

Energieeffizienz in der Batteriezellproduktion durch Reduktion der Trockenraumvolumina

Modulare bauraumoptimierte Materialflusssysteme

J. Scholz, F. Kößler, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Aufgrund von feuchteempfindlichen Materialien in den Batteriezellen sind bei der Produktion Trockenräume erforderlich. Die Entfeuchtung der großen Luftvolumina ist sehr energieintensiv. Modularer Produktionskonzepte mit als Microenvironment gekapselten Roboterzellen reduzieren die Luftvolumina und ermöglichen eine prozessspezifische Anpassung der Taupunkte. Durch Modularisierung der Microenvironments, der Schleusen und der Handhabungstechnik kann die Klimaumhauseung näher an die Prozessmaschine gebracht werden.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Materialfluss, Batteriefertigung

Modular, space-optimized material flow systems – Energy efficiency in battery cell production by reducing dry room volumes

ABSTRACT Due to the moisture-sensitive materials in the battery cells, drying rooms are required during production. Dehumidifying the large volumes of air is very energy-intensive. Modular production concepts with robot cells encapsulated as microenvironments reduce the air volumes and enable process-specific adjustment of the dew points. By modularizing the microenvironments, the airlocks and the handling technology, the climate housing can be drawn closer to the process machine.

1 Motivation

Die Elektrifizierung des Mobilitätssektors ist ein zentrales Element zur Erreichung der Klimaziele. Durch den gesteigerten Bedarf an Batteriekapazität ist eine Steigerung der Produktionskapazität in den kommenden Jahren erforderlich [1]. Um die Batterien effizient in die zur Verfügung stehenden Bauräume in Fahrzeugen und Geräten zu integrieren, sind variantenspezifische Anpassungen notwendig. Dies erfordert flexibles Produktions-equipment, um die Produktion schnell an neue Zellformate und Produktionsmengen anpassen zu können.

Die feuchteempfindlichen Materialien in den Batteriezellen bedingen den Betrieb von energieintensiven Trockenräumen. Die nötigen Taupunkte der Luft in der Produktion liegen zwischen -20°C und -70°C . Hierzu werden aktuell in der industriellen Batteriezellproduktion große Trockenräume verwendet, deren Taupunkt am Prozess mit den höchsten Anforderungen ausgerichtet werden muss. Somit ist der Taupunkt für einige Prozesse überdimensioniert und es wird übermäßig viel Energie verbraucht. Durch die großen Dichtflächen können zudem leichter Leckagen auftreten. Durch die Verwendung von großen zentralen Trocknungseinheiten wird bei ungeplanten Wartungsarbeiten das gesamte Material innerhalb des Trockenraums zu Ausschuss. Bis zu 50 % der aufgewendeten Energie bei der Produktion von Batteriezellen wird für Trocknung und Trockenräume aufgewendet [2]. Der Energieverbrauch von Trockenräumen hängt maßgeblich vom zu trocknenden Luftvolumen sowie der eingetragenen Feuchtigkeit beispielsweise durch Mitarbeiter ab [3].

Zur Steigerung der Flexibilität in der Batteriezellproduktion sowie der Verkleinerung des Trockenraumvolumens sind agile Produktionssysteme mit modularen Roboterzellen, die in Microenvironments integriert sind, ein vielversprechender Lösungsansatz [4]. Eine wichtige Komponente dieser Microenvironments ist die Automatisierung der Prozesse innerhalb des Microenvironments sowie die Verwendung von Schleusen als Schnittstellen zwischen den Microenvironments [5]. Die Entwicklung modularer Baukästen für Submodule der Microenvironments sowie die Schnittstellenstandardisierung zwischen den Submodulen erlaubt eine schnelle und effiziente Anpassungen an geänderte Randbedingungen und trägt zu einer ökonomisch und ökologisch effizienten Produktion auch bei geringen Stückzahlen bei.

2 Konzept zur agilen Batteriezellproduktion

Die Batteriezellproduktion gliedert sich in die Elektrodenfertigung, die Zellassembly und das Zell-Finishing. Bis die Batterie am Ende der Elektrolytbefüllung versiegelt wird, müssen die Batteriezellen und die nötigen Materialien unter Trockenraumbedingungen transportiert und verarbeitet werden. Im Ansatz von Fleischer *et al.* [4] werden die Prozessschritte der Batteriezellproduktion in Microenvironments gekapselt. Diese sind die Module eines agilen Produktionssystems, das es erlaubt flexibel auf geänderte Zellformate und Stückzahlanforderungen zu reagieren. Ein solches Microenvironment inklusive der Submodule ist in **Bild 1** dargestellt.

Die Abmessungen des Microenvironments sowie die Submodule sind standardisiert. Jedes Microenvironment ist mit einer

einheitlichen Schleuse ausgestattet. Der Materialfluss zwischen Schleuse und Prozessmodul wird ebenfalls standardisiert mittels einer 6-Achskinematik umgesetzt. Das Prozessmodul hingegen entspricht dem benötigten Prozessschritt innerhalb des Microenvironments. Dieses kann auch unter Beachtung der Reichweite sowie Kollisionsräumen frei in der Zelle positioniert werden. [4]

Der Materialfluss zwischen den Microenvironments erfolgt mit einem fahrerlosen Transportsystem. Dieses transportiert die notwendigen Batteriematerialien in einer luftdichten Transportbox zur Schleuse des Microenvironments und übergibt die Transportbox an die Schleuse. Anschließend erfolgt der Transport in das Innere des Microenvironments und die Transportbox wird durch den Handhabungsroboter geöffnet. Anschließend wird das Material zum Prozessmodul transportiert [6]. Beim Ausschleusen des Materials wird das Produkt des Prozessmoduls durch den Handhabungsroboter zurück in die Transportbox gebracht. Der Roboter verschließt die Box und der eigentliche Ausschleusvorgang beginnt.

Gegenüber den herkömmlich verwendeten großen Trockenräumen erlaubt dieses Konzept die flexible Anpassung an geänderte Produktionsvolumina und Zellformate. Zusätzlich können die kleineren Trockenräume unabhängig voneinander gesteuert werden, sodass die Taupunkte auch prozessspezifisch eingestellt werden [5]. Dies trägt bereits zu einer Reduktion des Energieverbrauchs gegenüber den klassischen großen Trockenräumen bei.

Für eine weitere Optimierung des Energieverbrauchs ist es erforderlich, das Microenvironment näher an die Geometrie des Prozessmoduls anzupassen. Daraus resultiert auch, dass der derzeit verwendete Handhabungsroboter durch ein kleineres und kompakteres System ersetzt werden muss.

3 Anforderungen an den Materialfluss im Microenvironment

In **Bild 2** ist am Beispiel einer Trockenbeschichtungszelle der mögliche reduzierte Bauraum des Microenvironments dargestellt.

Die Trockenbeschichtung ist ein Teilschritt der Elektrodenfertigung. Das Beschichten ist notwendig, um das Aktivmaterial auf das Elektrodenmaterial aufzutragen. Hierzu wurden bisher nasschemische Verfahren genutzt, bei denen das Aktivmaterial mit teuren und teilweise gesundheitsgefährdenden organischen Lösungsmitteln vermischt wird. Nach dem Beschichten muss beim Nassbeschichten ein energieintensiver Trocknungsprozess erfolgen. Beim Trockenbeschichten wird das Aktivmaterial mit bindenden Polymeren vermischt und mittels eines Kalanders auf die Elektrodenfolie laminiert. Die Luftfeuchtigkeit hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse [7].

Als Materialien müssen sowohl das Pulver im dargestellten Pulverbehälter als auch die Elektrodenmaterialien als Coils in das Microenvironment geschleust werden. Für einen automatisierten Betrieb muss der Pulverbehälter am Prozessmodul geöffnet werden. Dazu muss das Ventil des Behälters angesteuert werden. Für die Elektrodenmaterialien ist eine Transportbox für den Transport außerhalb des Microenvironments erforderlich. Aufgrund des reduzierten Bauraums ist es notwendig, das Handhabungssystem flexibel an den kürzest möglichen Weg für den Materialfluss anzupassen. Eine Sonderentwicklung der Materialflusssysteme führt allerdings zu sehr hohen Kosten, weshalb standardisierte Module mit maximaler Flexibilität erforderlich sind. Ein weiterer zentraler Bestandteil des Materialflusssystems ist die Schleuse.

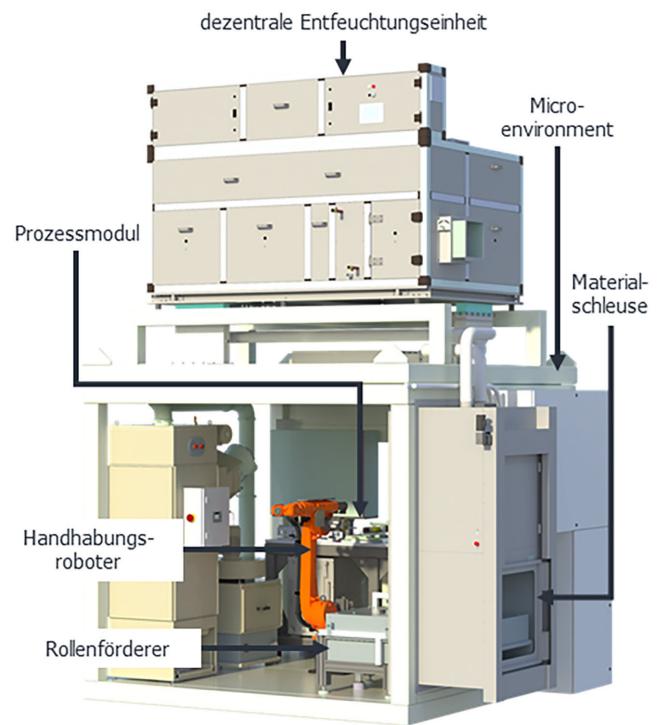


Bild 1. Standardisiertes Microenvironment für die agile Batteriezellfertigung. *Grafik: KIT/wbk*

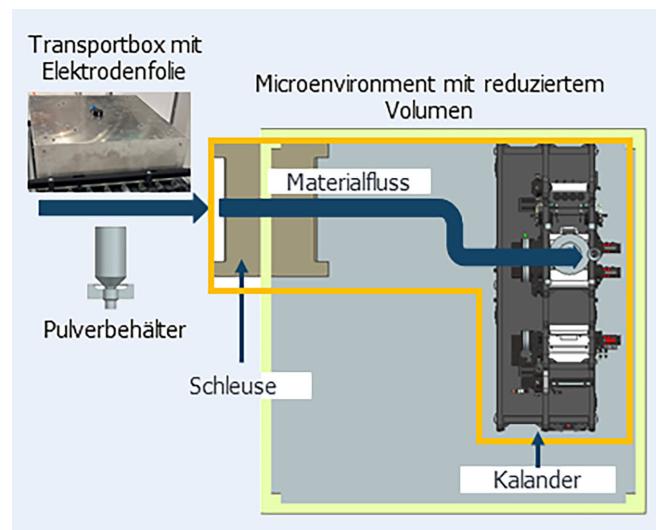


Bild 2. Eingangsmaterialien und reduziertes Microenvironmentvolumen am Beispiel einer Trockenbeschichtungszelle. *Grafik: KIT/wbk*

Diese bildet die Schnittstelle zwischen externem und internem Materialfluss. Der Materialfluss zwischen den Microenvironments wird zunächst nicht betrachtet.

Die Handhabungsfunktionen beim Einschleusvorgang sowie beim Materialfluss von Schleuse zum Prozessmodul sind in **Bild 3** in Anlehnung an die VDI 2860 dargestellt. Die dargestellten Funktionen müssen durch den modularen Baukasten bauraumoptimiert abgebildet werden.

Das Material wird in einer definierten Position und Orientierung an das Microenvironment angeliefert. Mit dem Eintritt in die Schleuse übernimmt das zu entwickelnde Materialflusssystem

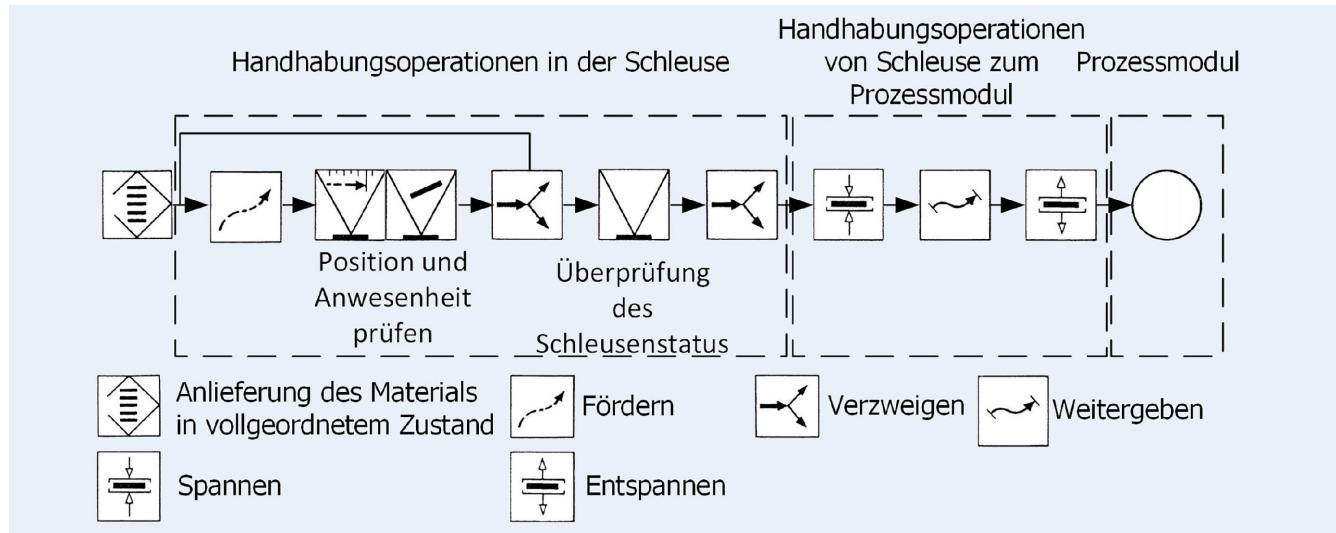


Bild 3. Darstellung der notwendigen Handhabungsoperationen beim Schleusenprozess und dem Materialhandling. *Grafik: nach VDI 2860 [8]*

das angelieferte Material. Dazu muss zunächst die äußere Schleusentür geöffnet und das Material in die Schleuse gefördert werden. Um Kollisionsfreiheit sicherzustellen, ist es hierbei nötig, die Position und Anwesenheit der Materialien zu überprüfen. Zusätzlich ist eine Statusüberwachung der Schleuse erforderlich, damit die innere Tür erst geöffnet wird, wenn die äußere Tür geschlossen wurde. Andernfalls findet eine Vermischung der Außenluft und der Innenluft statt. Nach dem Öffnen der inneren Schleusentür hängen die erforderlichen Handhabungsfunktionen von der Anlieferung der Materialien ab. Falls eine Transportbox vorhanden ist, muss diese zunächst geöffnet werden, bevor die Materialien entnommen werden können. Handelt es sich um Pulver, das in luftdichten Pulverbehältern transportiert wird, können diese direkt aus der Schleuse aufgenommen und zum Prozessmodul transportiert werden. In diesem Fall ist von großer Bedeutung, eine steuerungstechnische Anbindung zwischen dem Pulverbehälter und dem Materialhandling oder dem Prozessmodul herstellen zu können, damit dieser im Prozess geöffnet werden kann.

Nach Abschluss der Fertigungsprozesse mittels des Prozessmoduls muss der beschriebene Einschleusvorgang in umgekehrter Richtung durchlaufen werden.

Abhängig von den benötigten Arbeitsräumen kann auch eine Funktionsintegration zwischen den Handhabungsoperationen in der Schleuse und den Handhabungsoperationen von der Schleuse zum Prozessmodul erfolgen. Dies ist aber nur möglich, wenn die Schleuse entsprechende mechanische Schnittstellen, Steuerungsschnittstellen und Medienschaltung bereitstellt. Um die Module des Baukastens flexibel zueinander positionieren zu können und zu verbinden, sind standardisierte Schnittstellen, die zusätzlich eine Medien-, Strom- und Signalübertragung ermöglichen, von zentraler Bedeutung.

Für eine schnelle Inbetriebnahme von Konfigurationen ist es erforderlich, eine geeignete Steuerungsarchitektur zu entwickeln, die ein Plug-and-Play der Module ermöglicht. Dazu sollten die Module ihre Fähigkeiten an die Steuerung übermitteln und diese von der Steuerung wiederum gelesen werden können. Daraus folgt der Bedarf eines standardisierten Beschreibungsmodells der Module.

Für die Planung von Konfigurationen basierend auf dem zu entwickelten Baukasten wird eine Konfigurationslogik benötigt,

die es erlaubt, basierend auf den Randbedingungen eines Anwendungsfalls, die bestmögliche Konfiguration zu identifizieren. Dazu ist zudem ein Bewertungsschema erforderlich, das Kriterien wie Energieeffizienz und Platzbedarf einschließt. Das standardisierte Beschreibungsmodell der Module muss somit auch ermöglichen, in der Planung von Konfigurationen zu überprüfen, ob die Anforderungen erfüllt werden und die Module kompatibel zueinander sind. Darüber hinaus müssen die passenden Informationen für das Bewertungsschema bereitgestellt werden.

4 Aufbau des modularen bauraum-optimierten Materialflusssystems

Für die flexible Anpassung an verschiedenste Materialflussituationen ist ein modularer Baukasten erforderlich, der die im vorherigen Kapitel beschriebenen Funktionen unter Erfüllung der jeweiligen Randbedingungen ermöglicht. In **Bild 4** sind die grundlegenden Bestandteile des Materialflusssystems dargestellt.

Durch die Integration verschiedener Schleusenbaugrößen mit standardisierten Schnittstellen zum Microenvironment und den Bewegungsmodulen des Materialflusssystems kann auch der Bauraum der Schleuse an verschiedene Abmessungen der Edukte angepasst werden. Die Sensorik innerhalb des Baukastens ist nötig, um die dargestellten Überwachungsfunktionen zu ermöglichen.

Das Bewegungsmodul innerhalb des Baukastens erfüllt die erforderlichen Bewegungsfunktionen innerhalb des Materialflusssystems. Dieses kann durch Kombination von Förderbändern sowie verschiedenen Linear- und Rotationsachsen aufgebaut werden. Diese müssen eine freie Kombination der Achsen erlauben. Eine mögliche Konfiguration des Bewegungsmoduls kann auch eine 6-Achskinematik, wie derzeit als Handhabungsroboter verwendet, sein. Die Auswahl von spezifischen Konfigurationen hängt vom zur Verfügung stehenden Bauraum, den Massen des Handhabungsobjekts und den erforderlichen Beschleunigungen ab.

Über das Greifsystem des Baukastens wird die Verbindung zwischen den Bewegungssystemen und dem Handhabungsobjekt hergestellt. Die Wahl des passenden Greifers hängt von der Geometrie sowie dem Gewicht des Handhabungsobjekts ab. Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Auswahl des Greifkonzepts ist, ob

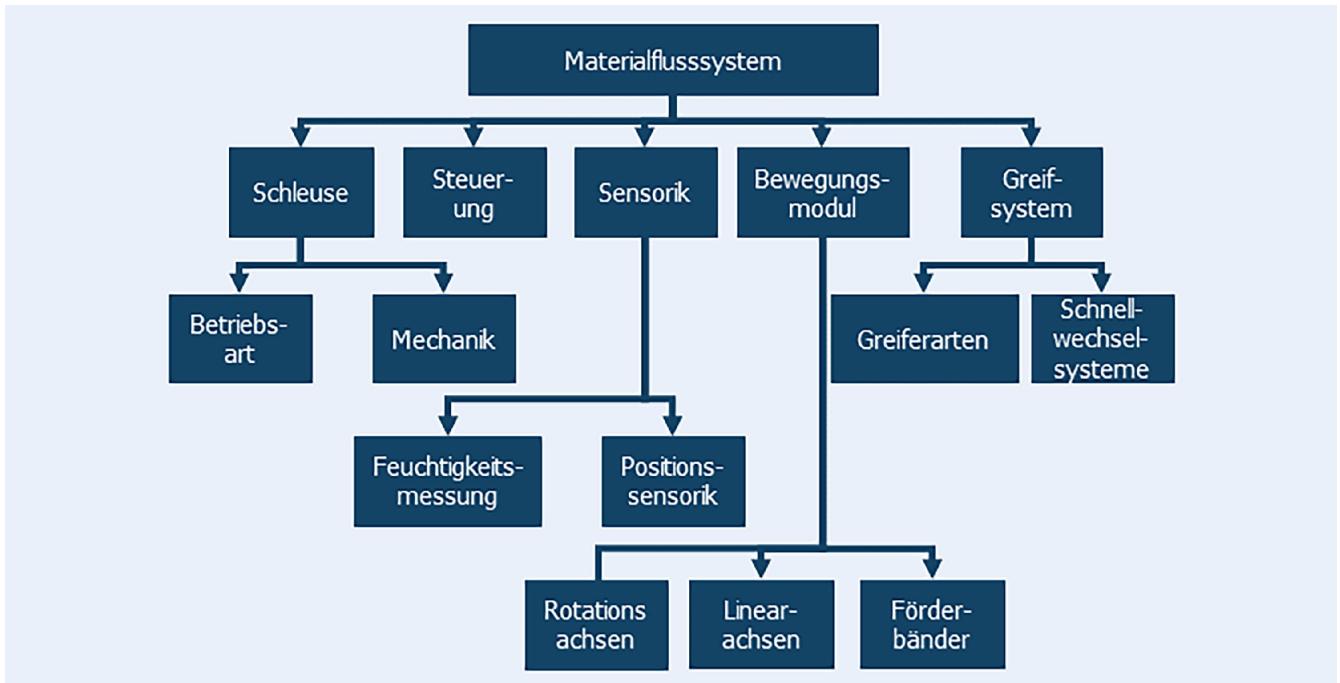


Bild 4. Aufbau des Baukastens zum Materialfluss innerhalb des Microenvironments. *Grafik: KIT/wbk*

eine steuerungstechnische Anbindung des Handhabungsobjekts erforderlich ist. Um auch eine Steuerungsschnittstelle zwischen Materialflusssystem und dem transportierten Material herstellen zu können, werden Schnellwechselkopplungen in den Baukasten integriert. Diese werden bereits als Schnittstelle in der agilen Batteriezellproduktion eingesetzt. Daher ist es von hoher Bedeutung, dass auch die Steuerungstechnik ein Bestandteil des Baukastens ist, um diese schnell an geänderte Bedingungen anpassen zu können. Für eine schnelle Konfiguration innerhalb des Baukastens ist die Definition von standardisierten mechanischen Schnittstellen wichtig. Dies umfasst sowohl die Schnittstellen zwischen den Modulen im Baukasten als auch die Schnittstellen zwischen Microenvironment und Materialflusssystem. Die Nutzung von Nullpunktspannsystemen, welche in einem definierten Raster am Boden angebracht werden können, ermöglicht eine definierte und schnelle Fixierung der Module im Microenvironment.

Zur Beschreibung der Module wird ein standardisiertes Informationsmodell entwickelt, das die Fähigkeiten der Komponenten im Baukasten abbildet. Bei einer Linearachse umfasst dies beispielsweise die maximale Traglast und die maximale Länge der Achse, wodurch geprüft werden kann, ob die Achse den Arbeitsraum sowie die Belastungen abdecken kann. Über ein standardisiertes Schema zur Anforderungsabfrage an Materialflusssysteme sollen die Anforderungen an das Materialflusssystem erfasst werden. Ausgehend von diesen Anforderungen soll die Konfigurationslogik mittels Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung die bestmögliche Lösung basierend auf den zu definierenden Entscheidungskriterien auswählen.

Der Baukasten erlaubt es, Materialflusssysteme in Abhängigkeit von Prozessmodulen und Handhabungsobjekten auszulegen, ohne dass kostenintensive Sonderentwicklungen notwendig sind. So kann eine Überdimensionierung vermieden werden, wodurch sowohl der Platzbedarf als auch der Energieverbrauch sowie der Materialeinsatz für das Materialflusssystem reduziert wird. Durch

den reduzierten Platzbedarf des Materialflusssystem kann auch das Microenvironment kleiner ausgeführt werden. Dies führt wiederum zu einem geringeren Trockenraumvolumen und in der Folge zu einem reduziertem Energieverbrauch.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Als Lösungsansatz zur Flexibilisierung und Reduktion des Energieverbrauchs der Batterieproduktion wurde im Stand der Technik die Batteriezellproduktion auf Basis von Microenvironments vorgestellt.

Um den Energieverbrauch weiter zu senken, ist es notwendig, die einzelnen Submodule des Microenvironments weiter zu modularisieren. Neben der Modularisierung des Microenvironments erfordert dies die Modularisierung des Materialflusssystems, um dieses bauraumoptimiert an verschiedene Anwendungsfälle anzupassen. Durch Integration der Schleuse in den Baukasten können Schnittstellen innerhalb des Materialflusssystems sowie zu den Systemen außerhalb des Microenvironments weiter standardisiert werden.

Ausgangspunkt für die Gestaltung des Baukastens stellte die derzeitige Konfiguration bestehend aus einer 6-Achskinematik kombiniert mit einem Rollenförderer dar. Am Beispiel des Trockenbeschichtungsprozesses wurde der beschriebene modulare bauraumoptimierte Materialflussbaukasten entwickelt und in Betrieb genommen.

In der Folge werden weitere Prozessschritte entlang der Batteriezellproduktion analysiert und der Baukasten entsprechend angepasst. Durch die integrierte Entwicklung des Baukastens im Zuge eines Forschungsprojektes gemeinsam mit einem Hersteller von Microenvironments sowie die Integration von Ergebnissen aus klimatischen Analysen des Schleusenprozesses stellt der modulare Baukasten einen vielversprechenden Lösungsansatz für die energieeffiziente Batteriezellproduktion dar.

FÖRDERHINWEIS

Das Konzept des modularen Microenvironments wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des Forschungsprojekts „InMicroBatt – Intelligente, modular adaptive Microenvironments für eine effizientere Batteriezellfertigung“ (Förderkennzeichen 03XP0542C) erarbeitet und umgesetzt. Die Betreuung des Vorhabens erfolgt durch den Projekträger Jülich. Die Förderung erfolgt im Rahmen der Richtlinie „Effizienzsteigerung und Nutzung von Synergieeffekten in der Batteriezellfertigung für die Elektromobilität (Syn-Batt)“. Eingebettet ist das Vorhaben in dem Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe (CELEST) und im Batterietechnikum (BATEC) des KIT.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.): Batterieproduktion für Deutschland und Europa: Bericht der Fokusgruppe Wertschöpfung der AG 4 der NPM. Stand: 2021. Internet: www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG4_Batteriezellproduktion.pdf Zugriff am 19.08.2024
- [2] Erakca, M.; Baumann, M.; Bauer, W. et al.: Energy flow analysis of laboratory scale lithium-ion battery cell production. *iScience* 24 (2021) 5, #102437
- [3] Ahmed, S.; Nelson, P. A.; Dees, D. W.: Study of a dry room in a battery manufacturing plant using a process model. *Journal of Power Sources* 326 (2016) 10, pp. 490–497

- [4] Fleischer, J.; Kößler, F.; Sawodny, J. et al.: Flexible Produktionsysteme. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 07–08, S. 486–489. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [5] Plocher, L.; Heller, M.; Ingendoh, B. et al.: Mini-Environments In Lithium-Ion Battery Cell Production: A Survey On Current State, Challenges And Trends. Hannover : publish-ing 2023
- [6] Henschel, S.; Kößler, F.; Fleischer, J.: Material Flow of an Agile Battery Cell Production System Based on Diffusion-Tight Transport Boxes and Driverless Transport Systems. In: Bauernhansl, T.; Verl, A.; Liewald, M. et al. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Cham: Springer Nature Switzerland 2024, pp. 550–558
- [7] Kostengünstige Batteriezellen für das Elektroauto von morgen. *JOT Journal für Oberflächentechnik* 59 (2019) 8, S. 14–15
- [8] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1990



Johannes Scholz, M. Sc.

johannes.scholz@kit.edu
Tel. +49 1525 / 4375433
Foto: wbk

Florian Kößler, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
wbk – Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

LIZENZ



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