Sizing sind in eine „Glovebox“ integriert. In dieser Glovebox werden die Gewichtsmessungen mit anderen Messsystemen durchgeführt.

Das Gewichtsmesssystem wird zunächst eingesetzt, um die Masse der leeren Becher zu erfassen. Dann wird die Masse nach dem Fügen des Elektrodenwickels und dem Widerstandsschweißen erneut gemessen. Ein weiteres Mal wird die Masse nach dem Anschweißen des Ableiters an den Elektrodenwickel erfasst. Das Vakuumtrocknen ist der letzte Prozess nach dem eine Messung erfolgt, bevor der Werkstückträger mit den teilassemblierten Batteriezele die Glovebox durchläuft. Nach dem Verschließen der Zellen durch Bördeln wird der Werkstückträger aus der Glove-

Tabelle 1. Überblick über die Prozesskette der Batteriezellenproduktion des ZDB.

Hauptprozessschritt	Prozessschritt	Beschreibung
Fertigung der Halbzeuge	0.1.	Elektrodenwickel
	0.2.	Becher
	0.3.	Deckelbaugruppe
	0.4.	Ableiter
	0.5.	Schrumpffolie (Tube)
Assemblierung der Batteriezellen	1.	Fügen der Elektrodenwickel in Becher
	2.	Widerstandsschweißen der Elektrodenwickel an Becher
	3.	Sicken des Bechers
	4.	Laserschweißen des Ableiters an den Elektrodenwickel
	5.	Vakuumtrocknen
	6.	Elektrolytbefüllung
	7.	Laserschweißen des Deckels an Ableiter
	8.	Bördeln
	9.	Sizing
	10.	Reinigen
Zellfinishing	11.	Tubing
	12.	Tempern
	13.	For.mieren und Aging

box ausgeschleust und es erfolgt eine weitere Gewichtserfassung mit dem Messsystem, zuletzt schließlich nach dem Tubing.

Die Gewichtsverhältnisse der einzelnen Batteriezellkomponenten in der Zelle fallen üblicherweise unter die Geheimhaltung der

Tabelle 2. Massen der 21700-Batteriezellenkomponenten.

Komponente	Masse [g]
Becher	8–10
Deckelbaugruppe	1,5–2
Elektrolyt-Lösung	5–10
Wickel	35–55
Ableiter	0,1–0,5
Schrumpffolie	0,5–1
Gesamtmasse	55–75

Hersteller. Daher gibt **Tabelle 2** nur grobe Massenbereiche für übliche Komponenten einer zylindrischen 21700-Zelle an:

Die geringen Massen der Unterkomponenten, wie Ableiter, Schrumpffolie oder Deckelbaugruppe, erfordern eine Messgenauigkeit von mindestens 0,1 g, um Fertigungstoleranzen zu erfassen. Um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, wurden die Komponenten zur Kraftübertragung auf den Sensor so ausgewählt, dass dieser in einem Bereich hoher Genauigkeit betrieben werden kann.

Da nur geschlossene und auf Leckage geprüfte Batteriezellen gewogen werden, spielen die Anforderungen an die chemische Beständigkeit aufgrund der in der Batteriezellenfertigung eingesetzten organischen Lösemittel eine untergeordnete Rolle für die Materialauswahl des Messsystems. Bei der Materialauswahl des Werkstückträgers müssen diese Beständigkeitsanforderungen jedoch berücksichtigt werden. Beispielsweise sind PVDF, PTFE und ETFE resistent gegen diese Substanzen. Bedingt resistent sind Kunststoffe wie PVC, PP und Edelstahl wie 1.4401 und 1.4571.

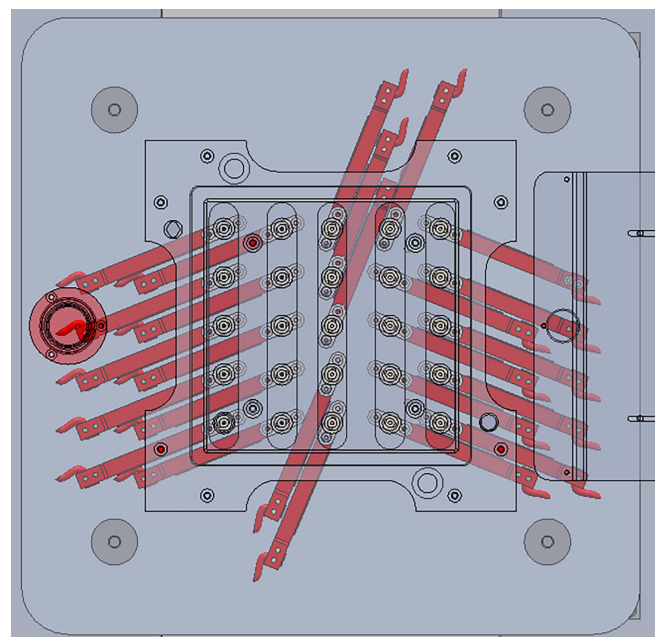
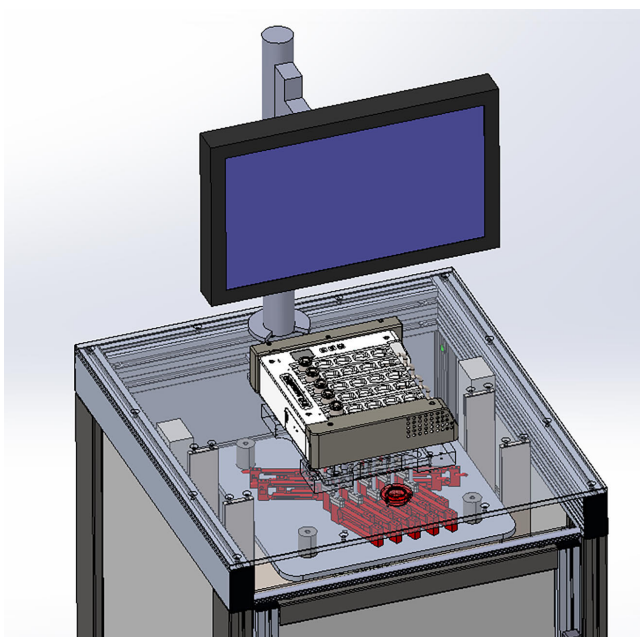
Eine weitere Anforderung ergibt sich aus den Trockenraumbedingungen, die aus Sicherheits- und Qualitätsgründen benötigt werden [4, 5]. So führen selbst kleinste Mengen luftgetragenen Wasserdampfs zu einem schnellen Leistungsabfall der fertigen Batteriezellen bis hin zu heftigen Reaktionen mit dem Leitsalz und können zu einer Zersetzung des Elektrolyts führen [10]. Im Fall einiger Kunststoffe, wie etwa Polyethylen, führt die trockene Umgebung zur Verflüchtigung des im Kunststoff enthaltenen Wassergehaltes und von Weichmachern und damit zur Versprödung des Materials.

Mit steigendem Fertigungsvolumen gewinnt die Möglichkeit zur Skalierung der Werkstückträger beziehungsweise des Messsystems an Relevanz und es wird notwendig, die Kosten bei einer hohen Packungsdichte gering zu halten. Bei der Gestaltung des Messsystems wurden kostengünstige Biegebalken-Kraftsensoren verwendet und unter Berücksichtigung einer hohen Packungsdichte möglichst kompakt platziert. **Bild 2** zeigt die resultierende Sensoranordnung.

Biegebalken-Kraftsensoren sind weitestgehend unempfindlich gegenüber einer Verschiebung der Krafteinleitung und geeignet für hochpräzise Messungen. Nachteilige Eigenschaften sind etwa die Querempfindlichkeit, die Nichtlinearität und die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen.

Querkraft durch menschliche Einwirkung auf den Kraftsensor oder durch Wechselwirkung mit der im Werkstückträger verbauten Technik werden durch die konstruktive Auslegung des Messsystems vermieden. Über einen zentralen Pneumatikzylinder fahren die unterhalb der Grundplatte geschützten Sensoren nach oben in Richtung der Batteriezellen und die Kraftübertragung wird über Stößel hergestellt. Sobald die Messung beendet wurde, verschwinden die Stößel zur Kraftübertragung unter der schützenden Grundplatte. Das vollständige Ausheben verhindert Reibungskräfte zwischen den Prüflingen und der Messvorrichtung beziehungsweise dem Werkstückträger.

Ein Permanentmagnet, der am Becherboden der Batteriezelle andockt, gewährleistet zuverlässig, dass die Zelle auf dem Kraft-

**Bild 2.** (a) Skizze der Wiegestation mit Werkstückträger; (b) Draufsicht auf das Sensorlayout. Grafik: Fraunhofer IPA

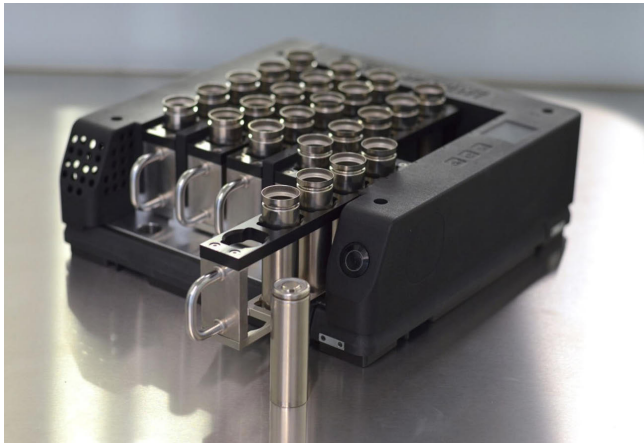


Bild 3. Intelligenter Werkstückträger. Foto: Fraunhofer IPA

einleitungspunkt des Sensors sitzt. Auf diese Weise wird keine komplexe Greiftechnologie benötigt, welche die Messung potenziell stören könnte.

Durch den relativ schweren Unterbau und die integrierten Schwingungsdämpfer werden Vibrationen aufgrund äußerer Einflüsse in unproblematische Frequenzbereiche verschoben, sodass kein nennenswerter Einfluss durch Vibrationen auf das Messsystem besteht. Luftströme und Temperaturschwankungen am Aufstellungsort des Messsystems werden durch eine Umhausung und kontrolliert klimatisierte Umgebungsbedingungen vermieden, um exakte Messergebnisse zu erreichen.

Zudem müssen die Sensoren vor Überlast in Messrichtung geschützt werden, da diese irreversibel geschädigt werden können. Als Überlastschutz wurde die Auslenkung mechanisch so begrenzt, dass der Kraftsensor bei einer Belastung von rund 50 % über der nominellen Last auf der Grundplatte aufliegt. Um den Sensor vor übermäßiger Zugkraft zu schützen, ist der Haltemagnet so ausgelegt, dass die Abreißkraft innerhalb der nominellen Kraft des Sensors liegt.

2.2 Werkstückträgersystem

Innerhalb des Werkstückträgers sitzen die Batteriezellen in herausnehmbaren Einschieben, wie in **Bild 3** dargestellt.

Über fünf Einschübe für jeweils fünf Batteriezellen kann der Werkstückträger mit 25 Batteriezellen bestückt werden. Die Einschübe haben einen integrierten RFID (radio-frequency identification)-Tag, der vom Werkstückträger ausgelesen werden kann. In Verbindung mit einer festgelegten Position innerhalb der Einschübe kann so jede Zelle einzeln getrackt werden. Über dieses Design können die vielfältigen Anforderungen wie die chemische, thermische und klimatische Beständigkeit bei guter Zugänglichkeit und Kompaktheit bei moderaten Kosten erfüllt werden. Die Einschübe eignen sich damit sowohl für Wasch- und Ofenprozesse als auch für den Einsatz in Trockenraumumgebung.

Für jede Position im Einschub kann platzsparend über Induktion die Anwesenheit einer Batteriezelle detektiert werden. Status-LEDs dienen zur Bedienerunterstützung bei der Entnahme und beim Bestücken. Die aktive Kommunikation mit dem Manufacturing Execution System (MES) erfolgt drahtlos. Zum Überwachen der Umgebungsbedingungen für die Qualitätssicherung und Datenanalyse sind Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und flüchtige organische Verbindungen (VOC, volatile organic compounds), zur Detektion von in den Batteriezellen enthaltenem Elektrolyt über dessen Lösemittel sowie ein optionaler Taupunktsensor integriert. Über Sensoren an festen Positionen in Maschinen oder Räumen hinaus werden diese Daten kontinuierlich direkt an den Batteriezellen erfasst. Die elektronischen Kernkomponenten sind in **Bild 4** dargestellt.

Der Koppler in **Bild 5** dient zum induktiven Laden des Werkstückträgers und dazu über NFC (Near Field Communication) die Prozessstationen zu identifizieren und den Werkstückträger im MES zu registrieren.

Dies wird vom Werkstückträger aus durchgeführt. Daher sind keine Modifikationen an den Prozessstationen notwendig, sondern lediglich eine Stromversorgung. So können auch vollständig manuelle Prozessstationen einfach in das MES integriert werden. Die nächste zu verwendende Prozessstation wird dem Bediener auf dem Display des Werkstückträgers angezeigt. Im Falle des Messsystems wird der Werkstückträger manuell auf der Vorrichtung platziert. Wenn der Werkstückträger korrekte Informationen über NFC erhält, führt er die Registrierung durch. Im Anschluss sendet das MES einen Auftrag an das Messsystem und die Messung wird automatisch ausgeführt. Das Ergebnis wird zurückgesandt und der Werkstückträger empfängt Daten über den nächsten Prozessschritt.

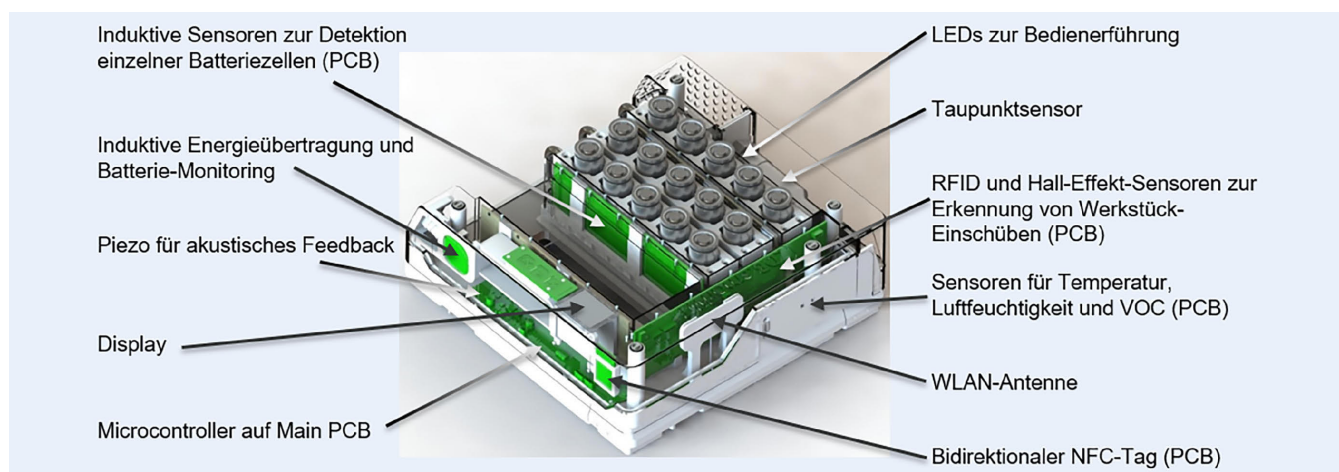


Bild 4. Elektronische Kernkomponenten des Werkstückträgers. Foto: Fraunhofer IPA

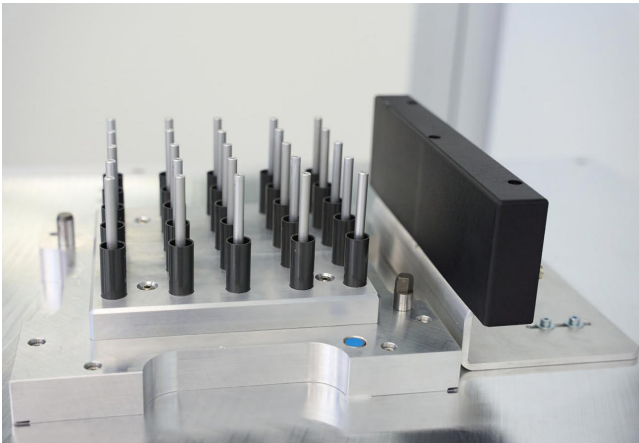


Bild 5. (a) Messsystem, ausgefahren zum Messen, mit Koppler zum Laden des Werkstückträgers und Registrieren per NFC (Near Field Communication); (b) Werkstückträger auf Messsystem in geladener Position zum Messen. Foto: Fraunhofer IPA

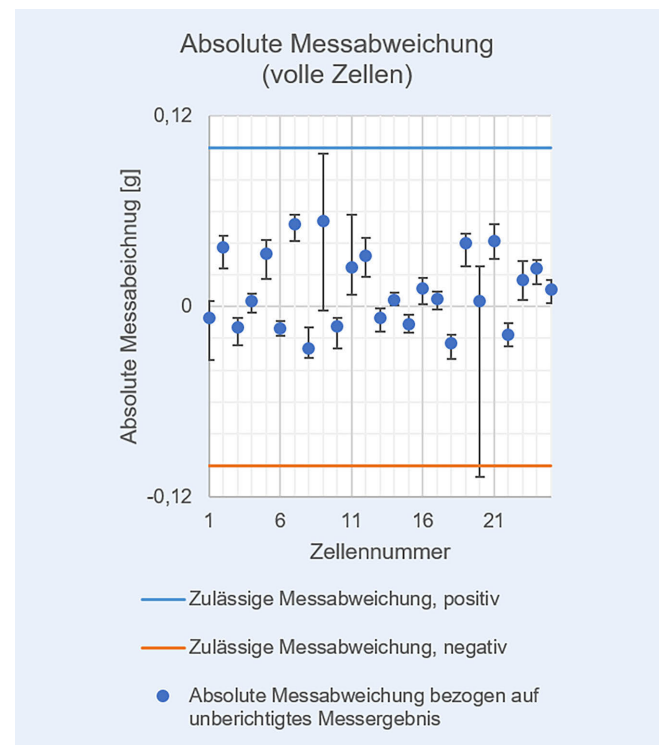
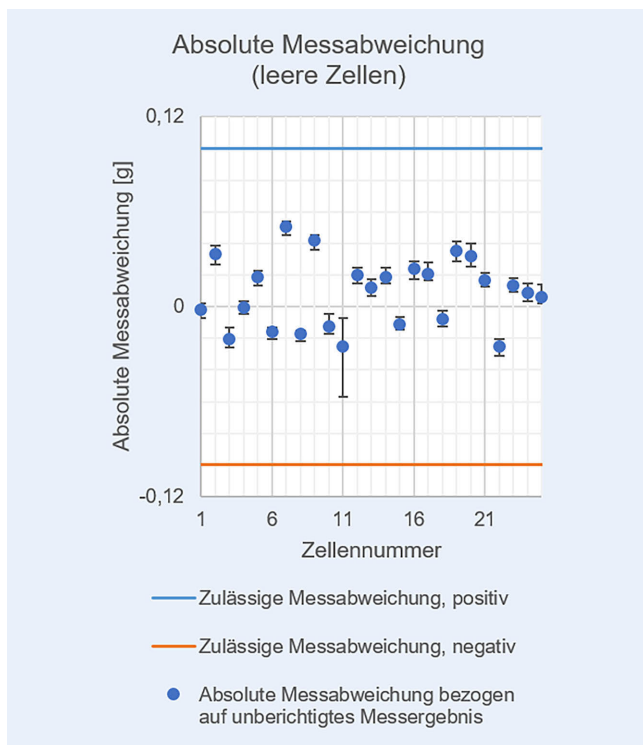


Bild 6. Absolute Messabweichung bei (a) leeren und (b) vollen Zellen; Mittelwerte, Minima und Maxima. Grafik: Fraunhofer IPA

2.3 Fähigkeiten des Messsystems

Die Evaluierung des Messsystems wird nachfolgend erläutert. Das Messequipment besteht aus 25 Biegebalken-Kraftsensoren mit einer Nennkraft von 0,3 kg und Genauigkeitsklasse C3 sowie hochpräzisen DMS (Dehnungsmessstreifen)-Messverstärkern. Jedes Ergebnis einer Einzelmessung bildet sich aus dem arithmetischen Mittel von 20 Messwerten, die mit einem Intervall von rund 150–200 ms aus dem Messverstärker ausgelesen werden. Zudem werden weitere Kennwerte wie die korrigierte Stichprobenstandardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

und die relative Spannweite in unveränderter Einbaustellung gebildet.

$$b_{\text{rg}} = \left(\frac{x_{(n)} - x_{(1)}}{\bar{x}} \right) * 100 \quad (2)$$

Um einen Satz mit Messungen zu bilden (siehe unten Bild 8), werden fünf Wiederholungen durch Ausheben und Absetzen der Batteriezellen durchgeführt. Die gesamte Auswertung wurde mit zehn dieser Sätze resultierend in 1000 einzelnen Messwerten für jeden der 25 Sensoren beziehungsweise 50 Messergebnissen pro Sensor.

Zum einen wurden leere Batteriezellbecher verwendet und zum anderen mit Referenzgewichten bestückte Becher, deren Gesamtmasse grob einer vollständig assemblierten Zelle entspricht. Diese sind im Folgenden als volle Zellen bezeichnet. Der „richtige

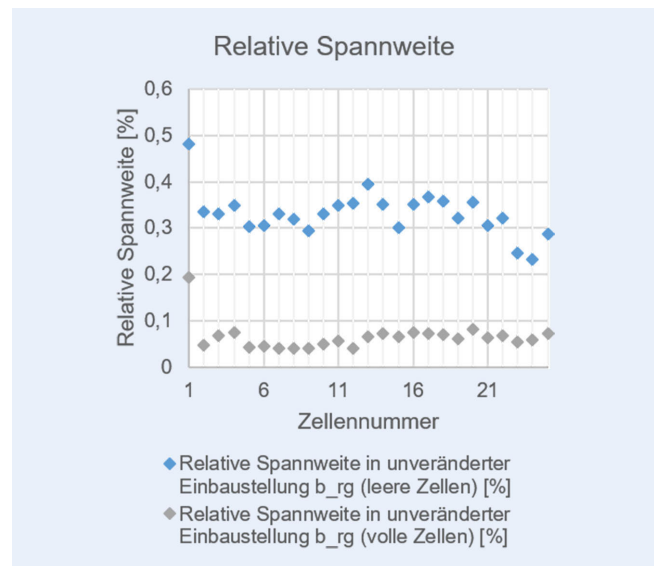
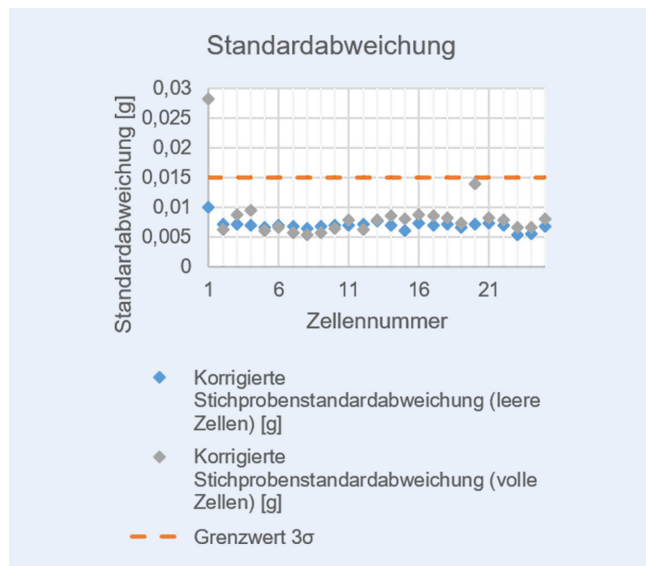


Bild 7. Standardabweichung (a) und relative Spannweite (b) für leere und volle Zellen. Grafik: Fraunhofer IPA

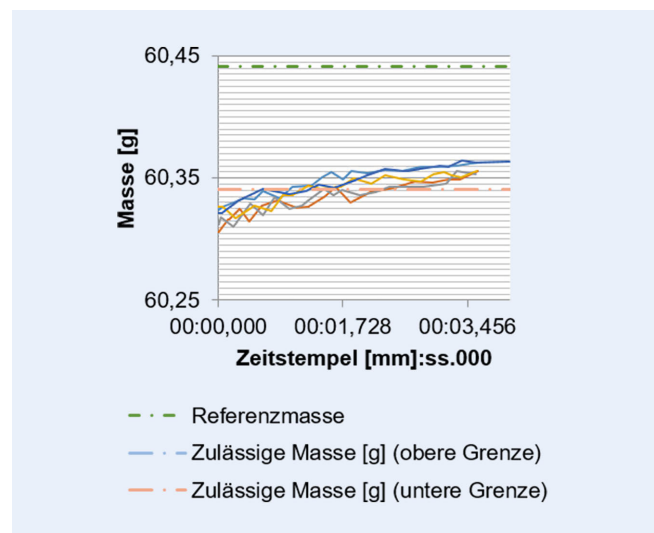
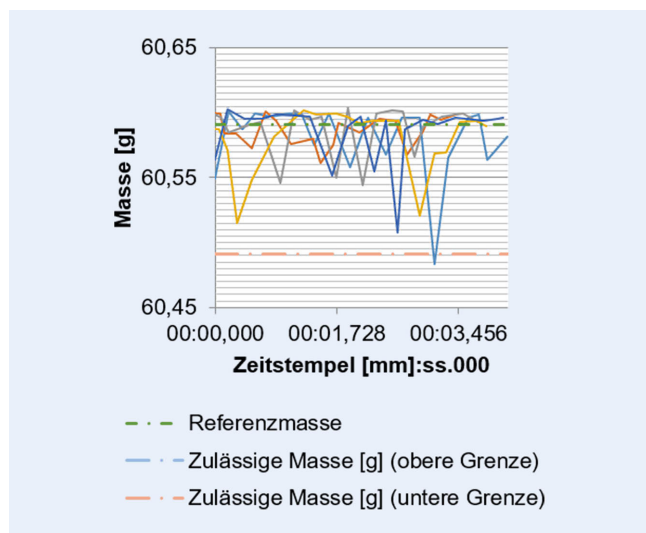


Bild 8. Satz mit fehlerhaften Messungen von (a) Sensor 1 und (b) Sensor 20. Grafik: Fraunhofer IPA

Wert“ der Masse der leeren sowie der vollen Batteriezellbecher wurde mit einer hochpräzisen Laborwaage ermittelt. Deren Wiederholgenauigkeit von 0,1 mg und Linearität von 0,2 mg ist signifikant besser als der zulässige Messfehler von 0,1 g in dieser Anwendung.

Die Minima und Maxima sowie die Mittelwerte der absoluten Messabweichung bezogen auf das unberichtigte Messergebnis sind in **Bild 6** für leere und volle Zellen dargestellt. Die absolute Messabweichung wird berechnet als Differenz aus dem Messergebnis \bar{x} , dem arithmetischen Mittel der Messwerte, und dem mit der Referenzwaage ermittelten richtigen Wert x_i :

$$e = \bar{x} - x_i \quad (3)$$

Der absolute Fehler bei den leeren Zellen beträgt beim Großteil der Messungen ungefähr $\pm 0,05$ g und liegt somit deutlich unter den zulässigen $\pm 0,1$ g. Die korrigierte Stichprobenstandardabweichung, dargestellt in **Bild 7**, ist typischerweise kleiner 0,01 g, was eine sehr geringe Streuung des Sensorsignals bedeutet.

Die relative Spannweite in unveränderter Einbaustellung als Maß für die Wiederholbarkeit liegt typischerweise unter 0,1 % für die vollen und unter 0,4 % für die leeren Zellen. Bei den Messungen mit vollen Zellen treten allerdings zwei charakteristische Fehlermuster auf. Aufgrund der Vielzahl an Fehlerquellen können diese Fehler nicht vollständig beseitigt, aber zuverlässig detektiert werden. Im Fehlerfall wird als erster Schritt die Messung bis zu einer festgelegten Anzahl wiederholt. Die Fehler werden zusammen mit den Messergebnissen an das MES geschickt, um nötige Schritte abzuleiten. Im einfachsten Fall kann dies eine Wiederholung der Messung durch den Bediener sein, aber auch Korrekturen an den Sensoren oder ein Austausch durch Wartungspersonal.

Eine Unregelmäßigkeit ist die vergleichsweise hohe Standardabweichung von Sensor 1 bei Messungen mit voller Zelle, siehe **Bild 8 a**.

Obwohl das arithmetische Mittel der Messung innerhalb der Spezifikation liegt, deuten die starken Schwankungen des Sensorsignals auf einen Fehler hin. Dies kann etwa ein Defekt aufgrund von Überlast durch Querkkräfte sein. Ein geeigneter Grenzwert

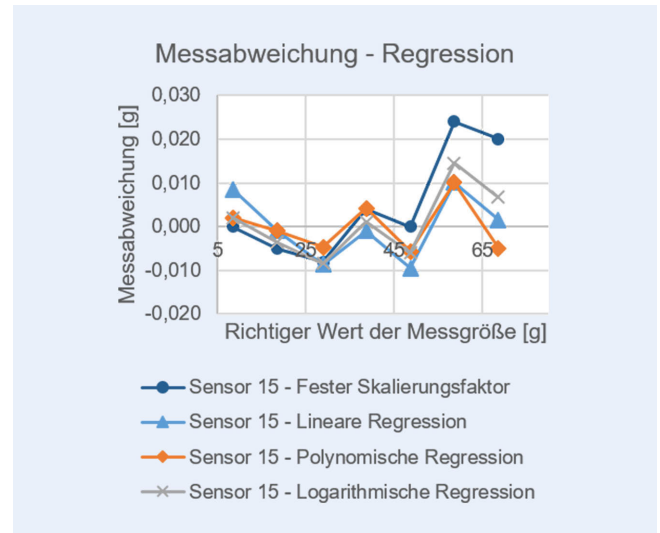
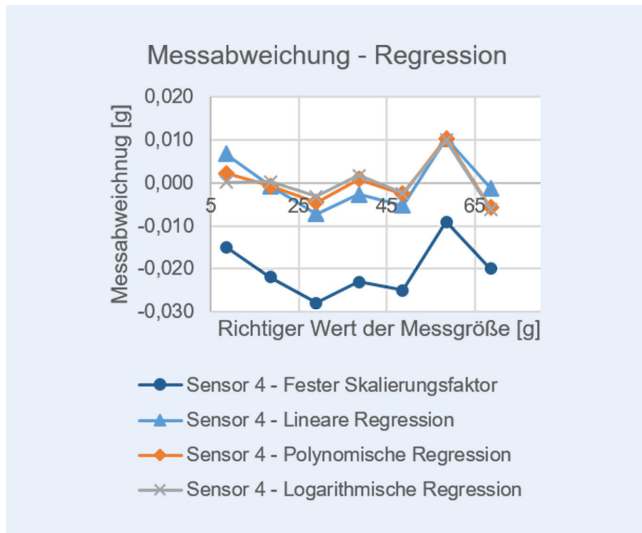


Bild 9. Messabweichung vor und nach Anwendung von Regressionsmethoden für (a) Sensor A und (b) Sensor B. Grafik: Fraunhofer IPA

für die korrigierte Stichprobenstandardabweichung liegt in dieser Anwendung bei 0,015 g für die vollen Zellen, dies sind etwa 3σ .

Die zweite typische Unregelmäßigkeit zeigt Bild 8b für eine Messung mit Last. Das Sensorsignal driftet weg ohne sich auf ein konstantes Niveau einzupendeln. Dies deutet auf Reibung durch Kontakt des Kraftaufnehmers mit einem nebenliegenden Kraftaufnehmer oder dessen Verkabelung hin. Ursächlich hierfür ist ein Verschieben der Komponenten durch unsachgemäße Benutzereinwirkung. Ein geeigneter Grenzwert für die Steigung der durch lineare Regression ermittelten Geraden, die das Driften des Sensorsignals über die Zeit repräsentiert, beträgt für diese Anwendung 0,006 g/s für die vollen Zellen, was ebenfalls rund 3σ entspricht.

Die Abhängigkeit des Ausgangssignals der Sensoren von der aufgetragenen Kraft wird idealisiert als linear und den Koordinatenursprung durchlaufend angenommen. Für viele Anwendungen ist dieses vereinfachte Modell eines Kraftsensors ausreichend, jedoch gibt es nichtlineare Fehler, die andere Kompensationsmethoden erfordern [11]. Beim hochpräzisen Wiegen können diese Fehler einen relativ hohen prozentualen Anteil des erlaubten Messfehlers einnehmen. Um die Linearität der Kraftsensoren zu verifizieren, wurden sieben verschiedene Referenzgewichte von 8,445 bis 68,581 g mit einer Schrittweite von rund 10 g manuell mit auf- als auch absteigendem Gewicht auf die Kraftsensoren mit zehn Iterationen platziert. Zusätzlich zu den aufgetragenen Gewichten kommen die an die Kraftsensoren fest montierten mechanischen Komponenten für die Aufnahme und die Kraftübertragung zwischen Kraftsensor und Batteriezellgehäuse. Vor diesen Messungen wurden die Kraftsensoren mit einem Kalibriergewicht von 50 g ± 1 mg kalibriert und auf null gesetzt. Bei der Kalibrierung wurde nur der für die Anwendung relevante Messbereich berücksichtigt, um die Genauigkeit über die Kalibrierung weiter zu erhöhen. Das Kalibriergewicht wurde am oberen Ende des Messbereichs ausgewählt, da mit einer konstant erlaubten Messabweichung – prozentual betrachtet – die Messabweichung mit steigendem Gewicht abnimmt. Neben den gemessenen Werten mit konstantem Skalierungsfaktor, wie sie aus dem Messverstärker nach Einpunktkalibrierung und Nullsetzen ausgelesen werden, zeigt **Bild 9** die gemessenen Werte nach Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Verwendung von

linearen (Gleichung 4), polynomischen (Gleichung 5) und logarithmischen (Gleichung 6) Modellen:

$$y = \alpha + \beta x \quad (4)$$

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2, \quad (5)$$

$$\ln y = \alpha + \beta \ln x \quad (6)$$

Dabei zeigt Sensor A einen Offset, obwohl der Sensor ohne Last vor den Messungen nullgesetzt wurde. Die mittlere absolute Messabweichung kann von 0,0203 g auf 0,0049 g durch einfache lineare Regression reduziert werden. Eine weitere geringfügige Verbesserung kann durch polynomische oder logarithmische Regression mit 0,0038 g beziehungsweise 0,0034 g erreicht werden. Sensor B hat keinen Offset. Die mittlere absolute Messabweichung von 0,0087 g auf 0,0058 g beziehungsweise 0,0046 g jedoch kann mit linearer und polynomischer Regression reduziert werden.

Die Angemessenheit einer Regression mit sieben verschiedenen Gewichten verglichen mit der Einpunktkalibrierung hängt stark von jedem einzelnen Sensor ab. So kann für Sensor A die mittlere absolute Messabweichung verglichen mit der zulässigen Messabweichung von rund 20% auf 5% reduziert werden, was erwägenswert ist. Die potenzielle Reduzierung für Sensor B ist deutlich geringer. In jedem Fall sollte das Messsystem nach der Montage wie beschrieben charakterisiert werden. In Abhängigkeit der individuellen Anforderungen an die Messung können beispielsweise alle Sensoren mit einer Messabweichung größer $\pm 3\sigma$ Teil weiterer Optimierungsschritte werden.

3 Zusammenfassung

Ein Ansatz zur Handhabung und zum Gewichtstracking von Batteriezellen in einer Prototypenfertigung mit intelligenten Werkstückträgern wurde vorgestellt. Die Lösung ermöglicht eine präzise Gewichtsmessung von 25 Batteriezellen zeitgleich innerhalb von fünf Sekunden und somit ohne nennenswerten Einfluss auf die Fertigungsdurchlaufzeit. Durch das Design des Werkstückträgers wird eine Zugänglichkeit zu den Batteriezellen von

unten geschaffen und die Messung kann ohne weitere Handhabungsprozesse durchgeführt werden. Es wurden Kraftsensoren mit einem eng an die Batteriezellen angepassten Messbereich eingesetzt und eine Sensorfehlererkennung als kritische Komponente zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit der Messung softwareseitig implementiert. So kann mit vergleichbar kostengünstigem Equipment eine hohe Präzision erreicht werden.

Die Batteriezellen können mit dem intelligenten Werkstückträgersystem, das drahtlos mit einem Manufacturing Execution System verbunden ist, getrackt werden. Zudem werden qualitätsbezogene Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, flüchtige organische Verbindungen oder Taupunkt unmittelbar an den Batteriezellen erfasst. Die Anforderungen durch die Prototypenfertigung im Labormaßstab werden erfüllt, während das Potenzial zur Skalierung und Integration in vollautomatisierte Systeme besteht.

Der Ansatz ist anpassbar an andere Batteriezell- und Werkstückträgergrößen. Es ist absehbar, dass zukünftig durch die Förderung nach steigender Energiedichte die Tendenz eher zu großformatigen Rundzellen geht [12]. Eine Anpassung etwa an zylindrische 4680 Zellen ist ebenso möglich, wie eine Anpassung an das noch kleinere und gängige 18650-Zellformat.

FÖRDERHINWEIS

Die Arbeit wurde gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg im Rahmen des Projekts "Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB)" unter der Fördernummer 3–4332.62-IPA/61.

Literatur

- [1] Schnell, J.; Nentwich, C.; Endres, F. et al.: Data mining in lithium-ion battery cell production. *Journal of Power Sources* 413 (2019), pp. 360–366
- [2] Schnell, J.; Reinhart, G.: Quality Management for Battery Production: A Quality Gate Concept. *Procedia CIRP* 57 (2016), pp. 568–573
- [3] Kwade, A.; Haselrieder, W.; Leithoff, R. et al.: Current status and challenges for automotive battery production technologies. *Nature Energy* 3 (2018) 4, pp. 290–300
- [4] Turetskyy, A.; Thiede, S.; Thomitzek, M. et al.: Toward Data-Driven Applications in Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing. *Energy Technology* 8 (2020) 2, pp. 1900136
- [5] Korthauer, R.: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Heidelberg: Springer 2013
- [6] Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014
- [7] Wood, D. L.; Li, J.; Daniel, C.: Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries. *Journal of Power Sources* 275 (2015), pp. 234–242
- [8] Günter, F. J.; Burgstaller, C.; Konwitschny, F. et al.: Influence of the Electrolyte Quantity on Lithium-Ion Cells. *Journal of the Electrochemical Society* 166 (2019) 10, A1709-A1714
- [9] Gaines, L.; Cuenca, R.: Costs of lithium-ion batteries for vehicles. Stand: 2000. Internet: www.osti.gov/servlets/purl/761281. Zugriff am 06.06.2023
- [10] Kurzweil, P.; Dietlmeier, O. K.: *Elektrochemische Speicher*. Wiesbaden: Springer Fachmedien mit Hi2015
- [11] Lin, H.; Wang, L.; Yu, J. et al.: Nonlinear Error Compensation for Load Cells Based on the Optimal Neural Network With an Augmented Lagrange Multiplier. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 64 (2015) 11, pp. 2850–2862
- [12] Liu, Y.; Zhang, R.; Wang, J. et al.: Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience* 24 (2021) 4, p. 102332

Dipl.-Ing. **Tobias Iseringhausen**

Ricardo Kleinert, M.Sc.

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1224
tobias.iseringhausen@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)