FG Sustainable Engineering & Management
Prof. Dr.-Ing. Sandra Krommes

Technische Hochschule Rosenheim

Systemdynamische Simulation des Recycling-potentials von Indium aus End-of-Life Produkten

Ilona Borchardt, Sandra Krommes und Rosina Rieder

1. Einleitung

Bedeutende Zukunftstechnologien wie Dünnschicht-Photovoltaik (PV) -Module oder aus dem Alltag nicht mehr wegzudenkende Liquid Crystal Display (LCD)-Anwendungen in Tablets und Smartphones basieren auf den Stoffeigenschaften von Indium (In). Wachsende Märkte und kurze Innovationszyklen generieren einen steigenden Bedarf dieses kritischen Rohstoffs. Daher wird untersucht, welchen Beitrag das Recycling von In aus End-of-Life (EoL) Produkten für die zukünftige Rohstoffversorgung leisten kann. Während einzelne Materialien von LCD- und PV-Anwendungen werkstofflich verwertet werden, ist das Indium-Recycling derzeit < 1 % des Sekundärroh-stoffaufkommens. Dies hat vor allem wirtschaftliche Gründe [1, 2]

2. Methode und Vorgehen

Stoffkreisläufe zu analysieren, bedeutet, dass Verhalten eines komplexen, dynamischen Systems zu verstehen. Diese Analyse nutzt den System Dynamics Ansatz, um Kausalitäten und Einflussfaktoren des realen Systems abzubilden und mittels Simulation Informationen zur Bewertung bereitzustellen [4, 5]. Dabei geht der quantitativen Modellierung mit System Dynamics eine Systemanalyse – von Primäranwendungen über Nutzung bis Recyclingtechnologien – sowie ein qualitatives Ursache-Wirkungs-Diagramm voraus [2]. Damit lassen sich zeitvariante Materialströme, dynamische Zeitverzögerungen sowie Rückkopplungen im Modell abbilden (Abb. 1).

3. Ergebnisse

Die Simulationen zeigen, dass das Sekundärrohstoffpotential, d.h. das Indium, das sich in ausgedienten LCD-Anwendungen oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS)-PV-Modulen unter Berücksichtigung des Nutzungsverhaltens und der Sammelquoten kumuliert, stetig steigt (Abb. 2). Ursächlich sind die zunehmende Nutzung von LCD-Anwendungen mit kurzer Lebensdauer und das die kommenden Jahre exponentiell wachsende Schrottaufkommen an CIGS-PV-Anlagen, die ab 2010 installiert wurden. Langfristig nimmt dabei das Sekundär-rohstoffpotential aus CIGS-PV überproportional gegenüber LCD-Anwendungen zu. Dies ist auf das steigende Schrottaufkommen und deren grundsätzlich höheren Indium Gehalt zurückzuführen. Produkt-analysen zeigen allerdings eine deutliche Varianz des genauen In-Gehalts in CIGS-PV Modulen [2], von der das tatsächliche Sekundär-rohstoffpotential stark abhängt (Abb. 3).

4. Diskussion

Derzeit werden etwa 800 t In pro Jahr als Kuppelprodukte von Zink- und Kupfererzen produziert (Raffinade). In 2030 wird ein weltweiter Bedarf von 1.900 t des Rohstoffs prognostiziert [3]. Zwar kann das Sekundär-Indium den weltweiten Bedarf zukünftig bei Weitem nicht decken, jedoch könnte das Sekundär-Indium in der nächsten Dekade einen Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten. Vor allem in Ländern, die über keine natürlichen Indium-Reserven verfügen oder hinsichtlich der Abhängigkeit von der Kuppelproduktion könnte der Rohstoffmarkt entlastet werden. Deutschland hat ein Potential von 10-15 t In bis 2030, das sich bis 2045 auf 30-60 t In summiert (Abb. 2).

Die Hebung der Sekundärrohstoffpotentiale fordern den Ausbau von Recyclingkapazitäten. Dies scheitert derzeit u.a. an der fehlenden Wirtschaftlichkeit. Zwar führen steigende Stoffströme zu Skalen-effekten, jedoch wird eine Wirtschaftlichkeit des Recycling erst bei sinkenden Recyclingkosten und steigenden Marktpreisen erreicht [2].

5. Schlussfolgerungen

Das Sekundärrohstoffpotential von Indium aus EoL-Produkten wird ab der nächsten Dekade stetig zunehmen und kann die Rohstoff-kritikalität bei steigender Nachfrage dämpfen. Ein Hebel zur Realisierung des Recyclingpotentials liegt in der Wirtschaftlichkeit und damit in der Weiterentwicklung der Recyclingtechnologie und Kapazität. Aufgrund der Kuppelproduktion fällt die Ökobilanz zwar zu Gunsten von Primär- gegenüber Sekundär-Indium aus. Dies ändert sich indes bei anderer Allokation der Umweltwirkungen zwischen Haupt- und Nebenprodukt [6]. Das Recycling von Indium ist daher für eine nachhaltige Energiewende und Rohstoffversorgung unerlässlich.

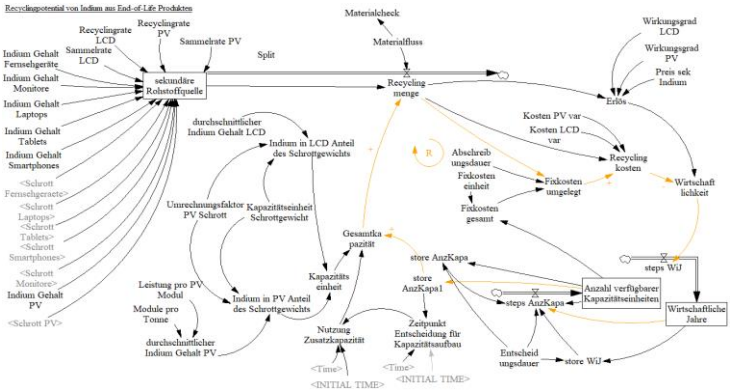

Abb. 1: System Dynamics Modell „Recyclingpotential von Indium aus EoL-Produkten“ [2]

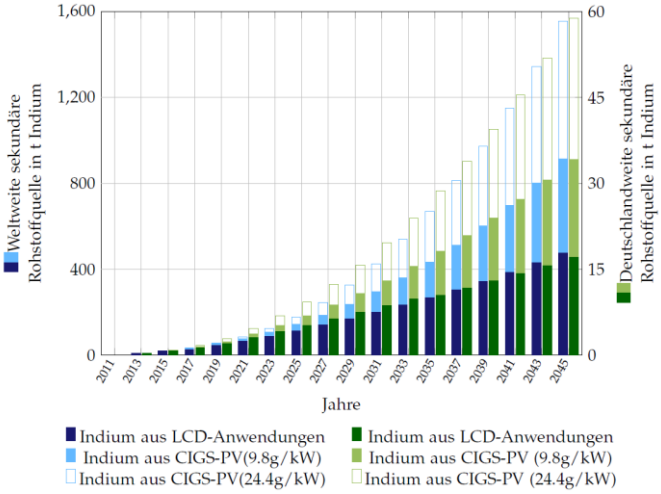

Abb.2 Deutschland- und weltweite sekundäre Rohstoffquelle Indium im Basis-Szenario (kumulative Darstellung, Annahmen: keine Verwertung von Indium, Minimum-Maximum-Gehalt von Indium in CIGS-PV) [2]

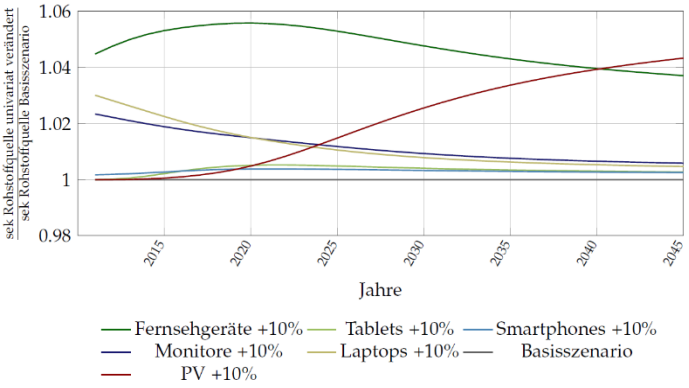

Abb.3 Sensitivität der sekundären Rohstoffquelle gegenüber In-Gehalt von Primäranwendungen in Relation zum Basis-Szenario (Annahme: univariate Erhöhung des In-Gehalts pro Anwendung: + 10%) [2].

Quellen

[1] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D.. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment, Öko-Institut, Freiburg, 2012.
[2] Borchardt, I., Systemdynamische Simulation des Recyclingpotentials von Indium aus End-of-Life Produkten, Rosenheim, 2018.
[3] Angerer, G. et al., Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Karlsruhe und Berlin, 2009.
[4] Forrester, J. W., Industrial Dynamics, Mansfield, 2013.
[5] Bossel, H., Systeme, Dynamik, Simulation; Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme, Norderstedt, 2004.
[6] Böni et al., Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym, Zürich, 2015.