

Positionspapier des Arbeitskreises Nachhaltige Elektronik

Im Auftrag

Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



Executive Summary

Die Elektronik- und Halbleiterbranche ist eine Schlüsselindustrie für die technologische Souveränität Europas – und steht zugleich vor der Herausforderung, Nachhaltigkeit systematisch in Wertschöpfung und Produktentwicklung zu integrieren.

Das vorliegende Positionspapier skizziert industriegetriebene Lösungsansätze und benennt konkrete Ansatzpunkte entlang des gesamten Lebenszyklus, vom Design bis zum Recycling, einschließlich der Potenziale der Datennutzung für die Nachhaltigkeit.

Zentrale Handlungsfelder

1. Nachhaltiges Design stärken

- Produkte frühzeitig auf Reparatur, Wiederverwendung und Recycling auslegen
- Wiederverwendung ganzer bestückter Leiterplatten ermöglichen
- Monitoring-Funktionen in ICs integrieren um Lebenszyklen nachvollziehbar zu machen

2. Produktion nachhaltiger gestalten

- Regionale Fertigungskapazitäten in der EU aufbauen und ausweiten
- Energieeffiziente Prozesse in der Halbleiter- und Elektronikproduktion fördern
- Erfolgreiche Nachhaltigkeitsansätze aus Pilotwerken skalieren

3. Reparatur fördern

- Modulares Produktdesign und eindeutige Bauteilkennzeichnung umsetzen
- Standardisierte Reparaturanleitungen bereitstellen

4. Rückführung ermöglichen

- B2B-Marktplätze für Produktionsabfälle und EoL-Produkte rechtlich und technisch absichern
- Einheitliche Standards für Materialdefinition, Qualität und Nachhaltigkeit etablieren

5. Recycling ausbauen

- Entwicklung und Etablierung von einfachen und praktikablen Systemen für die Sortierung von Produktionsabfällen
- Verlässliche Zertifizierungen für recycelte Werkstoffe etablieren
- Forschung und Infrastruktur für Recyclingverfahren europaweit stärken um Sekundärrohstoffe wirtschaftlich und ökologisch wirksam zu nutzen

6. Datennutzung fördern

- Digitaler Produktpass als zentrales Instrument für CO₂-, Energie- und Materialtransparenz nutzen
- Einheitliche Datenformate und Berechnungsmethoden definieren
- Praxistaugliche Umsetzung sicherstellen, besonders für KMU

Zielsetzung des Positionspapiers

Das Positionspapier fasst die im Arbeitskreis gemeinsam von Unternehmen und Organisationen erarbeiteten Positionen zu aktuellen Trends im Bereich Nachhaltige Elektronik zusammen.

Es hat zum Ziel, einerseits über diese Entwicklungen zu informieren und andererseits konkrete Vorschläge für Lösungsansätze und Maßnahmen bereitzustellen, mit denen Unternehmen und Organisationen aus der Halbleiter- und Elektronikbranche die Themen gezielt adressieren können.

Das Positionspapier soll auch der Forschung wichtige Impulse geben, welche Trends für die Industrie von Bedeutung sind. Daraus lassen sich potenzielle Ansatzpunkte für Kooperationen sowie Möglichkeiten zum Wissenstransfer ableiten.

Das Positionspapier soll zudem als Unterstützung für die Politik auf europäischer Ebene dienen und Informationen für mögliche Weichenstellung in Bezug auf Nachhaltige Elektronik bieten.

Beschreibung des Prozesses

Das durch die Teilnehmenden festgelegte Ziel des Arbeitskreises Nachhaltige Elektronik war es ein Positionspapier zu erarbeiten, das sich mit aktuellen Herausforderungen und Lösungen für die Halbleiter- und Elektronik-Branche in Bayern und darüber hinaus zum Thema Nachhaltige Elektronik beschäftigt.

Im Jahr 2024 wurde durch den Arbeitskreis das Thema Nachhaltige Elektronik in folgenden Schritten bearbeitet:

- Identifizieren der spezifischen Anwendungsfälle für das Thema Nachhaltige Elektronik
- Formulierung der Herausforderungen für die aktuelle Situation
- Erarbeiten von Lösungsansätzen
- Entwicklung von positiven Zukunftsszenarien
- Skizzieren von Maßnahmen

Auf der Grundlage dieser, von den Teilnehmenden erarbeiteten Inhalte, wurde dieses Positionspapier erstellt.

Abbildung 1: Aufbau anhand des Lebenszyklus



Aufbau

Das Positionspapier deckt vielfältige Themen der gesamten Halbleiter-Wertschöpfungskette ab, vom Design, über Produktion bis hin zu den Endanwendern, dem Handel mit Produktionsabfällen und „End of Life“-Produkten zu Recycling und den allumfassenden Potenzialen der Datennutzung für die Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 1).

Durch die Themen des Positionspapiers wird auch das Netzwerk der Bavarian Chips Alliance widergespiegelt, da die Bavarian Chips Alliance mit ihren Partnern ebenfalls die gesamte Halbleiter-Wertschöpfungskette bis hin zur Elektronik und spezifischen Anwendungen abdeckt und somit auch die relevanten Themen ihrer Partner adressiert.

Definition Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit in der Elektronik- und Halbleiterbranche beschreibt im Kontext dieses Positionspapiers einen ganzheitlichen Ansatz zur Gestaltung von Produkten, Prozessen und Geschäftsmodellen mit dem Ziel, ökologische Belastungen zu minimieren, wirtschaftliche Resilienz zu stärken und gesellschaftliche Verantwortung zu übernehmen – über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg.

Dabei beginnt Nachhaltigkeit bereits im Design, das Wiederverwendung, Reparatur und Recyclingfähigkeit systematisch berücksichtigt. In der Produktion geht es um Ressourceneffizienz, Energieeinsparung und die Verwendung nachhaltiger Materialien – idealerweise in regionalen und möglichst emissionsarmen Wertschöpfungsketten.

Nutzung und Rückführung sind so zu gestalten, dass Produkte länger verwendet, einfacher repariert und gezielt in zirkuläre Prozesse rückgeführt werden können.

Inhalt

1. Design.....	1
1.1 Design for Reuse	1
1.2 Design for Recycle	3
2. Produktion	4
3. Endanwenderprodukte.....	6
4. Rückführung.....	8
5. Recycling	10
5.1 Lotmaterial.....	10
5.2 Kunststoffe	11
5.3 Stoff- und Modultrennung bei bestückten Leiterplatten	13
6. Potenziale der Datennutzung für die Nachhaltigkeit	14
Autorinnen & Autoren	16



1. Design

Es ist essenziell bereits in der Designphase eines Produkts das Thema Nachhaltige Elektronik mit aufzugreifen und entsprechende Recycling-Strategien für das Ende des Lebenszyklus zu entwickeln und festzulegen. Hierbei werden in diesem Positionspapier insbesondere „Design for Reuse“ und „Design for Recycle“ im industriellen Kontext behandelt.

„Design for Repair“ wird in Bezug auf Endanwendergeräte im Abschnitt 3 „Endanwenderprodukte“ erläutert. Dies ergibt sich daraus, dass man bei der Thematik Reparatur stark zwischen Konsumelektronik und Industrieelektronik unterscheiden muss. Bei hochwertiger Industrieelektronik ist die Reparatur aus Kostengründen und Gründen der Verfügbarkeit zwingend erforderlich. Wohingegen es bei Konsumelektronik noch größere Potenziale für die Nutzung von Reparatur gibt.

Vor den speziellen Herausforderungen und Lösungsansätzen der unterschiedlichen Design-Ansätze soll noch auf Aspekte verwiesen werden, die allgemein für das Design im Sinne der Nachhaltigkeit essenziell sind.

Das nachhaltige Design sollte auf die zentralen Prinzipien Suffizienz, Konsistenz und Energieeffizienz beruhen und dabei die regulatorischen Anforderungen, wie zum Beispiel die Ökodesign-Verordnung, berücksichtigen.

1.1. Design for Reuse

Herausforderungen

Ein zentraler Aspekt nachhaltiger Elektronik ist das Konzept „Design for Reuse“. Derzeit liegt der Fokus beim Recycling elektronischer Bauteile fast ausschließlich auf der Materialrückgewinnung – eine direkte Wiederverwendung einzelner Komponenten findet kaum oder gar nicht statt.

Eine der größten Herausforderungen in diesem Bereich ist das Fehlen allgemein zugänglicher Daten und Untersuchungen zur Lebensdauer von Halbleiterbauelementen. Es gibt keine standardisierten Merkmale oder Klassifizierungen, die den „erreichten Lebenszyklus“ eines Bauteils bewerten. Dies wird anhand eines konkreten Beispiels deutlich:

Wie lange kann ein Mikroprozessor zuverlässig innerhalb seiner Spezifikationen betrieben werden? Für eine spätere Wiederverwendung – etwa in der Unterhaltungsindustrie – existieren bislang kaum Konzepte. Zudem stellen sich essenzielle Fragen, die für die Qualität und Sicherheit der Wiederverwendung entscheidend sind:

- Wie lange war der Mikroprozessor in Betrieb?
- Unter welchen Bedingungen wurde er benutzt?
- Gibt es Vorschädigungen durch Überlast?
- Für Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen:
Ist ein Entlöten und wieder Einlöten akzeptabel?

Zum Zeitpunkt einer potenziellen Wiederverwendung ist der tatsächliche Zustand eines Integrierten Schaltkreises (IC, Integrated Circuit) daher oft unbekannt.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario ist die Wiederverwendbarkeit langlebiger Bauelemente und ICs sichergestellt. Hersteller unterstützen diesen Prozess durch spezielle Funktionen und Labels, die den Zustand und die verbleibende Lebensdauer von Bauteilen transparent machen.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Verzicht auf Vergussmassen im Design um eine spätere Demontage zu erleichtern
- Implementierung von Monitoring-Funktionen in ICs:
 - Integrierte Diagnosefunktionen im Schaltungsdesign
 - Testmöglichkeiten für erneute Funktionsprüfungen bei Elektronikfertigern (EMS, Electronics Manufacturing Services)
 - Herstellerangaben zu Einsatzszenarien und maximaler Nutzungsdauer
- Etablierung von Konzepten zur Wiederverwendung ganzer bestückter Leiterplatten
- Verbesserung der Transparenz über den Lebenszyklus von Produkten, um die Nachverfolgbarkeit und Wiederverwendung zu fördern
- Übertragung bestehender Standards aus anderen Industrien auf ICs

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich vorrangig an Unternehmen der Halbleiter- und Elektronikbranche sowie an die relevanten Industrieverbände, die Standards und Rahmenbedingungen für nachhaltige Wiederverwendung etablieren können.

1.2. Design for Recycle

Herausforderungen

Die Umsetzung von „Design for Recycle“ steht derzeit vor mehreren Herausforderungen. Insbesondere herrscht Unsicherheit darüber, welche Materialien, Gehäusetechnologien („Packages“) und insbesondere Polymere sich am besten für eine spätere stoffliche Trennung eignen. Die Wahl der Komponenten beeinflusst dabei maßgeblich die Anforderungen an das recyclinggerechte Design. Fehlende Standardisierung und unklare Rahmenbedingungen erschweren eine gezielte Optimierung für das Recycling.

Zukunftsszenario

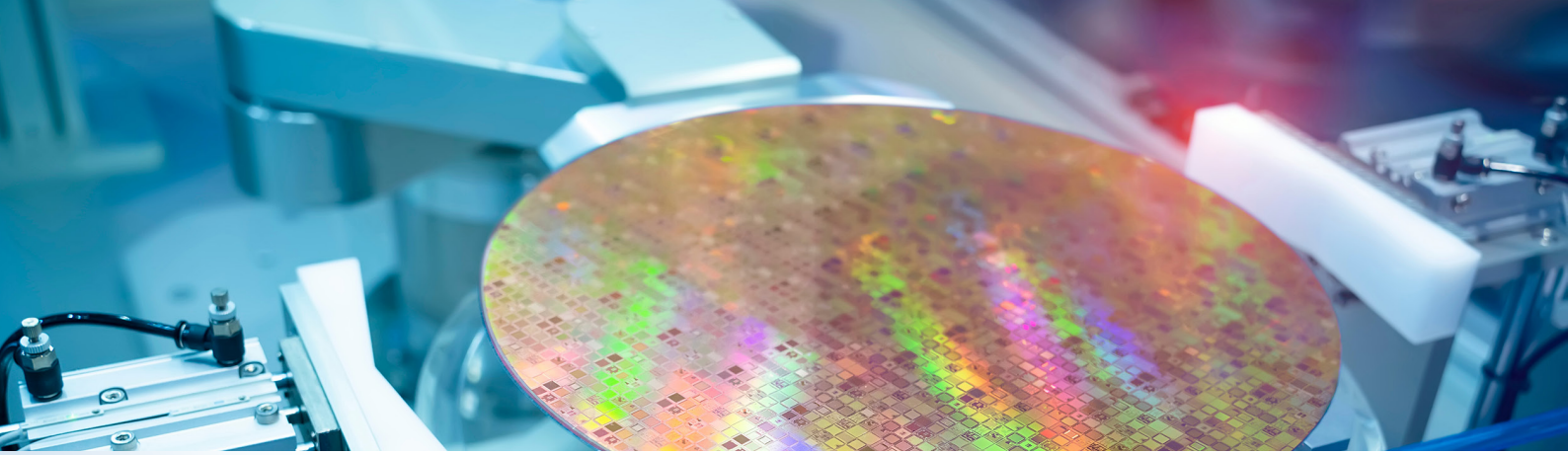
In einem positiven Zukunftsszenario existiert eine begrenzte, aber gut definierte Anzahl etablierter Recyclingprozesse, deren Vorteile und Randbedingungen klar dokumentiert sind. Entwickler und Hersteller von Elektronikbaugruppen können sich auf die langfristige Verfügbarkeit dieser Prozesse verlassen und dadurch ein effektives „Design for Recycling“ umsetzen. Dabei wird auch ein besonderes Augenmerk auf die passenden Materialien im Design gelegt und der Product Carbon Footprint wird als Hebel genutzt um das Design im Sinne der Nachhaltigkeit zu verbessern.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Förderung von Konsortien der gesamten Wertschöpfungskette zur besseren Verständigung und Zusammenarbeit:
 - IC-Design
 - IDMs (Integrated Device Manufacturer)
 - Baugruppenhersteller und EMS
 - Recyclingunternehmen
 - Anlagenbauer für Recyclingprozesse
- Einbindung von Recyclern direkt bei der Designplanung

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich an Industrieverbände sowie an die betroffenen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette, die für eine effektive Zusammenarbeit im Bereich des recyclinggerechten Designs erforderlich sind.



2. Produktion

Ein wichtiger Ansatzpunkt für Nachhaltige Elektronik ist die Verbesserung der Produktion von Halbleiter- und Elektronikprodukten im Sinne der Nachhaltigkeit. Davon lassen sich jedoch auch Aspekte für die Produktion von industriellen Anlagen ableiten, welche aber hier nicht im Fokus stehen.

Herausforderungen

Die Produktion von Halbleitern und Elektronikkomponenten ist derzeit mit erheblichen Herausforderungen in Bezug auf Nachhaltigkeit verbunden. Viele Prozesse in der Chipfertigung sind ressourcenintensiv und verbrauchen beispielsweise große Mengen an Wasser. Zwar gibt es bereits Verbesserungen durch kleinere Projekte in einzelnen Produktionsstätten verschiedener Hersteller, jedoch werden diese nicht immer in größerem Maßstab in der Branche skaliert.

Eine weitere Herausforderung stellt die globale Lieferkette dar. Der Transport von Rohstoffen und Bauteilen über weite Strecken führt zu einem hohen Carbon Footprint. Gleichzeitig variiert der Anteil an erneuerbaren Energien, die für die Produktion genutzt werden, je nach Standort erheblich. In Regionen mit einem hohen Anteil fossiler Energiequellen ist die Umweltbelastung durch die Halbleiterproduktion entsprechend größer.

Des Weiteren sollte auch der Rebound-Effekt beachtet werden, das heißt, wenn durch Effizienzsteigerungen Kosten oder Energie in der Produktion oder im gesamten Lebenszyklus gesenkt werden, dass die Einsparungen durch erhöhten Konsum oder gesteigerte Produktion aufgehoben werden.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario gelingt es der Halbleiter- und Elektronikindustrie, den Carbon Footprint sowie den Ressourcenverbrauch in der Produktion durch neue Prozesse und technologische Innovationen deutlich zu senken. Nachhaltigkeitsmaßnahmen werden nicht nur punktuell, sondern industrieübergreifend skaliert und tragen dazu bei, die gesamte Wertschöpfungskette umweltfreundlicher zu gestalten.



Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Industrieübergreifende Zusammenarbeit: Einrichtung von Arbeitskreisen um Lösungen für mehr Nachhaltigkeit in der Produktion zu skalieren.
- Forschung und Umsetzung von Optimierungspotenzialen im Bereich der nachhaltigen Produktion:
 - Entwicklung und Einsatz von nachhaltigeren Chemikalien und Materialien
 - Materialeinsparungen
 - Optimierung der Abgasreinigungssysteme
 - Substitution von klimawirksamen und toxischen Gasen
 - Wiederverwendung von Materialien innerhalb der Produktion („Slurry“, ultra-reines Wasser, ...)
 - Einsatz von ressourcenschonenderer Beschichtung, insbesondere beim Prozessieren von Photolack
- Lokalisierung der Produktion: Aufbau und Ausbau von Produktionsprozessen in der Europäischen Union um Transportwege zu verkürzen und Emissionen zu reduzieren.
- Förderung von nachhaltigen Innovationen im Bereich Produktion
- Einsatz erneuerbarer Energien: Nutzung grüner Energiequellen für die Produktionsprozesse, beispielsweise durch klimaneutrale Reinnräume.
- Einbindung von additiven Prozessen, zum Beispiel als Ersatz für subtraktive Prozessketten, womit durch weniger Materialeinsatz Abfall eingespart werden kann.

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich an verschiedene Akteure entlang der Wertschöpfungskette sowie Forschung und Politik, darunter:

- Industrie/Original Equipment Manufacturer (OEMs)
- Recyclingfirmen
- Chemiehersteller
- Tool-/Equipment-Hersteller (Energiemanagement, Tool-Herstellung/Konzeption)
- Forschung an Instituten und Hochschulen
- EU-Gremien/EU-Politik



3. Endanwenderprodukte

Bei den Endanwenderprodukten ist ein wichtiger Anwendungsfall für die Nachhaltige Elektronik die Reparaturfähigkeit eines Geräts, welche im folgenden Abschnitt behandelt wird.

Hierbei wird auch das Thema „Design for Repair“ aufgegriffen, welches nicht im Abschnitt 1 behandelt wurde, da dort der industrielle Kontext im Vordergrund stand und sich in diesem Positionspapier auf die Reparatur von Konsumelektronik fokussiert wird.

Herausforderungen

In der aktuellen Situation bestehen jedoch erhebliche Hürden, die eine langfristige Nutzung und Wiederinstandsetzung von Geräten erschweren. Häufig verhindert das Produktdesign eine einfache Reparatur oder macht sie sogar unmöglich. Selbst wenn eine Reparatur technisch möglich wäre, fehlen den Endanwendern oft die notwendigen Werkzeuge oder Materialien, da entsprechende Reparatur-Kits von den Herstellern nicht zur Verfügung gestellt werden.

Darüber hinaus ist das Wissen über Reparaturmöglichkeiten in der breiten Bevölkerung begrenzt. Viele Nutzer wissen nicht, wie sie Defekte selbst beheben können, oder sind auf spezialisierte Dienstleister angewiesen, die jedoch je nach Gerätetyp nur in begrenztem Umfang verfügbar sind. Eine weitere entscheidende Hürde stellt die finanzielle Abwägung dar: In vielen Fällen erscheint oder ist eine Reparatur kostspieliger als ein Neukauf, was dazu führt, dass sich Verbraucher für den Ersatz anstatt für die Instandsetzung entscheiden. Wobei jedoch bei der Reparaturabwägungen nicht der Wert des Produkts bzw. der Neubeschaffungspreis im Vordergrund stehen sollte, sondern die Vermeidung von Elektronikschrott.

Zusätzlich fehlt es Unternehmen häufig an wirtschaftlichen Anreizen, ihre Produkte reparaturfreundlich zu gestalten. Die Marktdynamik begünstigt bislang eher den Verkauf neuer Geräte als die Unterstützung von Reparaturlösungen. Dies führt dazu, dass defekte Elektronikprodukte in großem Umfang entsorgt werden, obwohl eine Reparatur prinzipiell möglich wäre.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario haben Endanwender durch nachhaltiges Produktdesign keine Nachteile in Bezug auf Funktionalität oder Benutzerfreundlichkeit. Unternehmen setzen ESGRC-Prinzipien (Environmental, Social, Governance, Risk & Compliance) konsequent um, sodass die Reparaturfähigkeit von Geräten verbessert wird. Die gesamten Lebenszykluskosten (ökonomisch, ökologisch und sozial) sind im Verbraucherpreis berücksichtigt, was eine faire Vergleichbarkeit und einen fairen Wettbewerb ermöglicht. Dabei ist eine Reparaturkultur entstanden und ein Bewusstsein, dass Elektronikprodukte wertvolle Ressourcen darstellen, welche teilweise auch mit hohem Arbeits- und Energieeinsatz gefertigt wurden.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Modulares Design: Geräte werden so konstruiert, dass einzelne Module leicht getrennt und ersetzt werden können.
- Reparaturanleitungen: Hersteller liefern standardisierte Reparaturanleitungen direkt mit ihren Produkten aus.
- Kennzeichnung von Komponenten: Einheitliche Markierungen (z. B. Barcodes, QR-Codes oder chemische Codes) erleichtern die Identifikation und den Austausch von Bauteilen.
- Technologiegestützte Reparatur: Zukunftsweisende Lösungen wie Augmented-Reality-Brillen könnten die Reparatur unterstützen und vereinfachen.
- Lebenszykluskosten werden im Verbraucherpreis berücksichtigt um Reparaturen wirtschaftlich attraktiver zu machen.
- Reparatur-Boni oder höhere Kosten für die Entsorgung: Finanzielle Anreize motivieren Verbraucher zur Reparatur anstelle eines Neukaufs, sofern die gesetzgebende Ebene zugleich die Finanzierung bereitstellt
- Transparenz für Endverbraucher: Reparatur-Gütesiegel mit einer Kennzeichnung der Reparierbarkeit – ähnlich der verpflichtenden Energieverbrauchs-Kennzeichnung von Haushaltsgeräten
- Gesetzliche Vorgaben zur Mindest-Reparierbarkeit elektronischer Bauteile stellen sicher, dass alle Marktteilnehmer gleichermaßen in die Pflicht genommen werden.
- ESGRC-Anforderungen werden mit verbindlichen Zertifizierungen für verantwortliche Akteure verknüpft.
- Hersteller stellen Dokumentationen zu Hardware und Software nach einer angemessenen Zeitspanne nach Produktionsende zur Verfügung – insbesondere im Falle einer Insolvenz.

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich insbesondere an die Politik auf europäischer Ebene, die entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen schaffen muss. Gleichzeitig sind Industrieverbände wie VDA und VDI gefordert, gemeinsame Normen für eine verbesserte Reparaturfähigkeit zu entwickeln.



4. Rückführung

Ein weiterer Anwendungsfall für Nachhaltige Elektronik ist der Handel von Produktionsabfällen und „End of Life (EoL)“-Produkten über spezialisierte B2B-Marktplätze für die Rückführung von Produkten und Materialien in den Kreislauf. Diese Plattformen ermöglichen es Unternehmen, Abfallmaterialien, die in anderen Produktionsprozessen wiederverwendet werden können, wirtschaftlich sinnvoll zu verwerten und somit Ressourcen zu schonen. Dabei stellen diese Plattformen die Verbindung zwischen Anbietern und Abnehmern her.

Herausforderungen

Obwohl es bereits eine Vielzahl kleinerer Plattformen gibt, sind einige zentrale Herausforderungen noch ungelöst. Es fehlt an einheitlichen Standards für die Plattformen, was die Suche nach spezifischen Rohstoffen erschwert – selbst innerhalb einzelner Marktplätze. Ein weiteres Problem ist die Qualitätsbewertung von Produktionsabfällen oder EoL-Produkten, da klare Kriterien häufig fehlen.

Hinzu kommen logistische Schwierigkeiten: Lange Transportwege und ein hoher Platzbedarf für die Lagerung stellen Unternehmen vor erhebliche Herausforderungen. Besonders bei internationalen Handelsbeziehungen können Sprachbarrieren sowie unterschiedliche Materialdefinitionen und Begriffsverständnisse die Nutzung der Plattformen erschweren. Zusätzlich müssen Matchmaking-Algorithmen verbessert werden um eine effiziente und bedarfsgerechte Vermittlung zwischen Anbietern und Abnehmern zu gewährleisten. Schließlich erfordert die erfolgreiche Implementierung solcher Marktplätze eine Veränderung etablierter Beschaffungsketten, was aktuell auch die Skalierung solcher Lösungen beschränkt.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario werden Produktionsabfälle und EoL-Produkte durch B2B-Marktplätze wieder in den Umlauf gebracht. Bei Unternehmen sind diese Plattformen als transparente und verlässliche Einkaufskanäle anerkannt, in denen Qualität und Herkunft der angebotenen Materialien klar ersichtlich sind. Durch die Integration von Systemen, wie dem digitalen Produktpass, wird die Rückverfolgbarkeit von Produktionsabfällen und EoL-Produkten erleichtert, was Vertrauen in den Sekundärrohstoffmarkt schafft. Darüber hinaus bieten die Marktplätze eine hohe Verfügbarkeit an Materialien, sodass Unternehmen jederzeit auf die benötigten Rohstoffe zugreifen können.

A faint, stylized lightbulb icon with rays emanating from it, positioned in the upper left corner of the page.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Entwicklung eines einheitlichen Nachhaltigkeitsbewertungs-Index für Marktplätze, der auch Logistik- und Transportwege berücksichtigt.
- Möglichkeit zur Bestellung von Materialmustern vor dem Kauf, um Qualität und Eignung zu prüfen.
- Bereitstellung detaillierter technischer Spezifikationen der angebotenen Materialien zur besseren Vergleichbarkeit.
- Festlegung von Standards für Reinheit und Qualität von recycelten Materialien um deren Verwendbarkeit sicherzustellen.
- Einsatz von Automatisierung und Künstlicher Intelligenz (KI) zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion
- Entwicklung branchenspezifischer Marktplätze, um gezielt auf die Bedürfnisse einzelner Industriezweige einzugehen.

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich insbesondere an Industrieverbände zur Etablierung einheitlicher Standards sowie an die Politik auf europäischer Ebene um regulatorische Rahmenbedingungen zu schaffen.



5. Recycling

Das Recycling in der Halbleiter- und Elektronikbranche hat verschiedenste Materialien und Stoffe zu berücksichtigen, unter anderem:

- Metalle
- Legierungen
- Polymere
- Kompositmaterialien (Displays, „Printed Circuit Board“ (PCB),...)
- Glas
- ...

In diesem Positionspapier wird sich jedoch auf wenige Materialien und Anwendungsfälle von Recycling fokussiert. Zuvor sind jedoch noch die allgemeinen Voraussetzungen für Recycling zu klären, die in diesem Abschnitt angenommen werden:

- Spezifikation der Materialien
- Logistik für Materialsorten
- ggf. veränderte Prozesse (nicht einfach Primär- durch Sekundärmaterial ersetzen, sondern veränderte Prozesse erforschen, die die Vorteile von Sekundärstoffen nutzen)

Zusätzlich ist zu beachten, dass einige Stoffe im Altmaterial noch erlaubt waren, aber in Neumaterial nicht mehr, d.h. es braucht Ideen, wie man diese problematischen Stoffe herauslöst und das möglichst mit wenig Aufwand (z. B. Blei, gewisse Flammhemmer, Stabilisatoren, ...).

5.1. Lotmaterial

Ein Anwendungsfall von Recycling für Nachhaltige Elektronik ist der Einsatz von Lotmaterial mit recycelten Bestandteilen.

Herausforderungen

Metalle aus bereits verwendetem Lot können zurückgewonnen und zur Herstellung neuen Lötmaterials genutzt werden, das wiederum mit hoher Zuverlässigkeit eingesetzt werden kann. Allerdings mangelt es entlang der gesamten Prozesskette noch an Bewusstsein für diese Möglichkeit sowie an einer breiten Akzeptanz des Einsatzes von recyceltem Lot.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario sind die Prozesse der Materialsammlung und -unterscheidung entschieden verbessert und werden durch den digitalen Produktpass unterstützt. Ein geschlossener Materialkreislauf für Metalle ist etabliert, wodurch der Einsatz von Primärrohstoffen signifikant reduziert wird.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Entwicklung von Systemen/Prozessen zur einfachen und praktikablen Sortierung von Lötmittel-Abfällen für alle Nutzenden (Endnutzer, Hersteller, Recycler, ...) mit maximalem Output
- Nach Etablierung der Systeme/Prozesse: Weiterbildungsmaßnahmen zur sachgemäßen Sortierung von Lötmittel-Abfällen um die Wiederaufbereitung zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen.
- Sensibilisierung durch Fachverbände: Förderung des Bewusstseins für Nachhaltigkeit und Recycling in der Elektronikindustrie.
- Aus- und Weiterbildung: Ausbau von Qualifizierungsangeboten für Fachkräfte um das Wissen über recyceltes Lotmaterial in der Industrie zu verankern.
- Wissenschaftliche Expertise nutzen: Bündelung von Fachwissen aus Forschung und Praxis mit möglicher finanzieller Förderung durch die Politik um innovative Recyclingprozesse zu entwickeln.

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich insbesondere an die relevanten Fachverbände, wie den ZVEI und FED.

5.2. Kunststoffe

Ein weiterer Anwendungsfall für Recycling ist die Nutzung von recyceltem Plastik in der Halbleiter- und Elektronikindustrie. Dies betrifft sowohl Kunststoffe, die während der Herstellung von Chips in verschiedenen Prozessschritten verwendet werden, als auch den Einsatz von Kunststoffen bei Leiterplatten.

Herausforderungen

Obwohl viele Kunststoffe grundsätzlich gut recycelbar sind, bestehen weiterhin erhebliche Herausforderungen. Das Recycling von Polymeren ist anspruchsvoll, da Monomereinheiten nicht genauso recycelt werden können, wie beispielsweise Metallatome aus Metallen. Forschung im Bereich "nachhaltige Polymere" ist bereits vorhanden, aktuell fehlt aber oft der Sprung von der Forschung in die Anwendung (Beispiele sind: Naturfasern und Polylactide für Leiterplatten, Leaftronics, Myceliotronics, ...). Eine

weitere zentrale Schwierigkeit ist, dass Kunststoffe mit recycelten Bestandteilen oft nicht alle regulatorischen Vorgaben oder spezifische Kundenanforderungen erfüllen. Zudem müssen auch die Kosten der Herstellung von recyceltem Kunststoff gegenüber herkömmlichen Kunststoffen abgewogen werden und die Kosten durch die nötige Rezertifizierung von Kunststoffen bei Rücknahmeprogrammen ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Zukunftsszenario

Das angestrebte, positive Zukunftsszenario beinhaltet verbesserte Recyclingverfahren, standardisierte Verfahren zur Materialcharakterisierung und einen verstärkten Einsatz von recycelten Materialien auf Polymerbasis in der Halbleiter- und Elektronikindustrie. Es sind zudem geschlossene Materialkreisläufe für Kunststoffe umgesetzt. In drei Jahren zählen eine begrenzte Anzahl von gut funktionierenden Recyclingprozessen zum Standard und man kennt deren Vorteile und Randbedingungen. Es ist außerdem eine begrenzte Anzahl von für das Recycling geeigneten Materialien in ausreichender Menge und Qualität verfügbar, die gleichzeitig die Anforderungen an die Baugruppen erfüllen.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Förderung des Wissensaustauschs über heute mögliche Methoden und Prozesse im Kunststoffrecycling, wie mechanisches und chemisches Recycling sowie Massenbilanzierung.
- Strengere Nachweispflichten für recycelten Kunststoff um Transparenz und Vertrauen in die Materialqualität zu schaffen.
- Anpassung von Zertifizierungs- und Kundenanforderungen, wenn recycelte Kunststoffe nachweislich die gleiche Qualität wie Neuware bieten.
- Enge Zusammenarbeit mit Kunden aus der Halbleiter- und Elektronikbranche sowie anderen Industriezweigen zu dem Thema recycelter Kunststoff.
- Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten für eine Reduktion des Carbon-Footprints und für eine leichtere Zusammenarbeit vom Hersteller bis zum Recycler
- Ausbau und Etablierung von Rücknahmeprogrammen für Kunststoffe aus Elektronikprodukten.
- Intensivere Kooperation zwischen Halbleiter- und Elektronikunternehmen sowie Recyclingbetrieben.
- Aufbau effizienter Reverse-Logistik-Netzwerke um die Sammlung und Wiederverwertung gebrauchter Kunststoffe zu erleichtern.

Adressaten

Diese Maßnahmen richten sich insbesondere an Kunden aus der Automatisierungstechnik, an Entwicklungsabteilungen von Modulherstellern sowie an Distributoren, die sich mit dem „Product Life Cycle (PLC)“-Management befassen. Zudem können nur auf europäischer Ebene, z. B. EU-Kommission, die passenden Rahmenbedingungen geschaffen werden.

5.3. Stoff- und Modultrennung bei bestückten Leiterplatten

Ein Anwendungsfall für Nachhaltige Elektronik ist die Stoff- und Modultrennung am Lebensdauerende von bestückten Leiterplatten (PCBA, Printed Circuit Board Assembly).

Herausforderungen

Die stoffliche Trennung von PCBA-Komponenten stellt aktuell eine große Herausforderung dar. Verklebte Baugruppen erschweren die mechanische Trennung von der Leiterplatte, während die Entkopplung von Bonddrähten, Chips und Lotmaterial ebenfalls herausfordernd sein können. Zusätzlich erschweren Vergussmaterialien wie Silikone den Recyclingprozess. Der Aufwand der Trennung ist zudem für kleine Baugruppen besonders hoch und die Kosten für die Trennung müssen einkalkuliert werden. Zusätzlich stellt sich die Frage in welchem Land das Recycling durchgeführt werden soll, da sich das Produkt am Ende des Lebenszyklus nicht notwendigerweise im Herstellungsland befindet bzw. auch nicht zwangsläufig an eine offizielle Rücknahmestelle zurückgegeben wird, die ggf. das Produktdatenblatt besitzt.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario ist die Stoff- und Modultrennung am Lebensdauerende von bestückten Leiterplatten standardisiert und wird bei allen rentablen Anwendungsfällen eingesetzt.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Entwicklung und Etablierung von Industriestandards zur Materialklassifizierung von Recyclingmaterialien.
- Festlegung von stofftrennenden, energiesparenden Recyclingtechnologien, die sicher am Ende des Lebenszyklus stehen.
- Kryogene Recyclingprozesse auf Elektronik-Produkte anwenden.
- Reduktion der Materialvielfalt innerhalb von Baugruppen um Trennprozesse zu erleichtern.
- Einsatz von Recyclingprozessen mit hoher Toleranz gegenüber Vergussmaterialien.
- Recycling in der EU: Stärkere Nutzung und Forschung zu Recyclingprozessen für Rohstoffe innerhalb Europas um Abhängigkeiten zu verringern und Kreislaufwirtschaft zu fördern als auch wirtschaftliche Anreize zur Nutzung von Rezyklaten zu schaffen.

Adressaten

Bei den Maßnahmen werden die entsprechenden Fachverbände adressiert, insbesondere der ZVEI und FED.



6. Potenziale der Datennutzung für die Nachhaltigkeit

Ein Anwendungsfall für Nachhaltige Elektronik stellt der Digitale Produktpass (DPP) dar. Er schafft eine einheitliche Datengrundlage um wesentliche Nachhaltigkeitsthemen voranzutreiben – von einer effizienteren Ressourcennutzung über die Kreislaufwirtschaft bis hin zur Berechnung des Carbon Footprints. In diesem Abschnitt sollen die Potenziale der Datennutzung für das Thema Nachhaltige Elektronik erörtert werden, indem man zum Beispiel die Chancen des DPP und der Datenräume nutzt, ohne die Unternehmen darüber hinaus mit weiterer Regulatorik zu belasten.

Herausforderungen

Die aktuelle Situation ist geprägt davon, dass eine entsprechende benötigte Datengrundlage in vielen (kleineren) Unternehmen kaum oder gar nicht vorhanden ist. Jedoch werden viele dieser Daten in den kommenden Jahren über die EU-Regulatorik eingefordert werden, wodurch es insbesondere jetzt wichtig ist für Unternehmen sich mit diesem Thema zu beschäftigen.

Dabei müssen auch verschiedenste Fragen geklärt werden, zum Beispiel, welche Daten muss oder möchte ich an Dritte weitergeben. Für den angesprochenen Datenaustausch befinden sich für die unterschiedlichen Industrien in Deutschland sogenannte Datenräume im Aufbau. Für die Halbleiter-Branche wird dies durch das Förderprojekt Semiconductor-X übernommen, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des Förderprogramms Manufacturing-X mit EU-Mitteln finanziert wird. Hierbei muss durch entsprechende transparente Aufklärung über die Funktionsweise und Mehrwerte das benötigte Vertrauen in Datenräume geschaffen werden.

Aktuell ist es eine weitere Herausforderung, dass zur Verfügung stehende Datenbanken sehr unterschiedlich aufgebaut sind und Verbrauchsangaben für Unternehmen nicht immer einfach bezifferbar sind. Hinzu kommt das Fehlen von gesetzlichen Standards zur Ermittlung von vergleichbaren Verbräuchen bei ähnlichen Maschinentypen.

Eine Vergleichbarkeit bei Materialdeklarationen ist aktuell auch schwierig, da diese keinem vom Gesetzgeber vorgegebenen Standard folgen. Dabei stellt eine vollständige Materialdeklaration die Voraussetzung für zum Beispiel Recycling und die Berechnung des Carbon-Footprints dar.

Der digitale Produktpass bietet die Möglichkeit, alle für das Produkt relevanten Informationen zu bündeln, wobei zu klären wäre, welche Daten konkret erforderlich sind und es muss verhindert werden,

dass der Aufwand zur Erfassung zu groß wird. In enger Abstimmung mit der Industrie müssen Wege gefunden werden, so dass Unternehmen, insbesondere KMU, nicht überfordert werden.

Zukunftsszenario

In einem positiven Zukunftsszenario führen die positiven Lösungsansätze zu einem einheitlichen Digitalen Produktpass, der gesetzlich durch Normen definiert ist und folgende Themen abdeckt:

- Material Compliance
- Umwelt, Gesundheit und Sicherheit (EHS, Environment, Health and Safety)
- Energieverbrauchstabelle
- Recyclinganweisung
- Reparaturanweisung
- „Footprints“ (CO₂, Wasser, ...)
- Sicherheitsdatenblatt (SDS, Safety Data Sheet)

Innerhalb dieses positiven Zukunftsszenario ist ein gerechtfertigtes Vertrauen in die Datensicherheit des digitalen Produktpasses erreicht, zum Beispiel durch Verschlüsselung und Anonymisierung. Der Energieverbrauch für Anwendungen in der Industrie ist bekannt, was unter anderem als Grundlage dient zur Berechnung des Carbon-Footprints. Die Vergleichbarkeit der Daten ist durch einheitliche Formeln/ Normen mit hinterlegten Berechnungsmethoden gegeben.

Dies wird durch folgende Lösungsansätze und Maßnahmen unterstützt:

- Anforderungen der potenziellen Nutzer sammeln und verstehen.
- Vergleichsreferenzen schaffen: Standardisierte Referenzszenarien für den Vergleich von Maschinen und anderen Produkten entwickeln.
- Vergleichbarkeit durch Standards bei der Materialdeklaration.
- Alle Werte sollten nach einheitlichen Formeln/Normen berechnet werden, unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen der komplexen Produktionsprozesse in der Halbleiter- und Elektronikindustrie
- Hinterlegung der verwendeten Berechnungsmethoden
- Vorteile des DPP für Unternehmen erarbeiten / kommunizieren
- Erfolgreiche Konzepte adaptieren: Bestehende Lösungen – z. B. aus dem Batteriepass – auf Elektronik- und Halbleiterprodukte übertragen.
- Vernetzung mit Verbänden der Halbleiter- und Elektronikindustrie um den Inhalt des Produktpasses festzulegen, z. B. Einschließen weiterer Footprints in den DPP und exaktere Definition der Footprints (z. B. Carbon-Footprint für Cradle to Cradle (C2C) oder Carbon-Footprint für Cradle to Grave (C2G))
- Austausch fördern: Wissensaustausch mit Verbänden anderer Branchen zu dem DPP intensivieren.

Adressaten

Bei den Maßnahmen werden allgemein Industrieverbände adressiert und die Politik auf europäischer Ebene.

Autorinnen & Autoren

Die Inhalte des Positionspapiers wurden von 80 Unternehmen/Organisationen im Arbeitskreis Nachhaltige Elektronik der Bavarian Chips Alliance erarbeitet, unter anderem von:

- Dr. Alois Friedberger, **Airbus**
- Nivedita Mahida-Königsdörfer, **Bayerische Forschungsallianz (Bavarian Research Alliance) GmbH**
- Dr. Malte Kohring, Leiter des Arbeitskreises Nachhaltige Elektronik, **Bayern Innovativ GmbH**
- Bernhard Schreilechner, **Bionic Design - Natural Intelligence**
- Sabine Scherbaum, **Fraunhofer-Institut für Elektronische Mikrosysteme und Festkörper-Technologien EMFT**
- **Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB**
- **Graphite Materials GmbH**
- Lotta Adu, **Kompetenzzentrum "Green ICT @ FMD", Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland**
- Dr. Hans Walter, **Kompetenzzentrum "Green ICT @ FMD", Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland**
- Angelo Canzaniello, **Luminovo GmbH**
- **MTM Ruhrzinn GmbH**
- Dr. Haneen Daoud, **Neue Materialien Bayreuth GmbH**
- Dr. Susanne Mohr, **Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG**
- **Semikron Danfoss Elektronik GmbH & Co. KG**
- Prof. Dr. Johanna F. May, **Technische Hochschule Köln**
- Martin Krauß, **Zentrale Elektronik Brose Gruppe, Brose Fahrzeugteile SE & Co. Kommanditgesellschaft**



Bayern Innovativ ist die Innovationsagentur des Freistaats und führt im Auftrag mehrerer bayerischer Landesministerien, des Bundes und der EU vielfältige Projekte mit Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Verwaltung durch. Bei der Bavarian Chips Alliance unterstützt Bayern Innovativ das Wirtschaftsministerium bei der Gestaltung eines Halbleiter-Ecosystems für Bayern und koordiniert die hierfür durchzuführenden Aktivitäten.

LEITUNG

Jürgen Frickinger

FACHLICHE KOORDINATION

Dr. Malte Kohring

Lukas Zillich

ORGANISATION & KOMMUNIKATION

Jakob Hausruckinger

Valerie Woop

KONTAKT

halbleiter@bayern-innovativ.de

Impressum

© Bayern Innovativ GmbH

Stand: Mai 2025

HERAUSGEBER

Bayern Innovativ GmbH

Am Tullnaupark 8

90402 Nürnberg

+49 911 20671-0

info@bayern-innovativ.de

www.bayern-innovativ.de

GESCHÄFTSFÜHRER

Dr. Rainer Seßner

BILDNACHWEISE

iStock@pcess609

AdobeStock@weerapat1003

iStock@gorodenkoff

shutterstock@asharkyu

AdobeStock@bodnarphoto

AdobeStock@AlexGo

iStock@kckate16

AdobeStock@Fernando Cortés

iStock@kynny

Die Bayern Innovativ GmbH ist seit ihrer Gründung im Jahr 1995 wichtiger Bestandteil der Innovationspolitik des Freistaats Bayern. Vision der Gesellschaft ist ein Bayern, in dem jede tragfähige Idee und Technologie zur Innovation wird.

Neben der Organisation von Innovationsnetzwerken in den sieben Bereichen Digitalisierung, Energie & Bau, Gesundheit, Material & Produktion, Mobilität, Sicherheit sowie Kreativwirtschaft bietet Bayern Innovativ seinen Kundinnen und Kunden ein umfangreiches Beratungsangebot. Dieses umfasst Innovationsservices für ein erfolgreiches Technologie- und Innovationsmanagement, zum Patentwesen, zur Teilnahme an internationalen Innovations- und Kooperationsprojekten, als Projektträger mehrerer bayerischer Förderprogramme und zu Fragen rund um Gründung und Förderung.

Für einen optimalen Wissenstransfer organisiert Bayern Innovativ hochkarätige Kongresse, Arbeitskreise, Workshops, Coachings und weitere Events. Der „Gemeinschaftsstand Bayern Innovativ“ öffnet Unternehmen und Forschungseinrichtungen kostengünstig das Tor zu internationalen Leitmessen.

Im Fokus unserer Aktivitäten stehen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und Start-ups.

www.bayern-innovativ.de

www.bayern-innovativ.de/de/bavarian-chips-alliance

