

Operationalisierung eines kreislauffähigen Elektronikdesigns für Wertschöpfungssysteme

Kreislauffähigkeit im Elektronikdesign

A. Braun, G. Schullerus

ZUSAMMENFASSUNG Elektronikprodukte mit Materialverbunden, Rohstoffen und kurzen Innovationszyklen erschweren Kreisläufe. Der Beitrag operationalisiert Kreislauffähigkeit über Reparierbarkeit, Wiederverwendung, Rezyklierbarkeit, Langlebigkeit und Materialkritikalität. Ein regelbasierter Fuzzy-Ansatz übersetzt Ziele in Entscheidungen zu Modularität, Kondensatortechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik. Der Ansatz ist an die „Ecodesign for Sustainable Products Regulation“ mit digitalem Produktpass angebunden. Eine Nutzwertaggregation unterstützt Variantenwahl, zeigt Zielkonflikte und ist mit Felddaten kalibrierbar.

STICHWÖRTER

Kreislauffähiges Elektronikdesign, regelbasierte Fuzzy-Entscheidungsunterstützung, digitaler Produktpass

Circularity for electronics design

ABSTRACT Electronics with complex material compositions, critical raw materials, and short innovation cycles hinder closed loops. This article operationalizes circular economy through repairability, reusability, recyclability, durability and material criticality. A rule-based fuzzy approach assigns qualitative goals to decisions regarding modularity, capacitor technology, assembly, and connection and interfaces. It is in line with the “Ecodesign for Sustainable Products Regulation” and the digital product passport. An utility aggregation supports the selection of variants, highlights compromises and can be calibrated with field data.

1 Einleitung

Die Gestaltung resilienter und nachhaltiger Wertschöpfungssysteme setzt eine konsequente Integration von Kreislauffähigkeit in die Produktentwicklung voraus. Elektronische Geräte stellen eine kritische Produktkategorie dar, da sie durch komplexe Materialverbunde, den Einsatz kritischer Rohstoffe und kurze Innovationszyklen erhebliche Herausforderungen für geschlossene Stoffkreisläufe verursachen. Neue regulatorische Leitplanken wie Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) mit digitalem Produktpass (DPP), Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) und Restriction of Hazardous Substances (RoHS) sowie Normen wie IEC 62430 und die EN-4555x-Reihe verdichten die Erwartungen an kreislauffähiges Design in frühen Entwicklungsphasen.

Um die Zielgröße Circularity eines Elektronikentwurfs operationalisierbar zu machen, wird sie in diesem Beitrag in konkrete Entwurfsdimensionen überführt. Diese Dimensionen dienen als Bewertungsmaßstab für die Analyse von Designalternativen und erlauben eine differenzierte Abbildung von Zielkonflikten entlang des Produktlebenszyklus. Methodisch werden unscharfe Entwurfsziele und Designentscheidungen als Fuzzy-Mengen modelliert und über eine Regelbasis derart verknüpft, dass die Designentscheidungen mittels einer Regelbasis aus den Entwurfszielen abgeleitet werden können. Damit müssen nicht – wie beim morphologischen Kasten üblich – alle Varianten betrachtet sowie die bezogen auf ein Bewertungskriterium beste Variante ausgewählt

werden. Vielmehr entsteht der Entwurf durch die Anwendung von Regeln auf eine Menge qualitativ gegebener Entwurfsziele. Über diesen Vorteil hinaus können Produktvarianten verglichen und Ansatzpunkte für Abfallvermeidung, Ressourceneffizienz und die Verringerung von Treibhausgasemissionen sichtbar gemacht werden.

2 Kreislauffähigkeit im Elektronikdesign

Nachfolgend wird die Zielgröße Kreislauffähigkeit für das Elektronikdesign konkretisiert. Ausgangspunkt sind Funktionssicherheit, Normenkonformität und wirtschaftliche Vorgaben. Hinzu kommt die zusätzliche Anforderung, Kreislauffähigkeit als gleichrangiges Entwurfsziel mitzudenken, ohne die Funktion zu beeinträchtigen.

Dieser Beitrag betrachtet den Entwurfsprozess einer elektronischen Baugruppe ab der Erstellung des Schaltplans und geht davon aus, dass die dafür erforderlichen Schritte bereits erfolgt sind. Bei der Erstellung des Schaltplans und dem anschließenden Layout werden die zu verwendenden Module oder Baugruppen festgelegt, ebenso die Art der Aufbau- und Verbindungstechnik. Schließlich erfolgt die Festlegung der Verbindung der Baugruppe mit der Energieversorgung, der Anwendung und gegebenenfalls der Kundenschnittstelle. Auf dieser Basis präzisiert Kapitel 2.1 die Entwurfsdimensionen Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Rezyklierbarkeit, Langlebigkeit und Materialkritikalität nebst den zugehörigen Kennzahlen, bevor die Kapitel 2.2 und 2.3 den Ein-

fluss von Modulen, Baugruppen sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik auf diese Dimensionen und damit auf die Kreislauffähigkeit erläutern.

2.1 Entwurfsdimensionen und geeignete Kennzahlen

Die Zielgröße Kreislauffähigkeit lässt sich in die Entwurfsdimensionen Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Rezyklierbarkeit, Langlebigkeit und Materialkritikalität überführen.

Reparierbarkeit wird über Demontageschritte, benötigte Werkzeuge, Ersatzteilzugang und Dokumentationslage operationalisiert. Der französische Reparierbarkeitsindex belegt die Wirksamkeit öffentlich sichtbarer Metriken [1].

Wiederverwendbarkeit fokussiert Komponenten, die funktional und sicher in einen weiteren Lebenszyklus überführbar sind, etwa Netzteile, Gehäusemodule oder Sensorik, sofern Prüfbarkeit und Rückverfolgbarkeit gegeben sind.

Rezyklierbarkeit bemisst sich an den Kriterien Demontierbarkeit, sortenreiner Trennbarkeit, Werkstoffkennzeichnung und Schadstofffreiheit. Die VDI 2243 stellt hierfür praxistaugliche Kriterien bereit [2].

Langlebigkeit umfasst technische Robustheit, Softwareversorgung und Upgradierbarkeit sowie den Schutz vor vorzeitiger Obsoleszenz. Die IEC 62430 benennt entsprechende Maßnahmen für Haltbarkeit und Reparaturfähigkeit [3].

Die Materialkritikalität adressiert Art und Anteil kritischer Rohstoffe sowie deren Rückgewinnbarkeit. EN 45558 und IEC 62474 liefern eine Deklarationsmethodik und Vorgaben zum Datenaustausch [4, 5]. Aspekte im Zusammenhang mit der Montage von Komponenten in elektronischen Systemen, der Lötprozesse ebenso wie von Reworkstrategien sind in [6–8] dargestellt. Aus Sicht der Wiederverwendbarkeit ist bei Kondensatoren die Alterungsbeständigkeit zu berücksichtigen. Elektrolytkondensatoren unterliegen ausgeprägter Alterung und sollten vor einer Wiederverwendung befundet werden, während Folienkondensatoren in der Regel langlebiger sind und lange Nutzungsdauern begünstigen [9]. Diese Kennzahlen bilden die Grundlage für die im Kapitel 3 beschriebene regelbasierte Bewertung.

2.2 Einfluss von Modulen und Baugruppen

Beim Entwurf und Aufbau einer elektronischen Baugruppe steht die geforderte Funktion im Mittelpunkt. Gleichzeitig sind Randbedingungen einzuhalten, die sich aus Normen und Entwurfsregeln, aus den Einsatzbedingungen der Baugruppe, aus Verfügbarkeit und Lagerhaltung von Bauelementen und Fertigungstechnologien im Unternehmen sowie aus Vorgaben des Kunden und weiteren nicht technischen Anforderungen ergeben. In diesem Beitrag wird Kreislauffähigkeit als zusätzliche gleichrangige Anforderung eingeführt. Sie verändert nicht die Funktion selbst, sondern beeinflusst nur solche Designentscheidungen, die unabhängig von der Funktion getroffen werden können. Dazu zählen die Materialwahl, der Grad der Modularität, Gehäuse und Steckverbinderkonzepte, die Kondensatorstechnologie sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik.

Bei der Realisierung des Schaltplans werden Bauelemente und Module ausgewählt und im Entwurfswerkzeug verbunden. Die Vielfalt an Kategorien ist groß. Eine umfassende Darstellung bezogen auf die Variantenvielfalt und Montagetechniken elektronischer Baugruppen wird in [6] gegeben. Für die Bewertung der

Kreislauffähigkeit sind passive Bauelemente wie Widerstände und Kondensatoren sowie aktive Bauelemente wie Dioden, Transistoren und daraus integrierte Module besonders relevant. Diskrete Aufbauten können die Reparierbarkeit auf Bauteilebene erhöhen, da einzelne Komponenten gezielt identifiziert und ausgetauscht werden können [6, 8]. Module können hingegen Platzbedarf, Kosten und Montagezeit reduzieren, sofern sie in die vorhandene Fertigungs-, Test- und Serviceumgebung integrierbar sind [6, 10]. Ein Power-Management-Modul mit dokumentierten Schnittstellen kann trotz höherer Integration vorteilhaft sein, wenn Verfügbarkeit, Identifikation und Reparaturanleitung gesichert sind. Strategien zum Verlangsamen, Schließen und Verengen von Stoffströmen bilden die zentrale Logik zirkulären Designs [11–13], wobei fallstudienbasierte Arbeiten konkrete Gestaltungsempfehlungen für Elektro- und Elektronikgeräte ableiten [10].

2.3 Einfluss der Aufbau- und Verbindungstechnik

Der Begriff Aufbau- und Verbindungstechnik bezeichnet die Technologien, mit denen Bauelemente und Module untereinander verbunden werden, etwa über die Montage auf Leiterplatten [6]. In der Regel entstehen Verbindungen durch Löten, in seltenen Fällen kommen Pressverbindungen zum Einsatz. Mehrere Platinen werden über Stecker, verschraubte Kabel oder gelötete Leitungen gekoppelt. Beim Löten von Baugruppen und Modulen unterscheidet man zwischen der Durchstecktechnik (Through Hole Technology, THT), bei der die Anschlüsse durch die Leiterplatte geführt und auf der Gegenseite verlötet werden, und der Surface Mounted Technology (SMT), bei der die Anschlüsse direkt auf der Bestückungsseite verlötet werden. Beide Technologien sind hinsichtlich Reworkfähigkeit, thermischer Belastung und Automatisierbarkeit unterschiedlich zu bewerten [6, 8].

Die Reparaturfähigkeit und Wiederverwendbarkeit gelöteter Bauteile hängt wesentlich davon ab, ob sich ein Bauteil oder Modul ohne Beschädigung wieder von der Platine trennen lässt, sei es um ein defektes Teil zu ersetzen oder eine Komponente wiederzuverwenden. Ob THT, SMT oder gegebenenfalls weitere Technologien von Vorteil sind, hängt von der konkreten Auslegung sowie von den Fertigungsmöglichkeiten des Herstellers ab und ist daher spezifisch zu bewerten. Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass bleifreie Lote höhere thermische Anforderungen an Rework-Prozesse stellen und dass Baugruppendichten und Gehäuseformen wie QFN besondere Sorgfalt erfordern [7, 8, 14].

2.4 Normativer Rahmen und Datenanforderungen

Für die Umsetzung eines kreislauffähigen Designs einer Schaltung muss neben den funktionalen und technischen Anforderungen auch der normative Rahmen berücksichtigt werden. Zunehmend werden mit den Produkten über die klassischen Datenblätter hinausgehende Informationen geliefert. Der vorliegende Abschnitt stellt diese in Kürze dar.

- ESPR und digitaler Produktpass: Die Verordnung legt Produktanforderungen fest und führt einen digitalen Produktpass ein. Für Elektronik erhöhen Identifikation, Ereignisdaten und Materialangaben die Kreislauftransparenz. „GS1 Digital Link“ und „EPCIS 2.0“ (Electronic Product Code Information Services) bieten dafür integrierbare Datenbausteine [15–20].

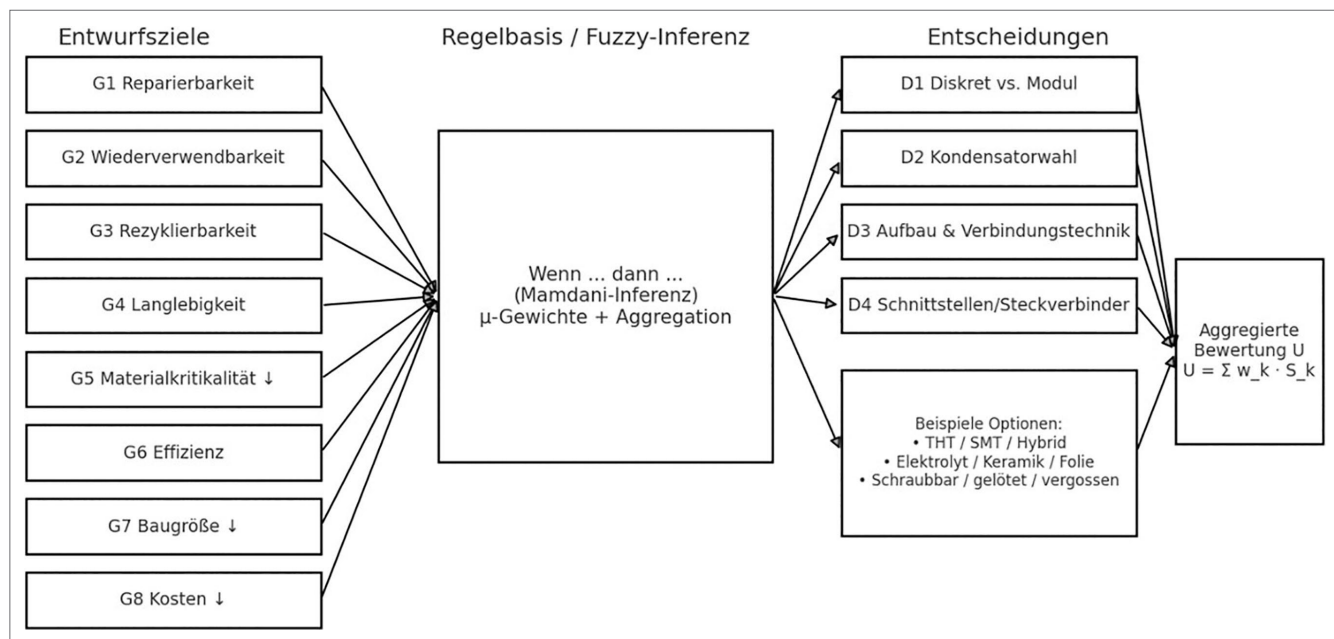


Bild 1 Schematisches Entscheidungsmodell zur Bewertung der Kreislauffähigkeit. Grafik: eigene Darstellung

- WEEE und RoHS: WEEE adressiert die Sammlung, Behandlung und Verwertung. RoHS reduziert Schadstoffe und erleichtert stoffliche Kreisläufe [21, 22].
- IEC 62430 und EN 4555x: IEC 62430 verankert umweltbewusstes Design. Die EN-4555x-Reihe liefert Methoden zu Haltbarkeit, Remanufacturing-Fähigkeit, Reparierbarkeit, Rezyklierbarkeit sowie zur Informationsoffenlegung. Ergänzend adressiert EN 45560 die Erreichung zirkulärer Produktentwürfe [3, 23, 24].
- EN 45558 und IEC 62474: Materialdeklaration und CRM-Transparenz sind für Produktpässe und Compliance zentral [4, 5].
- Digitale Typenschilder: IEC 63365 erlaubt digitale Nameplates und verweist auf produktbegleitende Informationen [25].

3 Vorgehensweise: Regelbasierter Fuzzy-Ansatz für den Schaltungsentwurf

Dieses Kapitel beschreibt die methodische Umsetzung der Bewertung. Zunächst werden Ziele und Freiheitsgrade erfasst und in Fuzzy-Mengen überführt. Die im Anschluss daran erläuterte Regelbasis aus Expertenwissen und normativen Vorgaben ermöglicht die Inferenz, die präferierte Realisierungsoptionen ableitet.

3.1 Ausgangspunkt und Freiheitsgrade

Vorausgesetzt sind ein funktionaler Schaltplan und eine vorläufige Stückliste. Diese Stückliste beschreibt den Bauteiltyp, also zum Beispiel Widerstand, Kondensator, oder die Modulfunktion, wie etwa Spannungsversorgung, Brückenschaltung, ohne die konkrete Realisierung und die Aufbau- und Verbindungstechnik festzulegen. Für Elemente aus der Stückliste, für die aus funktionalen oder gegebenenfalls anderen Gründen keine Freiheitsgrade bestehen, wird bereits hier die Auswahl getroffen. Für Elemente mit verbleibenden Freiheitsgraden werden Entwurfsziele und Entscheidungsoptionen qualitativ beschrieben und über Fuzzy-Mengen verbunden. Die Methode folgt dem Fuzzy-Sets-Ansatz

sowie gängigen Inferenzschemata [26–28]. Das Entscheidungsmodell ist im **Bild 1** dargestellt.

Entwurfsziele umfassen die im Kapitel 2.1 beschriebenen Dimensionen Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Rezyklierbarkeit, Langlebigkeit, niedrige Materialkritikalität sowie optionale Ziele wie Effizienz, geringe Baugröße und niedrige Kosten. Entscheidungsfelder betreffen die Realisierung einer Funktion durch diskrete Bauelemente oder als Modul, die Kondensator-technologie, die Aufbau- und Verbindungstechnik und Schnittstellen.

3.2 Fuzzy-Mengen und Regelbasis

Bild 2 veranschaulicht die Grundidee beispielhaft: Jedes Entwurfsziel wird als linguistische Variable dargestellt. Der linguistischen Variablen werden Fuzzy-Mengen mit geeignet gewählten Zugehörigkeitsfunktionen zugeordnet. Diese Mengen beschreiben die Gewichtung des entsprechenden Entwurfsziels beim Entwurf, wie beispielhaft im Bild 2 dargestellt.

In gleicher Weise werden Entscheidungen als linguistische Variable dargestellt und Optionen wie THT, SMT oder Hybrid beziehungsweise Elektrolyt, Keramik oder Folie oder weitere Entscheidungen durch Fuzzy-Mengen repräsentiert. Regeln verknüpfen Ziele mit Entscheidungen, zum Beispiel:

- WENN Reparierbarkeit hoch UND Wiederverwendbarkeit hoch DANN THT UND diskreter Aufbau
- WENN Baugröße sehr klein, DANN SMT
- WENN Materialkritikalität niedrig gefordert, DANN Folienkondensator
- WENN Langlebigkeit hoch UND Temperaturprofil anspruchsvoll, DANN Folienkondensator
- WENN Rezyklierbarkeit hoch DANN schraubbare Steckverbinder UND Nicht Verguss.

Im Bild 2 sind die Zugehörigkeitsfunktionen als Dreiecke dargestellt. Diese Überlegung orientiert sich an dem Konzept der interpretierbaren Fuzzy-Mengen [29], die für den Anwender einfach

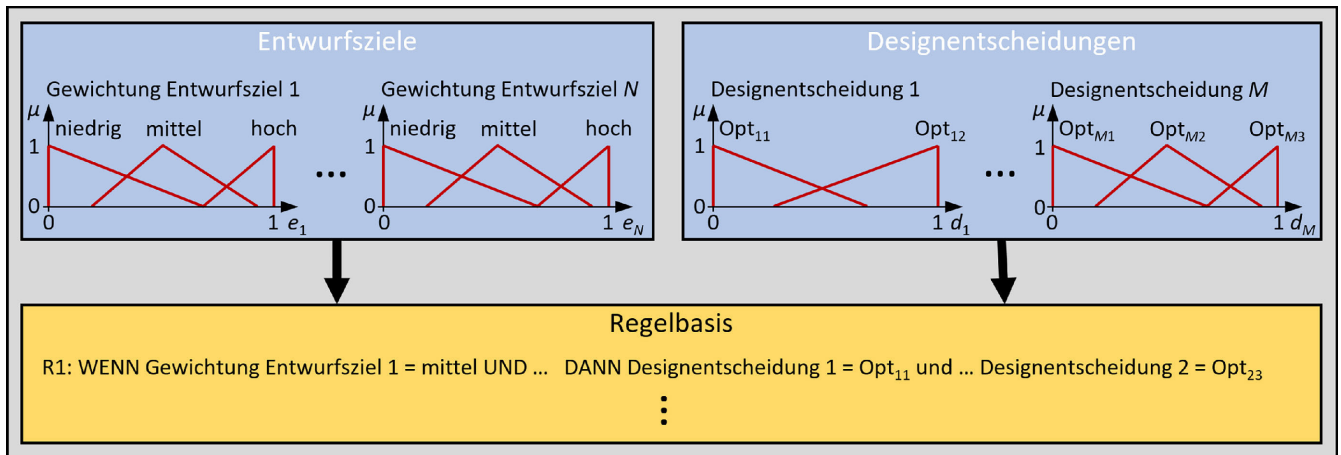


Bild 2 Regelbasiertes Design mit unscharfen Entwurfszielen und Designentscheidungen. Die Variablen $e_i, i = 1, \dots, N$, beziehungsweise $d_j, j = 1, \dots, M$, sind die Ein- beziehungsweise Ausgangsgrößen, μ bezeichnet jeweils den Grad der Zugehörigkeit. Grafik: eigene Darstellung

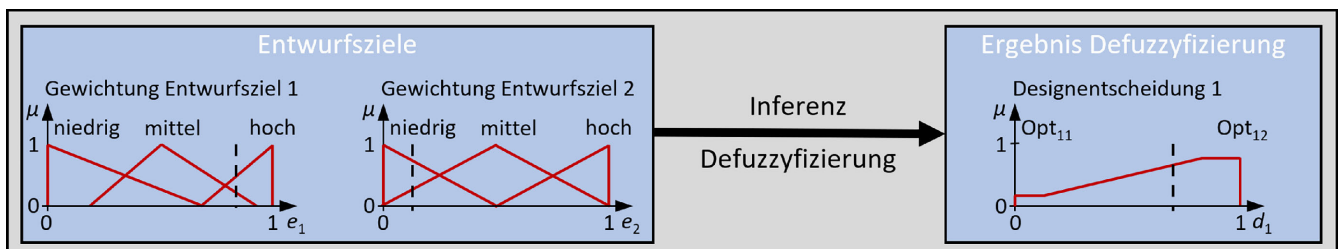


Bild 3 Bestimmung der Designentscheidungen als scharfe Größen. Grafik: eigene Darstellung

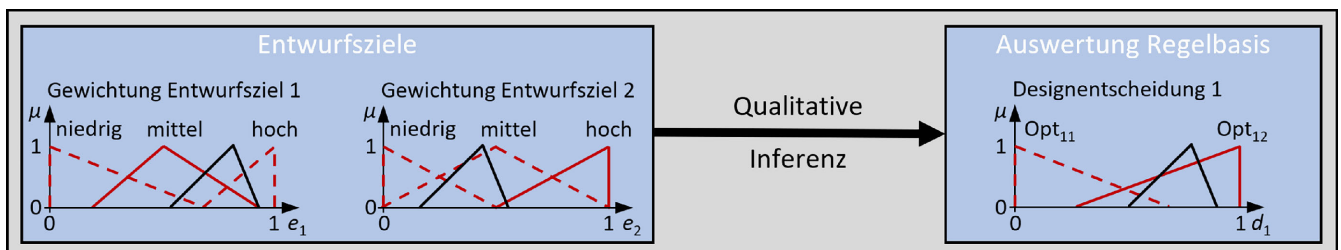


Bild 4 Bestimmung der Designentscheidungen als unscharfe Größen über interpretierbare Fuzzy-Mengen. Die in Schwarz dargestellten Fuzzy-Mengen bei den Entwurfszielen sind durch den Anwender nachträglich eingebrachte unscharfe Gewichtungen, die zu der ebenfalls in Schwarz dargestellten unscharfen Option führen. Grafik: eigene Darstellung

zu interpretieren und zu spezifizieren sind. Dies ist für die Anwendung von großem Nutzen.

Für die Inferenz können zwei Optionen eingesetzt werden:

1. Einerseits können, wie in [30], durch den Anwender scharfe Gewichtungen $e_i, i = 1, \dots, N$, als Eingangsgrößen vorgegeben werden. Durch die Inferenz und eine anschließende Defuzzifizierung erhält der Anwender eine Gewichtung für die jeweiligen Designentscheidungen $d_j, j = 1, \dots, M$. Für diesen Prozess können die unterschiedlichen Inferenzmethoden beziehungsweise die Verfahren zur Defuzzifizierung von Standardwerkzeugen wie "Matlab" verwendet werden. Dabei wird häufig eine graphische Darstellung verwendet, die für den Anwender eine Transparenz zwischen der Gewichtung der Entwurfsziele und den Designentscheidungen herstellt. Dies wird beispielhaft an einer Designentscheidung basierend auf zwei Entwurfszielen im **Bild 3** dargestellt. Die vom Anwender gewählten Gewichtungen sind als gestrichelte Linien in den Fuzzy-Mengen der Entwurfsziele dargestellt. Aufgrund der

gewählten Regel liegt die scharfe Größe für die Designentscheidung 1 näher bei der Option 2, sodass diese entsprechend gewählt wird.

2. Die Inferenz kann wie in [29] durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält der Anwender eine interpretierbare dreieckförmige Fuzzy-Menge, aus der sich der Wert der linguistischen Variablen ableiten lässt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die Vorgabe scharfer Gewichtungen, die Defuzzifizierung und damit auch die Interpretation des ebenfalls scharfen Ergebnisses der Defuzzifizierung entfällt. Sie wird beispielhaft im **Bild 4** dargestellt. Anders als beim Ergebnis der Defuzzifizierung im Bild 3 entsteht hier eine dreieckförmige und damit interpretierbare Fuzzy-Menge. Über diesen Vorteil hinaus wurde in [29] auch eine Methodik entwickelt, die es bezogen auf den vorliegenden Beitrag ermöglicht, qualitative Gewichtungen von Entwurfszielen, die nicht in den ursprünglichen Entwurfszielen enthalten sind, durch ein geeignetes Interpolationsverfahren auf qualitative Designentscheidungen abzubilden.

Dies wird im Bild 4 anhand der in Schwarz dargestellten Fuzzy-Mengen beispielhaft veranschaulicht: Durch den Anwender nachträglich eingebrachte unscharfe Gewichtungen können durch das Verfahren aus [29] auf eine neue unscharfe Option bei der Designentscheidung abgebildet werden.

3.3 Kennzahlen und Vergleichbarkeit

Zur Variantenbewertung wird der Gesamtnutzen U als gewichtete Summe $U = \sum w_k \cdot S_k$ definiert, wobei w_k die Zielgewichte und S_k die normierten Teilnutzen aus der Fuzzy-Inferenz darstellt, wie der rechte Teil von Bild 1 zeigt. Die Gewichte w_k entstehen aus einer abgestimmten Zielhierarchie und werden gemeinsam mit relevanten Stakeholdern ermittelt, etwa über Swing- oder 100-Punkte-Verfahren, den Analytic Hierarchy Process (AHP) oder eine Budget-Allocation. Anschließend werden die Gewichte normiert, $w_k \geq 0$, $\sum w_k = 1$ und revisionssicher dokumentiert. Verpflichtende Anforderungen wie RoHS-Konformität oder ein Mindest-Reparierbarkeitsindex werden nicht über Gewichte relativiert, sondern als harte Nebenbedingungen geführt.

Die Zielerfüllungen S_k messen, wie gut eine Variante ein Kriterium erfüllt, auf einer Skala von 0 bis 1. Hierzu werden je Ziel geeignete Indikatoren festgelegt, wie etwa Demontageschritte und Ersatzteilzugang für Reparierbarkeit, sortenreine Trennbarkeit und Kennzeichnung für Recyklierbarkeit, Update- und Supportdauer für Langlebigkeit oder der Anteil kritischer Rohstoffe nach EN 45558 für Materialkritikalität. Verfügt ein Ziel über mehrere Indikatoren, erfolgt zunächst eine interne Aggregation; optional können ein Datenqualitätsfaktor $q \in [0,1]$ zur Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie Bedeutungsfaktoren α_i zur Aggregation von der Komponenten- auf die Baugruppenebene eingesetzt werden ($\sum \alpha_i = 1$).

Für Transparenz und Belastbarkeit werden Sensitivitätsanalysen der Zielgewichte w_k mit beispielsweise ± 10 Prozent empfohlen, ebenso eine Kalibrierung der Fuzzy-Grenzwerte anhand von Referenzvarianten. Doppelzählungen sind zu vermeiden, indem Indikatoren eindeutig einem Ziel zugeordnet werden. Neben dem Gesamtnutzen U sollten zusätzliche Nachweise berichtet werden, etwa Demontage- und Reparaturzeiten, die Zahl der Demontageschritte, der CRM-Anteil gemäß EN 45558, Werkstofftrenngrade oder die Ersatzteilverfügbarkeit über die Lebensdauer. Empirische Arbeiten deuten darauf hin, dass höhere inhärente Zirkularität häufig mit geringerer Umweltwirkung korreliert [31].

3.4 Integration in Datenflüsse und Produktpass

Bezogen auf die Material- und CRM-Transparenz werden Stücklistenpositionen gemäß IEC 62474 beschrieben und kritische Rohstoffe nach EN 45558 deklariert.

Im Zusammenhang mit der Identifikation und Ereignisdaten erlauben eindeutige Kennungen mit GS1 Digital Link und Ereignisdaten mit EPCIS 2.0 eine Interoperabilität über die Lieferkette [16, 17].

Digitale Nameplates verweisen auf Reparaturinformationen, Explosionszeichnungen und Sicherheitsdatenblätter [25].

4 Diskussion: Zielkonflikte und Komplexitätsbeherrschung

Kreislauffähiges Design führt zu Abwägungen mit Baugröße, Bauteilkosten und Zuverlässigkeit. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz macht diese Zielkonflikte explizit, erlaubt eine systematische Gewichtung und dokumentiert die Herleitung der Entscheidung. Bezogen auf eine Realisierung einer Funktion mit diskreten Bauelementen im Vergleich zu einer Realisierung durch ein integriertes Modul steht einer höheren Reparierbarkeit häufig eine geringere Flächeneffizienz und ein höherer Montageaufwand gegenüber. In der Aufbau- und Verbindungstechnik verbessern THT-Ausführungen in der Regel die Nachbearbeitbarkeit, während SMT hohe Packungsdichten und Leistungen ermöglicht, jedoch erhöhte Anforderungen an Rework-Prozesse stellt. Diese Aussagen sind kontextabhängig und müssen mit herstellerspezifischen Prozessfähigkeiten und Produkterfordernissen abgeglichen werden [7, 8, 14].

Die Marktevidenz aus reparaturfreundlichen Elektronikprodukten deutet darauf hin, dass längere Nutzungsdauern und modulare Austauschpfade die Umweltwirkungen reduzieren können, sofern Ersatzteile, Dokumentation und Softwareversorgung verfügbar sind [32, 33]. Klebtechnische Lösungen mit reversibler Aktivierung können die Demontage von Komponenten zusätzlich erleichtern, ohne die Funktionssicherheit zu beeinträchtigen.

4.1 Limitationen und Anwendungsgrenzen

Die fuzzy-basierte Regelbewertung bildet Expertenwissen strukturiert ab, bleibt jedoch in der Parametrisierung subjektiv. Gewichte und Zugehörigkeitsfunktionen beeinflussen das Ergebnis und sollten mit Stakeholdern abgestimmt und regelmäßig anhand von Felddaten validiert werden.

Ein weiterer limitierender Faktor ist die Datenverfügbarkeit zu Materialzusammensetzungen, kritischen Rohstoffen und Reworkfähigkeiten über die Lieferkette hinweg. Hier können ESPR und der digitale Produktpass mittelfristig Abhilfe schaffen [15–19].

Reparierbarkeit und Recyklierbarkeit werden zudem durch Herstellprozesse, Servicekompetenz und Rücknahmestrukturen geprägt. Die Methode adressiert diese Abhängigkeiten, ersetzt aber keine produkt- und prozessspezifischen Erprobungen.

5 Fazit und Ausblick

Die Verbindung aus klaren Entwurfsdimensionen, regelbasierter Fuzzy-Bewertung und normativ gestützten Kennzahlen befähigt Entwicklungsteams, Kreislauffähigkeit im Elektronikdesign systematisch umzusetzen. Der Ansatz ist schlank einführbar, lässt sich mit PLM (Product-Lifecycle-Management)-Daten, Produktpass und Servicefeedback koppeln und schafft transparente, auditable Entscheidungen.

In zukünftigen Forschungsarbeiten wird eine Methodik erarbeitet, mit welcher Regelbasen unter Verwendung von Felddaten verfeinert werden können. Zudem sollen EPCIS-Ereignisse für Reparatur und Rücknahme sowie die Ausweitung auf Softwareversorgung und Sicherheitsupdates als Langlebigkeitsfaktoren besser genutzt werden. Mit Blick auf ESPR und DPP entsteht ein skalierbarer Pfad, um technische Exzellenz, Nachhaltigkeit und Resilienz zu vereinen.

LITERATUR

- [1] Ministère de la Transition Écologique: Instructions manual for the display and the calculation of the reparability index of electrical and electronic equipments. Stand: 28.06.2022. Internet: www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/220523_instructions%20manual%20-%20reparability%20index%20-%20final%20V3.0.pdf. Zugriff am 16.01.2026
- [2] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2243. Recyclingorientierte Produktentwicklung. Ausgabe 2002–07
- [3] International Electrotechnical Commission: IEC 62430:2019. Environmentally Conscious Design (ECD) – Principles, requirements and guidance
- [4] CEN-CENELEC: EN 45558:2019. General Method to Declare the Use of Critical Raw Materials in Energy Related Products. Ausgabe 2019
- [5] International Electrotechnical Commission: IEC 62474. Material Declaration for Products of and for the Electrotechnical Industry.
- [6] Franke, J.; Wang, L.; Bock, K. et al.: Electronic Module Assembly. CIRP Annals 70 (2021) 2, pp. 471–493
- [7] Jiang, N.; Zhang, L.; Liu, Z. Q. et al.: Reliability Issues of Lead-Free Solder Joints in Electronic Devices. Science and Technology of Advanced Materials 20 (2019) 1, pp. 876–901
- [8] IPC: IPC-7711/7721D. Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies. Stand: 2023. Internet: www.electronics.org/TOC/IPC-7711D-7721D_TOC.pdf. Zugriff am 13.01.2026
- [9] Gupta, A.; Yadav, O. P.; DeVoto, D. et al.: A Review of Degradation Behavior and Modeling of Capacitors: Preprint. Report-Nr.: NREL/CP-5400–71386. Internet: docs.nrel.gov/docs/fy19osti/71386.pdf. Zugriff am 13.01.2026
- [10] Bovea, M. D.; Pérez-Belis, V.: Identifying Design Guidelines to Meet the Circular Economy Principles: A Case Study on Electric and Electronic Equipment. Journal of Environmental Management 228 (2018), pp. 483–494
- [11] Bocken, N. M.; De Pauw, I.; Bakker, C. et al.: Product Design and Business Model Strategies for a Circular Economy. Journal of Industrial and Production Engineering 33 (2016) 5, pp. 308–320
- [12] Den Hollander, M. C.; Bakker, C. A.; Hultink, E. J.: Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. Journal of Industrial Ecology 21 (2017) 3, pp. 517–525.
- [13] Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. Resources, Conservation and Recycling 127 (2017), pp. 221–232
- [14] Kummerl, S.; Sreenivasan, K.; Paku, V. et al.: Freeze Frame Reflow to Enhance Yields for Advanced Low-Profile Bottom Terminated Packages. Journal of Surface Mount Technology 36 (2023) 3, pp. 2–10
- [15] Europäische Union: Verordnung (EU) 2024/1781 (Ecodesign for Sustainable Products Regulation). Digitaler Produktpass. Internet: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj. Zugriff am 13.01.2026
- [16] GS1: GS1 Digital Link. Standard. Internet: www.gs1.org/standards/gs1-digital-link. Zugriff am 10.01.2026
- [17] GS1: EPCIS und Core Business Vocabulary (CBV). Standard. Internet: www.gs1.org/standards/epcis. Zugriff am 10.01.2026
- [18] GS1: Sunrise 2027. Get Ready for GS1 Sunrise 2027. Stand: 2026. Internet: www.gs1us.org/industries-and-insights/by-topic/sunrise-2027. Zugriff am 16.01.2026
- [19] GS1 in Europe: GS1 Standards enabling the EU digital product passport. Release 2.2. Stand: January 2025. Internet: gs1.eu/wp-content/uploads/2024/12/GS1-Standards-Enabling-DPP.pdf. Zugriff am 16.01.2026
- [20] Europäische Union: Richtlinie (EU) 2024/1799 vom 13. Juni 2024 über gemeinsame Vorschriften zur Förderung der Reparatur von Waren. Internet: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1799/oj. Zugriff am 13.01.2026
- [21] Europäische Union: Richtlinie 2012/19/EU vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) (Neufassung). Internet: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0019. Zugriff am 13.01.2026
- [22] Europäische Union: Richtlinie 2011/65/EU vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS) (Neufassung). Internet: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/65/2025-01-01/eng. Zugriff am 10.01.2026.
- [23] CEN-CENELEC: Ecodesign, Labelling and Traceability of Products. Material Efficiency – Focus on the Design. Internet: www.cencenelec.eu/areas-of-work/cen-cenelec-topics/ecodesign-labelling-and-traceability-of-products/material-efficiency/. Zugriff am 16.01.2026
- [24] CEN-CENELEC: EN 45560:2024. Method to Achieve Circular Designs of Products. Internet: standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/7054bf1f-8e0b-40e8-b8ef-2cfd1424a603/en-45560-2024. Zugriff am 16.01.2026
- [25] International Electrotechnical Commission: IEC 63365:2022. Industrial process measurement, control and automation – Digital nameplate.
- [26] Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Information and Control 8 (1965) 3, pp. 338–353
- [27] Mamdani, E. H.; Assilian, S.: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Human-Computer Studies 51 (1999) 2, pp. 135–147
- [28] Buckley, J. J.: Fuzzy Hierarchical Analysis. Fuzzy Sets and Systems 17 (1985) 3, pp. 233–247
- [29] Schmid, K.: Qualitative dynamische Modelle für das Verhalten von Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003
- [30] Braun, A.; Schullerus, G.; Ruzicic, N. et al.: Electronics Design for Circularity Using a Fuzzy Decision Making System. 23rd International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM 2025), Paris, 2025, pp. 1–6
- [31] Linder, M.; Boyer, R. H.; Dahllöf, L. et al.: Product-Level Inherent Circularity and its Relationship to Environmental Impact. Journal of Cleaner Production 260 (2020), #121096
- [32] Sánchez, D.; Proske, M.; Baur, S. J.: Life Cycle Assessment of the Fairphone 4. Berlin: Fraunhofer IZM, 2022
- [33] Ebert, T.; Jayanathan, S.; Cuccaro, L. et al.: Product Design Strategies for Decarbonization and Resource Efficiency. Electronics Goes Green 2024+ (EGG), Berlin, 2024, pp. 1–6

Prof. Dr. Anja Braun 
anja.braun@reutlingen-university.de

Prof. Dr. Gernot Schullerus 
gernot.schullerus@reutlingen-university.de

Hochschule Reutlingen 
 Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.reutlingen-university.de

LIZENZ



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