



## Einsatz von Computersimulationen zur Untersuchung der Entwicklung von wiederverwendeten Photovoltaikmodulen und Lithium-Ionen-Batterien in einer Kreislaufwirtschaft

Das beispiellose Wachstum im Bereich Photovoltaik (PV) von einer global installierten Leistungskapazität von rund 200 GW im Jahr 2015 auf voraussichtlich 4500 GW bis 2050 ([IRENA, 2016](#)) wirft die Frage auf, was mit den immer grösseren Mengen an Photovoltaikmodulen am Ende ihrer Lebensdauer (EOL – End of Life) geschehen soll. Allerdings sind nicht nur die regulär verbrauchten Panels ein Problem. Es hat sich gezeigt, dass viele PV-Anlagen noch vor Ablauf ihrer theoretischen Lebensdauer ersetzt werden, um die durch den technologischen Fortschritt möglichen, höheren Wirkungsgrade nutzen zu können.

Eine ähnliche Situation ist für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) von Elektrofahrzeugen vorhersehbar, die nach ihrem Einsatz in Fahrzeugen als stationäre Energiespeicher für erneuerbare Energiequellen wiederverwendet werden könnten. Genau wie bei den PV-Modulen sind die voraussichtlichen Mengen an ausrangierten Elektrofahrzeugbatterien im nächsten Jahrzehnt alarmierend hoch.

### CIRCUSOL

Eine der Strategien, die vom [CIRCUSOL](#)-Konsortium untersucht werden, betrifft die Wiederaufbereitung von ausgedienten, defekten oder beeinträchtigten PV-Modulen, um sie als Gebrauchtprodukte wiederverwendbar zu machen. Schätzungen gehen davon aus, dass bis zu 80 Prozent des PV-Abfalls durch Produktionsfehler, Transportschäden oder produktbezogene Kinderkrankheiten entstehen, welche in den ersten vier Betriebsjahren der Panels. Nur ein kleiner Prozentanteil werden nach dem Ablauf der vorgesehenen technischen Produktlebensdauer entsorgt. [IMEC](#), einer der Partner von CIRCUSOL, geht in einer kürzlich veröffentlichten Publikation davon aus, dass rund 45 bis 65 Prozent der ausgemusterten PV-Module repariert/aufbereitet und als Gebrauchtpanels wiedervermarktet werden können.

Eine zweite wichtige, von [CIRCUSOL](#) geförderte Strategie zielt auf die Beseitigung von Hindernissen für die Wiederverwendung von gebrauchten Elektrofahrzeugbatterien als Speichermedien für erneuerbare Energie ab. Zu diesem Zweck arbeiten die Konsortiumspartner an der Verbesserung der Technologien zur Wiederaufbereitung von Batterien auf Zellebene und an der Entwicklung von Labels und Zertifikaten, die das Vertrauen in den Markt stärken sollen.

### Verwendung eines systemdynamischen Simulationsmodells für die Szenario- und Massnahmenanalyse sowie Folgenabschätzung

Die Abteilung [Wirtschaftsingenieurwesen](#) der [Berner Fachhochschule](#) entwickelt ein mathematisches Modell, um die Dynamik der Material- und Informationsflüsse in den verschiedenen Lebenszyklusphasen von PV-Modulen und Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zu identifizieren, wozu die Herstellung, die Inventarisierung, der Transport, die Installation, die Geschäftsmodelle für die Erst- und die Wiederverwendung sowie das Sammeln und das Recyceln zählen.

Das Simulationsmodell, das auf der Methodik der Systemdynamik basiert, hat die Szenario- und Massnahmenanalyse zum Ziel und berücksichtigt dabei rechtliche, soziale, technische, ökologische und wirtschaftliche Treiber und Hindernisse von kreislaufwirtschaftlichen Geschäftsmodellen. Es wird geschätzt, dass es mit dem Modell möglich sein wird, die langfristigen (25 bis 40 Jahre) Auswirkungen politischer Interventionen auf die relevanten Key Performance Indikatoren (KPI) der Kreislaufwirtschaft zu berechnen.



Das Ökosystem, in dem die Wiederverwendung von PV-Panels und die Weiternutzung von Batterien stattfindet, ist komplex. Darum braucht es ein Werkzeug, das Entscheidungsträgern dabei hilft, effektiv mit den unerwarteten Folgen von nichtlinearem Verhalten, Akkumulationen, verzögerten Ursache-Wirkung-Beziehungen sowie Informationsrückmeldungen umzugehen.

Die Computersimulation kann Entscheidungsträger beispielsweise dabei unterstützen, das PV-/LIB-Ökosystem sowohl aus Geschäfts- und Kundensicht als auch aus einer breiteren wirtschaftlichen Perspektive einzuschätzen. Je nach Geschäftsmodell könnte aus erstgenannter Sicht die Dynamik der Marktakzeptanz, die Finanzierungsmethoden oder die geschäftliche Rentabilität untersucht werden, während aus zweitgenannter Sicht der Substitutionseffekt von Primär- und Sekundärproduktion, die Material- und Produktpreise oder der Rebound-Effekt im Zentrum stehen könnten.

Fokusgruppen und Einzelinterviews mit ausgewählten Projektbeteiligten unter Verwendung wissenschaftlicher Literatur werden als Hauptinformationen für die Konzeptualisierung und Validierung des Simulationsmodells dienen.

### **Was ist Systemdynamik (SD)?**

Unter Systemdynamik ist eine Computersimulationsmethodik zu verstehen, die aus einem ineinandergreifenden Satz von algebraischen und Differentialgleichungen besteht. Sie zielt darauf ab, komplexe Rückkopplungssysteme besser verstehen zu können und gleichzeitig Entscheidungsträgern dabei zu helfen, geeignete Strategien zu entwickeln. Systemdynamik betrachtet eher Zusammenhänge als Ereignisse und konzentriert sich nicht auf statische Momentaufnahmen, sondern auf Veränderungen und Muster, welche im Zeitverlauf auftreten.

In ihrer Notation nutzt die SD Bestände, Flussgrößen und Parameter, um das komplexe Verhalten verschiedener Systeme zu modellieren. Dabei fassen Bestände die Differenz zwischen Zu- und Abflüssen zusammen, während Flussgrößen Funktionen des Bestandes und anderer Parameter sind. Parameter sind numerische Werte, die während der Simulation konstant bleiben und andere Variablen und Raten im Modell beeinflussen.

### **Abteilung Wirtschaftsingenieurwesen der BFH**

Die Abteilung Wirtschaftsingenieurwesen beschäftigt sich mit der Entwicklung von Managementmethoden und -werkzeugen für die Analyse, Modellierung, Simulation und Validierung von komplexen Geschäftsökosystemen und auch der Dynamik von Geschäftsmodellen. Weitere relevante Projekte unserer Forschungsgruppe neben CIRCUSOL sind:

- ProsumerLab, das die Dynamik von Prosumern untersucht, also von Nutzern, die nicht nur Energie verbrauchen, sondern auch Energie produzieren. Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, dass der steigende Anteil von Photovoltaik- und Batteriespeichersystemen den nationalen Netzstrombedarf der Haushalte in der Schweiz bis 2050 um 9 Prozent senken wird. Daneben zeigt das Projekt auf, dass die Zunahme von Elektrofahrzeugen (EV) den Netzstrombedarf der Haushalte bis 2050 potenziell um 8 Prozent erhöhen wird.
- Use-it-wisely, bei dem sowohl qualitative als auch quantitative Modelle eingesetzt werden, um Wege zur Verlängerung der Lebenszyklen in kapitalintensiven Bereichen (z. B. Bergbau, Schifffahrt, Raumfahrt, Züge, Lastwagen, Büromöbel) zu analysieren.
- Das Projekt Medicine Shortages untersucht aus einer Ökosystemperspektive, wie Engpässe in der Arzneimittelversorgung in der Schweiz erkannt, reduziert oder vermieden werden können.

### **Kontakt**

Prof. Dr. Stefan Groesser

Dr. Maria Franco