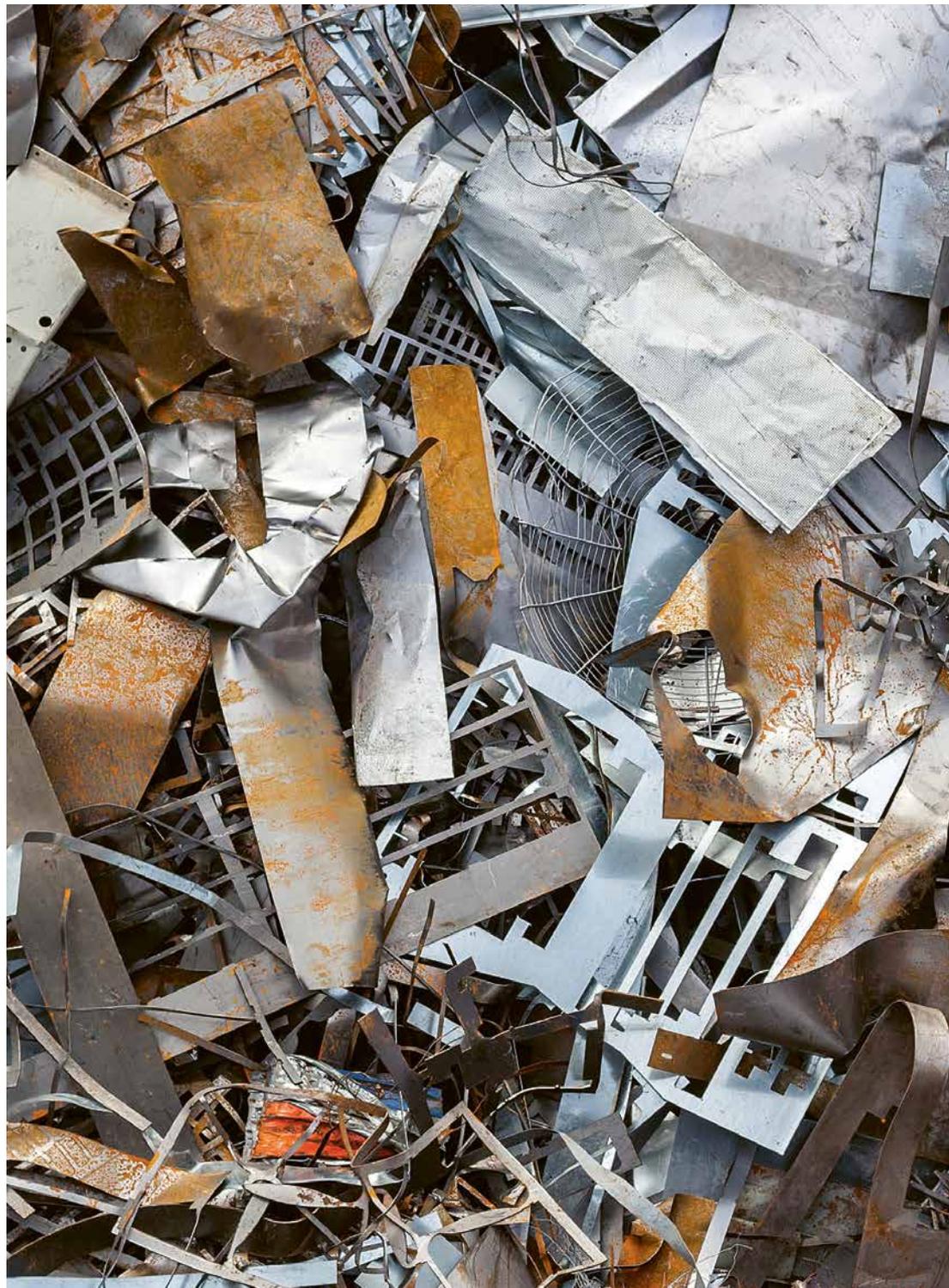


Zukunft der Metallkreisläufe in der Schweiz

Potenziale und Perspektiven durch intelligente Sensorsysteme
und Systemdenken



Relevanz der Metalle im Recyclingkontext

Metalle spielen eine zentrale Rolle in der Schweizer Kreislaufwirtschaft – sowohl hinsichtlich der Materialmengen als auch ihrer ökologischen Relevanz. Die Hochschule Luzern – Technik & Architektur hat sich mit der Integration intelligenter Sensorsysteme, systemischer Prozessanalysen und zukunftsfähiger Geschäftsmodelle befasst, um konkrete Beiträge zur Optimierung der Metallkreisläufe in der Schweiz zu leisten.

Jährlich fallen in der Schweiz rund 1.9 Millionen Tonnen Metallschrott an. Die grössten Fraktionen bilden dabei Gusseisen und Stahl, gefolgt von Edelstahl, Bunt- und Leichtmetallen.

Dank bestehender Sammel- und Recyclinginfrastrukturen erreichen viele Metalle heute hohe Rücklaufquoten zwischen 80 und 95 % – insbesondere Aluminium, Kupfer, Eisen und Edelmetalle. Diese hohe Rückführung bildet die Grundlage für eine ressourceneffiziente Weiterverwertung.

Gleichzeitig ist die Umweltrelevanz von Metallen erheblich: Im Bauwesen beispielsweise machen sie rund 29 % der Umweltbelastung aus – mehr als jeder andere Einzelbeitrag.¹

Die Kombination aus grossen Stoffströmen, hoher Rücklaufbereitschaft und ökologischer Hebelwirkung verdeutlicht: Metalle spielen eine zentrale Rolle in der Schweizer Kreislaufwirtschaft. Eine intelligente Steuerung dieser Metallkreislaufwirtschaft schont Ressourcen, reduziert CO₂-Emissionen und sichert die Versorgung.

Impressum

Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
hslu.ch/technik-architektur

Autor:innen

Jekaterina Dmitrijeva, Christine Grimm,
Fabienne Keller, Shaun West, Klaus Zahn,
Simon Züst

Kontakt

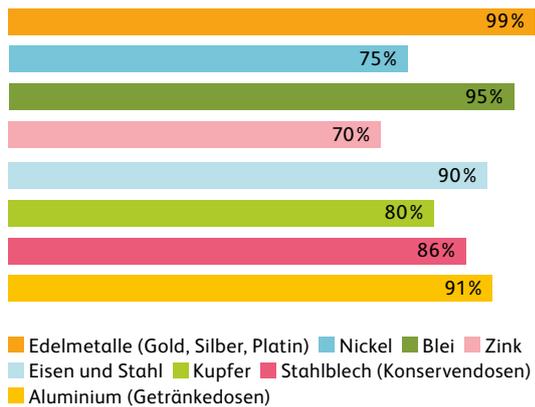
Simon Züst
T +41 41 349 30 44
simon.zuest@hslu.ch

¹ Gauch, Marcel & Matasci, Cecilia & Hincapie, Ingrid & Hörler, Raphael & Böni, Heinz. (2016). MatCH – Bau: Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz.

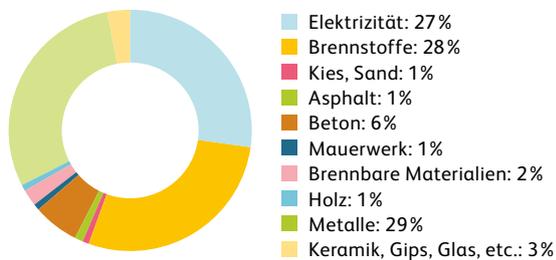
Menge



Rücklaufquote



Umweltbelastung



Von der Rücklaufquote zur Qualität der Wiederverwertung: Warum «hochwertig» zählt

Die hohe Rücklaufquote von Metallen in der Schweiz belegt den etablierten Rücklaufweg vom Verbraucher zurück ins System. Doch die entscheidende Frage lautet: Wie werden diese Materialien danach verwendet?

Denn eine Rückführung allein garantiert noch keine nachhaltige Wirkung. Entscheidend ist, ob die Metalle in Anwendungen eingesetzt werden, die ihrer ursprünglichen Qualität entsprechen, oder ob sie in minderwertigen Verwendungen landen, wo sie nur noch eingeschränkt nutzbar sind. Nur wenn Materialien hochwertig wiederverwendet oder recycelt werden, bleibt ihr Wert im System erhalten – und echte Zirkularität wird möglich.

Unsere vergleichenden Betrachtungen zeigen, dass eine hochwertige Verwertung – im Gegensatz zum sogenannten Downcycling – die Nutzungsdauer von Materialien deutlich verlängert und Verluste in Richtung Entsorgung reduziert.

In der Praxis bedeutet das: Je besser es gelingt, Metalle stofflich rein, funktional geeignet und mit möglichst wenigen Qualitätseinbussen wieder einzusetzen, desto grösser ist ihr Beitrag zu einer nachhaltigen Schweiz.

Betrachtungsebenen für die Analyse zirkulärer Metallsysteme

Um die Potenziale und Herausforderungen der Metallkreislaufwirtschaft systematisch zu erfassen, betrachten wir vier komplementäre Ebenen. Diese spannen den Rahmen zwischen technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Aspekten und ermöglichen eine ganzheitliche Analyse von Sensorik-Anwendungen im Kontext von Kreislaufwirtschaft.

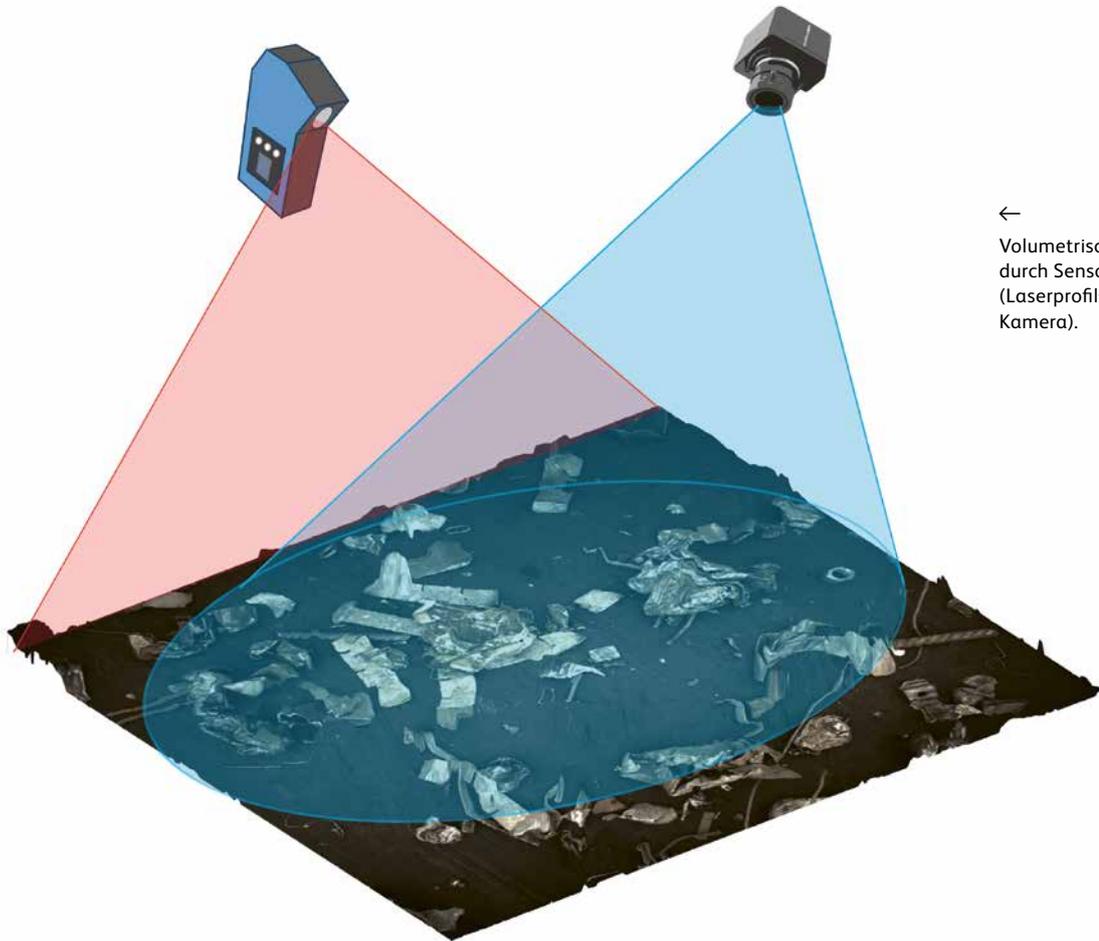
1. Sensortechnologien

Diese Ebene fokussiert auf die technologischen Grundlagen zur Erkennung, Sortierung und Bewertung von Metallen. Im Zentrum stehen Verfahren wie Bildverarbeitung, spektralanalytische Methoden, Machine Learning und eingebettete Systeme, mit dem Ziel, relevante Materialinformationen präzise und effizient bereitzustellen.

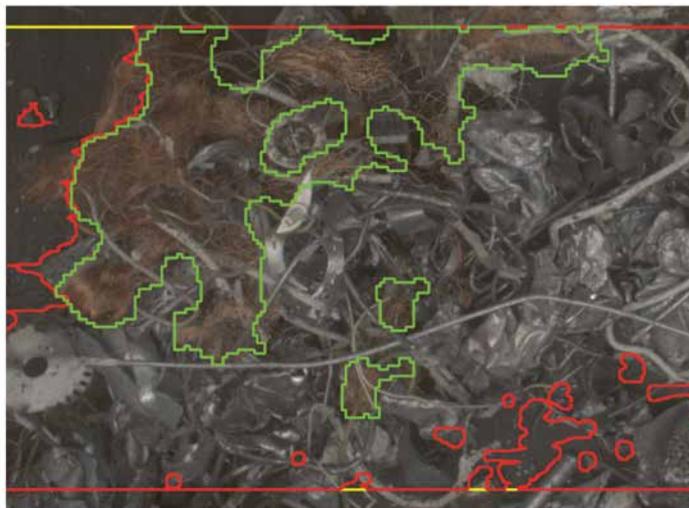
Die Resultate unserer Technologieanalyse zeigen:

- Vision-basierte Systeme bieten aktuell das beste Verhältnis von Kosten, Flexibilität und Präzision. Sie eignen sich gut für Klassifikation, Erkennung und Volumenmessung – insbesondere in Kombination mit Machine-Learning-Algorithmen und grossen Trainingsdatensätzen.
- Spezialisierte Verfahren wie LIBS (Laserinduzierte Plasmaspektroskopie), DE-XRT (Röntgenbildgebung) und ECS (elektromagnetische Sortierung) verfügen über hohes Potenzial für komplexe Analyseaufgaben, sind jedoch kosten- und integrationsintensiver.
- Die Wahl der Sensortechnologie muss stets an den Materialtyp, den Einsatzort und die jeweilige Prozesskette angepasst werden – ein universelles Sensorsystem existiert nicht.

Fazit: Der erfolgreiche Einsatz sensorischer Systeme erfordert eine anwendungsspezifische Auswahl und gezielte Prozessintegration. Technisches Potenzial allein reicht nicht – entscheidend ist die Passung zum praktischen Anwendungsumfeld.



←
 Volumetrische Analyse
 durch Sensorfusion
 (Laserprofilscanner &
 Kamera).



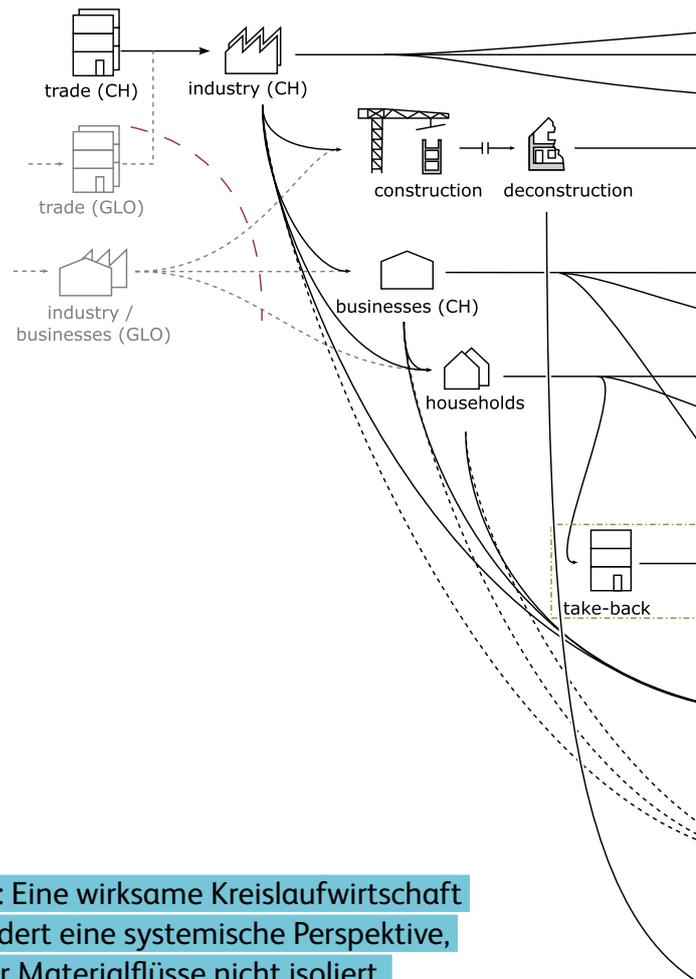
↑
 Detektion von Kupfer (grün)
 durch Kombination von
 Vision-Sensorik und
 maschinelles Lernen beim
 Stahlrecycling.

2. Materialflüsse und Prozesse

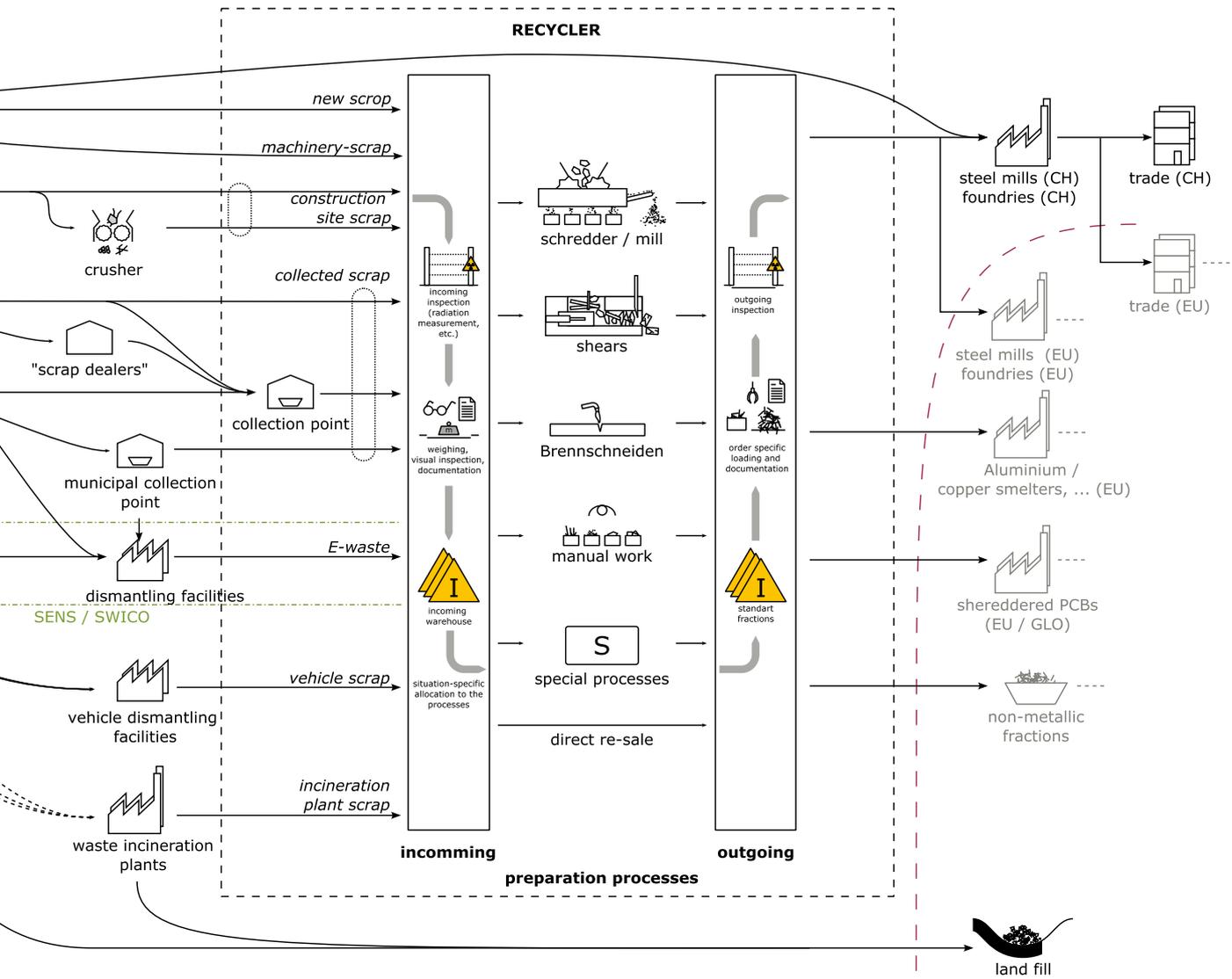
Hier steht die Integration sensorischer Technologien in reale Prozessketten im Fokus: Wie verändern sich Logistik, Sortierlogik und Verarbeitungsschritte, wenn präzisere Materialinformationen verfügbar sind? Zusätzlich haben wir Herausforderungen wie Heterogenität, Vermischung und Prozessineffizienzen analysiert.

Die Analyseergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Schweizer Metallkreislaufwirtschaft besteht aus einem verzweigten System von Sammelstellen, Rücknahmewegen und spezialisierten Aufbereitungsprozessen. Metalle gelangen über kommunale und organisierte Rücknahmesysteme (z. B. SENS, SWICO) zu Recyclerbetrieben, wo sie sortiert, verarbeitet und als standardisierte Fraktionen weitergegeben werden.
- Einzelne Komponenten können direkt dem Wiederverkauf zugeführt werden. Der überwiegende Teil durchläuft jedoch klar definierte Wege der stofflichen Verwertung oder Ausschleusung.
- Die Qualität des Recyclings hängt wesentlich von der Zusammensetzung und Sortenreinheit der Inputmaterialien ab. Da das System stark vernetzt ist und Materialien aus verschiedenen Quellen gemeinsam verarbeitet werden, kann die selektive Optimierung einzelner Fraktionen – etwa durch gezielte Triage oder «Rosinenpickerei» – unbeabsichtigt die Gesamtqualität verschlechtern.



Fazit: Eine wirksame Kreislaufwirtschaft erfordert eine systemische Perspektive, in der Materialflüsse nicht isoliert, sondern koordiniert und ganzheitlich gestaltet werden.

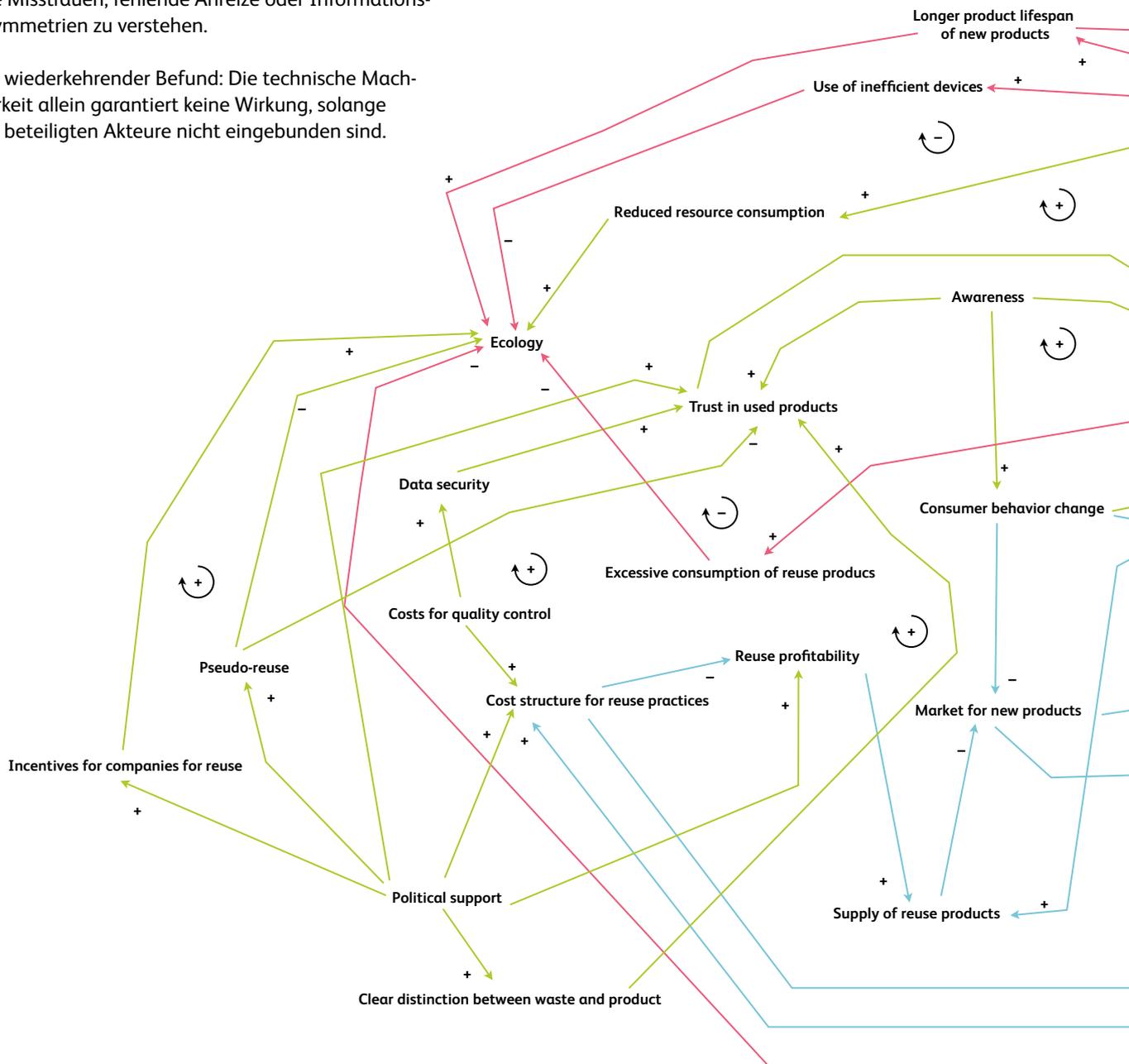


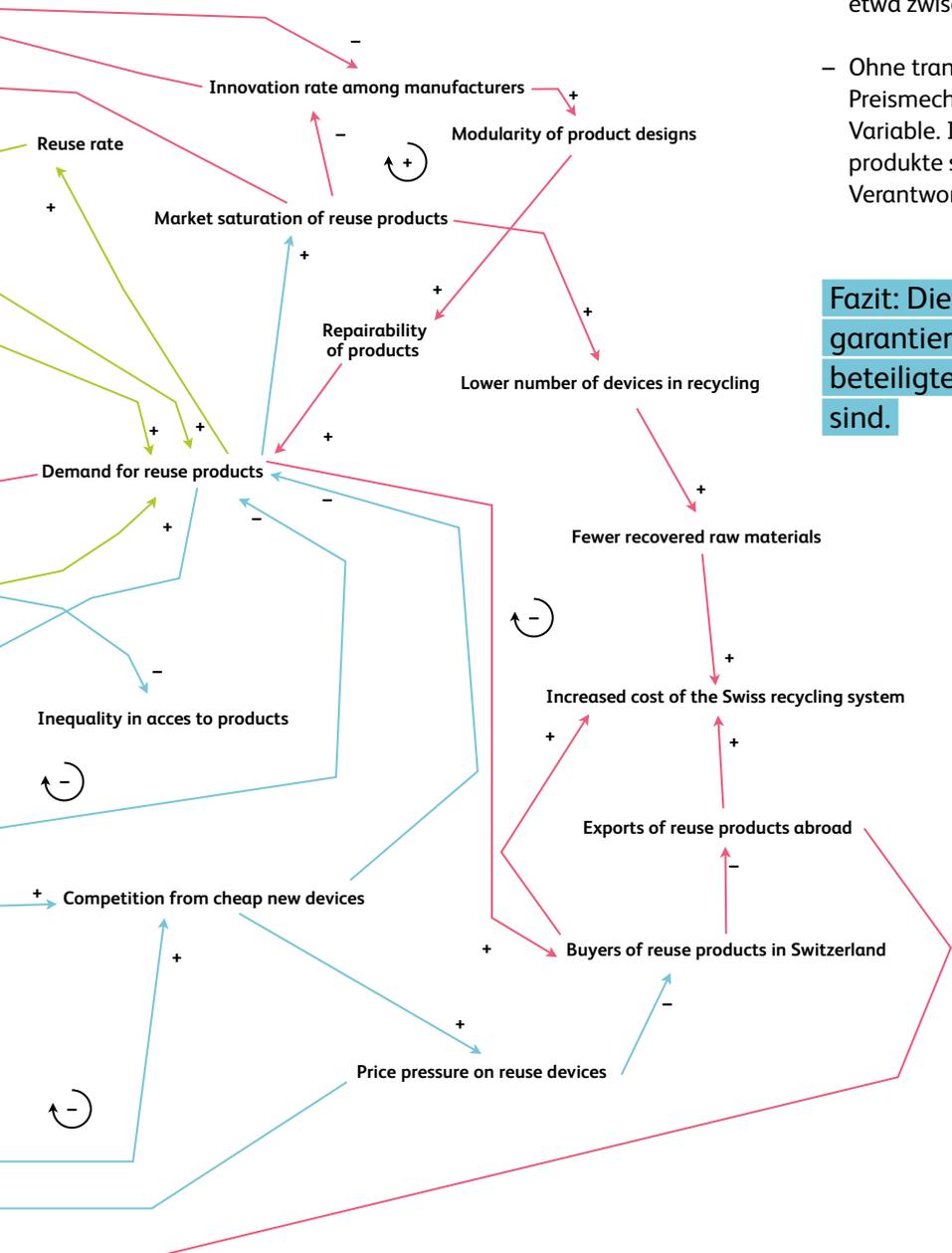
↑
Das System ist geprägt von komplexen Materialflüssen und Prozessketten.

3. Akteure und deren Verhalten

Technologien und Prozesse wirken nicht im Vakuum – sie interagieren mit Menschen, Organisationen und Institutionen. Diese Ebene beleuchtet die Rollen, Interessen und Kooperationslogiken entlang der Wertschöpfungskette. Sie hilft, Umsetzungsbarrieren wie Misstrauen, fehlende Anreize oder Informationsasymmetrien zu verstehen.

Ein wiederkehrender Befund: Die technische Machbarkeit allein garantiert keine Wirkung, solange die beteiligten Akteure nicht eingebunden sind.





In unseren Interviews und Workshops wurde deutlich:

- Es besteht hohes Interesse und Eigeninitiative in der Branche
- Gleichzeitig gibt es konfligierende Anreizstrukturen, etwa zwischen Reuse- und Recyclingakteuren
- Ohne transparente Informationsmodelle und faire Preismechanismen bleibt Vertrauen eine kritische Variable. Insbesondere beim Thema Gefahrenprodukte spielt organisatorische Klarheit über Verantwortlichkeiten eine entscheidende Rolle.

Fazit: Die technische Machbarkeit allein garantiert keine Wirkung, solange die beteiligten Akteure nicht eingebunden sind.

←
Interaktionspfade nach Farbe. Grün: Politik, Blau: Märkte, Rot: Unerwartete Effekte.

Grafik: Thorben Lotz



4. Geschäftsmodelle

Schliesslich stellt sich die Frage nach der wirtschaftlichen Tragfähigkeit: Wie lassen sich neue Technologien und Prozesse in tragfähige Geschäftsmodelle überführen? Wo entstehen neue Wertschöpfungspotenziale – z. B. durch Qualitätssicherung, Rückverfolgbarkeit oder differenzierte CO₂-Bewertungen?

Unsere ökonomische Bewertung zeigt, dass durch sensorbasierte Systeme Mehrwerte von über 100 CHF pro Tonne realistisch sind – sei es durch Qualitätsdifferenzierung, Prozessoptimierung oder Risikoabsicherung.

Zentrale Hebel sind:

- Neue Erlösmodelle (z. B. für qualitätsbasierten Schrottverkauf)
- Betriebsoptimierung als Dienstleistung (z. B. durch Benchmarking von Prozessdaten)
- CO₂-Bewertung pro Charge im Sinne eines digitalen Zwilling, der Scope-1- bis Scope-3-Zuordnungen ermöglicht

Allerdings zeigt sich: Der Aufbau tragfähiger Modelle erfordert klare Datenflüsse, Verlässlichkeit und Skalierbarkeit – und damit häufig eine enge Zusammenarbeit zwischen Technologieanbietern und Recyclerbetrieben.

Fazit: Der Aufbau tragfähiger Modelle erfordert klare Datenflüsse, Verlässlichkeit und Skalierbarkeit – und damit häufig eine enge Zusammenarbeit zwischen Technologieanbietern und Recyclerbetrieben.

Anwendungspotenziale von Sensorsystemen zur Stärkung zirkulärer Metallflüsse

Die Einführung intelligenter Sensorsysteme eröffnet eine Vielzahl konkreter Anwendungsmöglichkeiten entlang der Wertschöpfungskette von Metallen. Die folgenden vier Einsatzfelder wurden im Rahmen zweier HSLU-Forschungsprojekte identifiziert und im praktischen Kontext untersucht:

1. Produktklassifikation für Triage

Eine zentrale Herausforderung in der frühen Phase des Rücknahme- und Sortierprozesses ist die effiziente und verlässliche Klassifikation von Produkten. Visionbasierte Sensorsysteme, häufig in Kombination mit maschinellem Lernen, ermöglichen die automatisierte Identifikation von Objekten auf Basis visueller Merkmale wie Form, Farbe oder Struktur. Dadurch können Produkte bereits beim Eingang triagiert werden – also einer potenziellen Wiederverwendung oder dem Recycling zugeordnet werden. Neben einer Effizienzsteigerung in der Qualitätskontrolle unterstützt diese Technologie insbesondere Geschäftsmodelle im Bereich Reuse und verlängert die Nutzungsdauer von Produkten.

2. Erkennung von Gefahrenprodukten

Mit der Zunahme komplexer Geräte und elektronischer Komponenten steigt das Risiko, dass gefährliche oder sicherheitskritische Bestandteile – etwa Akkus oder Druckbehälter – unerkant in den Recyclingprozess gelangen. Sensorische Detektionssysteme wie Thermografie, Röntgentechnologien oder KI-gestützte Bildauswertung können solche Gefahren frühzeitig identifizieren. Dies trägt nicht nur zur Betriebssicherheit bei, sondern reduziert auch Prozessinstabilitäten, minimiert Störungen und senkt potenzielle Haftungsrisiken.

3. Materialbewertung nach Qualität

Ein zentrales Ziel der Kreislaufwirtschaft ist die möglichst hochwertige stoffliche Wiederverwertung. Sensorsysteme können durch spektroskopische Verfahren wie LIBS oder Röntgenfluoreszenz die chemische Zusammensetzung von Metallen direkt im Prozess analysieren und bewerten. Dies ermöglicht eine taxative Einordnung der Materialien nach Qualität und schafft die Grundlage für qualitätsdifferenzierte Preise, verbesserte Prozessauslegung und höhere Wertschöpfung – insbesondere in der metallurgischen Weiterverarbeitung.

4. Volumetrische Analyse im Prozessfluss

Neben qualitativen Informationen ist auch die präzise Erfassung von Mengenströmen entscheidend für eine effiziente Kreislaufführung. Sensorsysteme zur volumetrischen Analyse – etwa 3D-Scanner oder Durchsatzsensoren – ermöglichen die Echtzeiterfassung des Materialflusses. Dadurch können Anlagen besser gesteuert, Logistikketten optimiert und Engpässe frühzeitig erkannt werden. Die so gewonnene Transparenz unterstützt nicht nur betriebliche Effizienz, sondern bildet auch die Grundlage für datengetriebene Optimierungs- und Benchmarkingmodelle.

Anwendungspotenziale von Sensorsystemen im System

Betrachtungsebene	Produkteklassifikation für Triage	Erkennung von Gefahrenprodukten	Materialbewertung nach Qualität	Volumetrische Analyse im Prozessfluss
Sensortechnologien	Vision-basierte Systeme ermöglichen automatisierte Objekterkennung (z. B. Form, Farbe) zur Klassifikation – oft ML-gestützt	Multisensorische Detektion wie Thermografie, Röntgen, Bilderkennung erkennt Gefahrenprodukte wie Akkus zuverlässig	Spektroskopie (z. B. LIBS, Röntgenfluoreszenz) oder bestimmt chemische Zusammensetzung für Qualitätsbewertung.	3D-Scanner, Gewichtssensoren und Durchsatzmessung liefern Volumendaten für die Prozesssteuerung
Materialflüsse & Prozesse	Sortierlogik wird automatisiert; Triage an der Quelle möglich	Prozessrisiken werden reduziert, Anlagenstillstände vermieden	Besseres Matching von Materialeigenschaften und Verwertungspfad	Steuerung und Auslegung von Förderstrecken, Puffern etc. werden datengestützt
Akteure & Verhalten	Erhöht die Sicherheit und Akzeptanz, indem Unsicherheiten bzgl. Gerätezustand reduziert werden. Erleichtert eine frühzeitige Trennung für Wiederverwendung und motiviert Akteure zur systematischen Sichtung von Potenzialträgern.	Reduziert Unsicherheiten im Hinblick auf Reuse / Refurbish. Steigert die Betriebssicherheit und senkt Haftungsrisiken. Verbessert die Trennschärfe bei der Produktbewertung in Annahmestellen.	Stärkt Anreize für qualitativ hochwertige Rückführung / Reuse. Recycler können gezielt in Qualität investieren, was zu höherem Materialwert / Reuse Produktwert führt. Fördert Transparenz und reduziert Informationsasymmetrien zwischen Sammelstellen, Aufbereichern und Verwertern für Reuse and Recycling.	Reduziert operative Unsicherheiten und fördert eine datenbasierte Ressourcenplanung. Stärkt Steuerungskompetenz und Kapazitätsmanagement.
Geschäftsmodelle	Unterstützt Reuse-basierte Modelle (z. B. Komponentenausbau & Wiederverkauf)	Ermöglicht risikobasierte Preismodelle oder Rücknahmeverpflichtungen	Grundlage für qualitätsbezogene Preisdifferenzierung und Bonus-Malus-Systeme	Grundlage für Optimierungsdienste, Pay-per-Use-Modelle oder Benchmarking

Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Metallkreislaufwirtschaft in der Schweiz

Unsere Analysen zeigen: Sensorsysteme, digitale Informationsflüsse und ein systemisches Verständnis der Material- und Akteurslandschaft besitzen das Potenzial, die Schweizer Metallkreislaufwirtschaft deutlich zu stärken. Auf Basis der bisherigen Untersuchungen lässt sich ein Einsparpotenzial von 0.12 t CO₂-eq pro Tonne durch optimierte Prozesspfade und geringeren Einsatz von Primärmaterialien nachweisen.

Selbst unter konservativer Annahme – etwa 300'000 Tonnen Metallschrott, die künftig hochwertiger recycelt werden – ergibt sich eine potenzielle CO₂(eq.)-Einsparung von rund 36'000 Tonnen pro Jahr. Gleichzeitig könnte ein wirtschaftlicher Mehrwert von etwa 30 Millionen CHF jährlich generiert werden.

Damit dieses Potenzial ausgeschöpft wird, braucht es gezielte Weiterentwicklungen auf technischer, organisatorischer und politischer Ebene.

Forschende der HSLU diskutieren Möglichkeiten für mehr Kreislaufwirtschaft.
↓



Zentrale Handlungsfelder:

– **Sensorik systematisch implementieren:**

Der gezielte Einsatz von Sensortechnologien – insbesondere in der Eingangssortierung und Qualitätsbewertung – sollte flächendeckend pilotiert, evaluiert und in bestehende Infrastrukturen integriert werden.

– **Transparente und standardisierte Datenmodelle aufbauen:**

Nur durch verlässliche, interoperable Informationssysteme kann die Rückverfolgbarkeit verbessert und eine verursachergerechte CO₂-Bewertung ermöglicht werden.

– **Kooperation und Vertrauen stärken:**

Die hohe Komplexität der Kreislaufwirtschaft erfordert abgestimmte Anreizsysteme und gemeinsame Datenräume – statt individueller Insellösungen.

– **Reuse systematisch mitdenken:**

Wiederverwendung darf nicht länger als Ausnahme, sondern muss als integraler Bestandteil des Systems betrachtet und gefördert werden – technologisch, wirtschaftlich und regulatorisch.

