Trockenraumtaugliche Werkstoffe – Anforderungen, Effekte und Lösungsansätze für die industrielle Fertigung unter extremen Trockenbedingungen

Einführung

Mit dem weltweiten Ausbau der Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien und andere elektrochemische Energiespeicher rückt eine Fertigungsumgebung in den Fokus, die klassische Rein- und Prozesstechnik vor neue Herausforderungen stellt: der Trockenraum. Typischerweise werden hier Taupunkttemperaturen von -40 bis -50 °C realisiert, was einer relativen Feuchte von etwa 0,6 % entspricht. Diese extremen Bedingungen sind erforderlich, weil die verarbeitete Batteriechemie hochsensitiv und energetisch anspruchsvoll ist und nur unter nahezu vollständigem Feuchteausschluss beherrschbar bleibt. Gleichzeitig müssen viele dieser Produktionsschritte in kombinierten Trocken- und Reinräumen erfolgen, da bereits kleinste Partikel in dünne Batteriefolien eingepresst werden und zu Kurzschlüssen, thermischem Durchgehen oder Ausfällen im Feld führen können. Damit entstehen doppelte Anforderungen an Anlagentechnik, Peripherie und eingesetzte Werkstoffe, deren Zusammenspiel bislang nur unzureichend systematisch erforscht ist.

1. Werkstoffverhalten unter extremer Trockenheit

Die Kombination aus geringer Feuchte, mechanischer Beanspruchung und langen Betriebszeiten führt bei vielen Werkstoffen zu Effekten, die unter atmosphärischen Bedingungen nicht oder nur schwach ausgeprägt sind. Kunststoffe, Elastomere und Schmierstoffe können unter Trockenraumbedingungen buchstäblich austrocknen, schrumpfen, verspröden oder verströmen. Vergleichende Zugversuche an PBT, Polyamid und POM zeigen, dass sich die mechanischen Eigenschaften materialabhängig deutlich verändern. Während PBT aufgrund seiner geringen Wasseraufnahme kaum Unterschiede zwischen atmosphärischen und trockenen Bedingungen zeigt, versprödet Polyamid nach Lagerung im Trockenraum erheblich und weist eine deutlich reduzierte Kerbschlagzähigkeit auf. Bei POM bleibt die Zugfestigkeit zwar gleich, die Sprödigkeit nimmt jedoch messbar zu, was auf den Wegfall der weichmachenden Wirkung des eingelagerten Wassers zurückzuführen ist. Auch die Glasübergangstemperatur verschiebt sich unter Trockenraumlagerung nachweislich nach oben. Diese Effekte betreffen praxisrelevante Bauteile bis hin zu einfachen Kabelbindern, die unter Trockenbedingungen stärker anhaften, spröder werden und früher reißen können.

2. Partikelemission und Reinheitsverhalten im Trockenraum

Neben den rein mechanischen Veränderungen steht das Partikelabgabeverhalten von Anlagenkomponenten im Zentrum der Betrachtung. Die für Batterieproduktionen üblichen Luftreinheitsklassen ISO 6 bis ISO 8 gemäß ISO 14644-1 begrenzen insbesondere Partikel im Größenbereich von 0,1 bis über 5 µm, da Partikel oberhalb der halben Foliendicke bei Pressprozessen ein erhebliches Schädigungspotenzial darstellen. Vergleichsmessungen am Fraunhofer IPA in einem Referenzreinraum der ISO-Klasse 1 bei 45 %-rel. Feuchte und in einem Trockenreinraum mit weniger als 1 %-rel. Feuchte belegen deutliche Unterschiede. So erreicht ein untersuchter Sechsachs-Roboter im Reinraum stabil ISO-Klasse 5, wobei sich diese Klassifizierung auch nach dreimonatigem Dauerbetrieb im Trockenraum halten lässt.

Die detaillierte Auswertung des abgegebenen Partikelvolumens zeigt jedoch, dass insbesondere der Anteil der Partikel größer 5 µm über die Verweildauer im Trockenraum signifikant zunimmt. Bei einer untersuchten Energiekette verschlechterte sich das Ergebnis von ISO-Klasse 1 im Reinraum auf ISO-Klasse 4 im Trockenraum, was einer rund tausendfachen Partikelanzahl entspricht. Bemerkenswert ist, dass sich dieser Effekt reversibel zeigt: Nach Rücklagerung im normalklimatisierten Reinraum erreichte die Energiekette wieder ihr ursprüngliches Reinheitsniveau, was auf die Rückbildung einer feuchtebasierten Oberflächenschicht schließen lässt. Pneumatikzylinder erwiesen sich hingegen als weitgehend unabhängig von der Umgebungsfeuchte, was das Potenzial konstruktiver Kapselung und geeigneter Materialauswahl unterstreicht.

3. Begriffliche Einordnung und methodische Grundlagen

Um die Vielfalt der Anforderungen strukturiert zu erfassen, wurden am Fraunhofer IPA in Anlehnung an die Richtlinienreihe VDI 2083 die Begriffe „Trockenraumtauglichkeit" und „Trockenreinraumtauglichkeit" eingeführt. Trockenraumtauglichkeit umfasst dabei sämtliche für den Produktionsprozess relevanten Eigenschaften, darunter mechanische Kennwerte, Schrumpfungsverhalten, Korrosionsbeständigkeit, Feuchteaufnahme, Diffusionsdichtheit, chemische Beständigkeit sowie das elektrostatische Aufladeverhalten. Die Trockenreinraumtauglichkeit stellt eine Teilkategorie dar und bezieht sich spezifisch auf das Partikelabgabeverhalten unter Trockenbedingungen. Diese begriffliche Trennung erleichtert die Kommunikation zwischen Anlagenherstellern, Zulieferern und Betreibern und schafft die Voraussetzung für standardisierte Prüfverfahren. Zur experimentellen Absicherung wurde eine umfangreiche Infrastruktur aufgebaut, darunter eine Trockenreinraumkabine der ISO-Klasse 1 mit Taupunkten bis -70 °C, skalierbare Trockencape-Systeme sowie spezialisierte Prüfstände wie ein Tribometer zum Untersuchen der Partikelemission von Bodenbelägen.

4. Der Industrieverbund „Trockenraumtaugliche Werkstoffe"

Um die identifizierten Fragestellungen anwendungsnah und in enger Abstimmung mit der Industrie zu bearbeiten, hat das Fraunhofer IPA einen Industrieverbund zum Thema trockenraumtaugliche Werkstoffe initiiert. Der Kick-off fand Mitte Oktober 2025 mit über zwanzig teilnehmenden Unternehmen statt, der offizielle Projektstart erfolgt im Januar 2026, der Abschluss ist für November 2027 vorgesehen. Ziel des Verbundes ist es, gemeinsam mit den Partnern relevante Anforderungen zu definieren, geeignete Testverfahren auszuwählen oder für Trockenbedingungen anzupassen, diese zu validieren und anschließend an konkreten Komponenten der Partner anzuwenden. Die generierten Ergebnisse werden allen Verbundteilnehmern gleichermaßen zur Verfügung gestellt und schaffen so eine gemeinsame Datenbasis. Als besonders relevante Themen wurden Versprödung, Partikelverhalten, Verschleiß und Alterung identifiziert, ergänzt um die international zunehmend geforderte Buntmetalleignung sowie die elektrostatische Ableitfähigkeit (ESD), deren Stabilität unter Trockenbedingungen bislang nicht ausreichend geklärt ist. Auch Fragen der mechanischen Beanspruchbarkeit und Reinigbarkeit fließen in die Arbeitsstruktur ein, die auf drei Arbeitsgruppen zu mechanischen, chemischen und partikulären Eigenschaften aufsetzt. Am Ende des Verbundprojekts sollen neben belastbaren Prüfergebnissen auch Beiträge zu Regelwerken, Leitfäden und Expertenpapieren stehen, um die Erkenntnisse für Materialprüfung und Equipment Design breit nutzbar zu machen.

5. Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen belegen, dass die Übertragung etablierter Rein- und Anlagentechnik auf Trockenraumbedingungen nicht ohne Weiteres möglich ist. Werkstoffe, die unter atmosphärischen Bedingungen zuverlässig funktionieren, können unter dauerhaftem Feuchteentzug erheblich in ihren mechanischen und tribologischen Eigenschaften abweichen und zu einer deutlich erhöhten Partikelemission führen. Für die stark wachsende Batterieproduktion und angrenzende Industrien entsteht damit ein akuter Bedarf an fundiertem Wissen, standardisierten Prüfverfahren und praxisnahen Auswahlkriterien. Der Industrieverbund „Trockenraumtaugliche Werkstoffe" bietet den beteiligten Unternehmen die Möglichkeit, diese Grundlagen gemeinsam mit dem Fraunhofer IPA zu erarbeiten und die eigene Produkt- und Anlagenentwicklung frühzeitig auf die spezifischen Anforderungen dieser anspruchsvollen Fertigungsumgebung auszurichten.