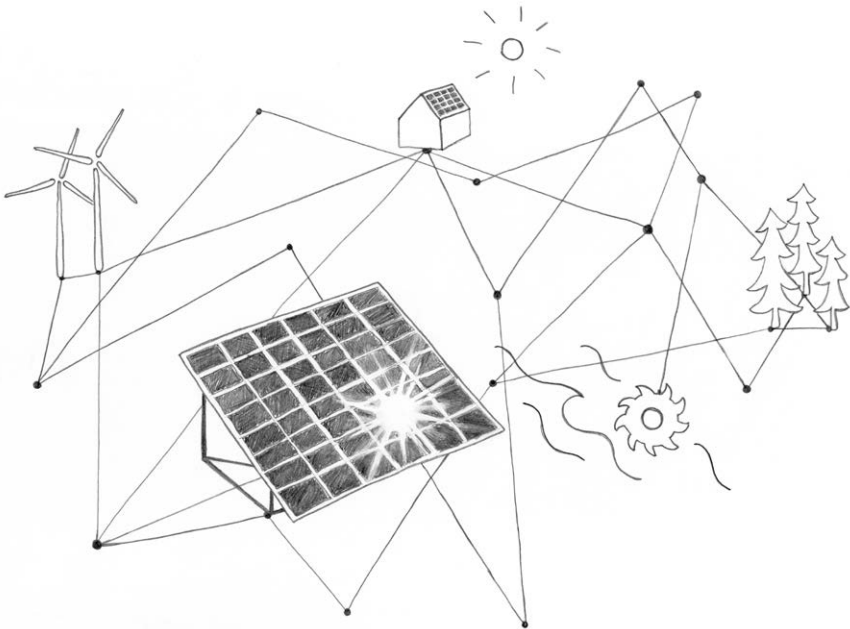


LACE Wissenstransfer-Notiz Nr. 2

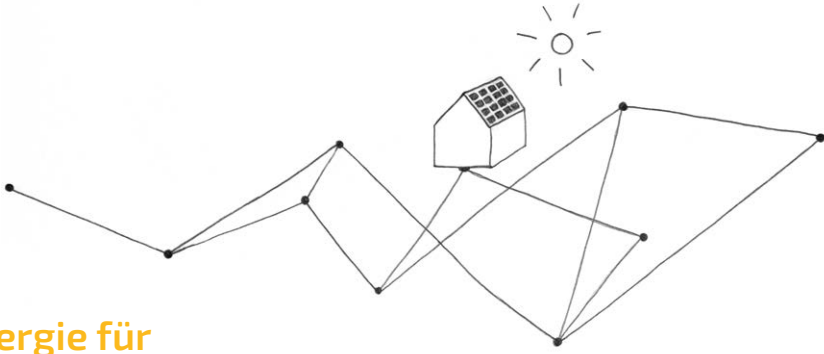
Eine Kreislaufwirtschaft mit erneuerbaren Energien betreiben?

Solarenergie ist die erneuerbare Ressource mit dem grössten Potenzial, zukünftig weltweit den Energiebedarf für eine wachsende Bevölkerung und die Entwicklung einer kreislauforientierten und nachhaltigen Wirtschaft zu decken.



Verweis auf das ursprüngliche Forschungspapier:

Desing, H., Widmer, R., Beloin-Saint-Pierre, D., Hischier, R. & Wäger, P. (2019). Powering a Sustainable and Circular Economy - An Engineering Approach to Estimating Renewable Energy Potentials within Earth System Boundaries. *Energies*. 2019; 12(24):4723. <https://doi.org/10.3390/en12244723>



Energie für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

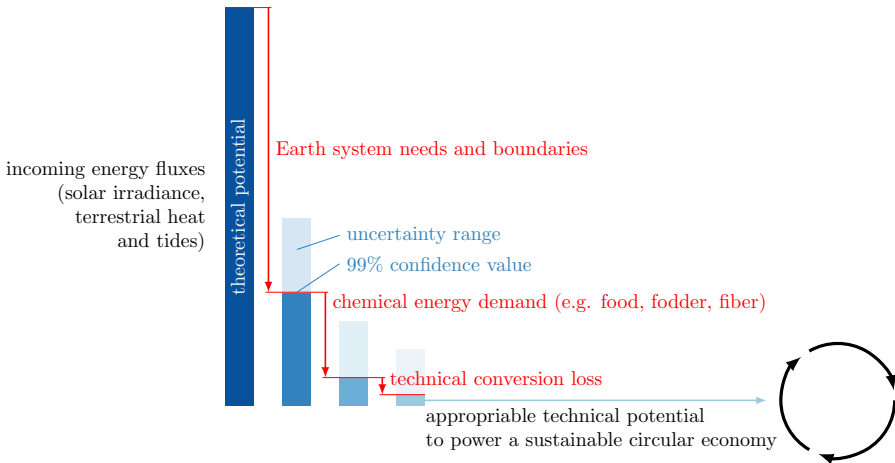
Die Kreislaufwirtschaft wird als vielversprechende Strategie zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Verbrauch natürlicher Ressourcen und der Umweltzerstörung wahrgenommen. Bis jetzt hat sich der Diskurs über Kreislaufwirtschaft jedoch auf Materialien und Lösungen wie Recycling, Wiederverwendung und Reparatur konzentriert, ohne zu prüfen, ob die Energie, um diese Aktivitäten umzusetzen, verfügbar ist. Da einerseits die Nutzung fossiler Brennstoffe enorme Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit hat, und sich andererseits bei der Kernenergie die Uranvorräte erschöpfen und das Risiko katastrophaler Unfälle besteht, kann man keine auf diesen Energiequellen basierende Wirtschaft als nachhaltig betrachten. Vor dem Hintergrund der sich verschärfenden Klimakrise und des Verlusts der Biodiversität **ist ein Übergang zu erneuerbaren Energien von entscheidender Bedeutung, um eine Kreislaufwirtschaft auf nachhaltige Weise zu betreiben.**

Die Flüsse erneuerbarer Energien, die auf den Planeten gelangen, versorgen das Erdsystem mit Energie und halten beispielsweise den Wasserkreislauf in Gang. Die menschliche Nachfrage nach Energie, Nah-

rungsmitteln oder biobasierten Materialien kann den Energiebedarf des Erdsystems stören und mit ihm konkurrieren. Diese «Konkurrenz» wirft die folgende Frage auf: **Kann die Menschheit ihren technischen Energiebedarf aus erneuerbaren Energien befriedigen, ohne die Grenzen des Erdsystems zu überschreiten?**

Die obige Frage steht im Mittelpunkt der Forschung, die von Wissenschaftlern der Empa, der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, im Rahmen des schweizerischen Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft» (NFP 73) – Projekt «Laboratory for Applied Circular Economy» (LACE) – durchgeführt wurde. Diese kürzlich veröffentlichte Forschungsarbeit entwickelt **einen breit angelegten theoretischen Analyserahmen, um die Flüsse erneuerbarer Energien abzuschätzen, die potenziell auf globaler Ebene verfügbar sind, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu betreiben.** Der Analyserahmen berücksichtigt sowohl die relevanten Erdsystemgrenzen und den menschlichen Bedarf an chemischer Energie als auch die Umwandlungsverluste der aktuellen Technologien.

Wie viel erneuerbare Energie kann genutzt werden?



Flüsse erneuerbarer Energien, die in das Erdsystem gelangen und vom Erdsystem selbst und zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse genutzt werden (Abbildung der Autoren).

Die Autoren gehen von der Gesamtmenge der in das Erdsystem eintretenden Flüsse erneuerbarer Energien aus und nennen sie «theoretisches Potenzial» (siehe Abbildung oben). Diese Menge umfasst die Sonneneinstrahlung, die Erdwärme und die Gezeiten. Der Anteil dieses theoretischen Potenzials er-

neuerbarer Energien, der für den Betrieb der mit dem Menschen verbundenen Systeme, zum Beispiel einer Kreislaufwirtschaft, zur Verfügung steht, wird als «aneigenbares technisches Potential» (*appropriable technical potential*) bezeichnet und ist durch drei Faktoren begrenzt:

1

Bedürfnisse des Erdsystems: Der größte Teil der eintretenden erneuerbaren Energien ist für den Antrieb natürlicher Prozesse unerlässlich. Zum Beispiel kann der Wasserkreislauf nicht funktionieren, ohne dass die Sonne die Energie für die Verdunstung von Wasser und für den Transport von Wolken durch Winde liefert. Das Konzept der planetaren Grenzen (siehe Kasten auf Seite 4) wird verwendet, um die Grenze zu bestimmen, ab wann die Nutzung von erneuerbaren Energien den Planeten irreversibel verändern und langfristig unbewohnbar machen würde. In der Studie werden zwei Grenzen explizit berücksichtigt: Landnutzungsänderungen (weil die Gewinnung erneuerbarer Energien meist von der verfügbaren Landfläche abhängt) und die Entnahme von Süßwasser (das zum Beispiel für die Wasserkraft wichtig ist).

2

Menschlicher Bedarf an chemischer Energie: Ein grosser Teil der verbleibenden erneuerbaren Energien wird vom Menschen in Form von Nahrungsmitteln und für andere Verwendungszwecke von Biomasse, zum Beispiel als Fasern für Kleidung, genutzt. Diese Energie steht jedoch nicht für die technische Energienutzung zur Verfügung. Da die menschlichen Aktivitäten bereits mehrere landnutzungsbezogene Grenzen überschreiten, wird eine weitere Nutzung von chemischer Energie, beispielsweise für die Produktion von Biokraftstoffen, als nicht nachhaltig angesehen.

3

Technisches Potenzial: Zieht man vom theoretischen Potenzial die für das System Erde benötigten erneuerbaren Energien sowie den chemischen Energiebedarf der heutigen und der zukünftigen menschlichen Bevölkerung ab, erhält man die für den Betrieb der Technosphäre verfügbaren erneuerbaren Energien. Unter Berücksichtigung der Verluste zur Umwandlung in elektrische Energie kann schließlich das nutzbare technische Potenzial abgeschätzt werden.

Was sind planetare Grenzen?

Das Konzept der planetaren Grenzen definiert einen sicheren Handlungsspielraum für die gesellschaftliche Entwicklung auf lange Sicht, basierend auf den biophysikalischen Grenzen der Erde. In diesem Konzept werden die Grenzwerte von neun verschiedenen wichtigen Erdsystemprozessen festgelegt. In dieser Studie werden die folgenden zwei Indikatoren berücksichtigt:

Die *Landnutzungsänderung* ist einer der wichtigsten Treiber für die Veränderung der Erdsystemprozesse. Der Indikator beschreibt, wie viel der einheimischen Vegetation eines Gebietes entfernt wurde, und legt ein maximales nachhaltiges Niveau für die Entfernung von Vegetation fest. Dies ist wichtig, da menschliche Störungen natürlicher Ökosysteme direkte Auswirkungen auf das Klimasystem und die Artenvielfalt haben können. Das Konzept der planetaren Grenzen konzentriert sich auf die Abholzung von Wäldern (wegen der starken Auswirkungen der Entwaldung). In dieser Studie werden jedoch auch Nicht-Wald-Ökosysteme (wie Grasland, Tundra usw.) berücksichtigt, um die Analyse zu erweitern.

Die *Süswassernutzung* beschreibt die Grenze für die nachhaltige Nutzung von Wasser aus Flüssen und Seen durch den Menschen. Dieser Indikator gibt die maximale monatliche Wasserentnahme aus Gewässern vor, basierend auf dem Mittelwert zwischen den niedrigsten und den höchsten jährlichen Abflusswerten.

Welche erneuerbare Energie ist der Schlüssel für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft?

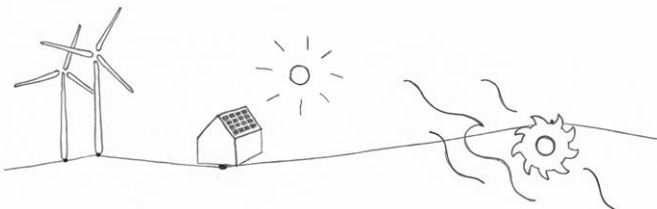
Von den Flüssen erneuerbarer Energien, die in das Erdsystem eintreten, dominiert die Sonnenenergie bei weitem (99,97 Prozent) – damit ist sie die zentrale Energiequelle für den Antrieb aller natürlichen und anthropogenen Prozesse. Zieht man den Energiebedarf für die Prozesse auf der Erde und den chemischen Energiebedarf des Menschen ab, verbleiben nur 0,04 Prozent des theoretischen Potenzials, das in technische Energie umgewandelt werden kann, ohne die Grenzen der Landnutzung oder der Süswassernutzung zu verletzen. Obwohl dieser Anteil klein erscheint, ist er in Wirklichkeit um ein Vielfaches grösser als der gesamte derzeitige technische Energiebedarf. **Das nutzbare technische Potenzial wird von der direkten Solarenergieumwandlung (98 Prozent) dominiert.** Alle anderen erneuerbaren Energien (z.B. Wind- und Wasserkraft sowie Erdwärme) bieten nutzbare technische Potenziale, die signifikant kleiner sind. Aus globaler Sicht sind also alle anderen Ressourcen erneuerbarer Energien zweitrangig – was nicht heißt, dass sie lokal nicht wichtig sind, insbesondere um die Schwankungen der Solarenergie auszugleichen.

Das berechnete nutzbare Solarstrompotenzial kann den derzeitigen technischen Energiebedarf weitgehend decken und lässt auch Raum für einen erheblichen Anstieg des menschlichen Energiebedarfs.

Dies ist wichtig im Hinblick auf einen potenziell erhöhten Energiebedarf, um die Bedürfnisse einer wachsenden Bevölkerung zu befriedigen, die ungleiche Verteilung von erneuerbaren Energien auszugleichen, die Umweltauswirkungen der vergangenen und zukünftigen menschlichen Aktivitäten zu mildern und die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft zu unterstützen.

Die Berechnungen zeigen auch, dass, wenn der weltweite Energiebedarf dem Richtwert einer 2000-Watt-Gesellschaft entsprechen würde, der Solarstrom aus der bebauten Umwelt allein ausreichen könnte. Eine Erhöhung des Energiebedarfs pro Kopf weltweit auf den heutigen Durchschnitt in der Schweiz würde jedoch eine zusätzliche Überbauung von bis zu 10 % aller Wüstenflächen mit Solaranlagen erfordern.

Die **Solarenergie bietet nicht nur das größte Potenzial zur Deckung des menschlichen Energiebedarfs, sie ist derzeit auch am wenigsten ausgeschöpft.** Besonders interessant ist das Potenzial, Solaranlagen auf versiegelten Flächen bestehender Gebäude auszubauen ohne dass weitere Flächen in Anspruch genommen werden müssen und somit ohne die planetaren Grenzen zusätzlich zu belasten. Anders verhält es sich bei der Wasserkraft oder der Biomasse, die bereits stark ausgeschöpft sind und deren Nutzung sich nahe oder jenseits der ökologischen Grenzen bewegt.



Fazit

Die Studie stellt einen Ansatz vor, um die nutzbare Menge an erneuerbaren Energien abzuschätzen, welche für die Versorgung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zur Verfügung stünde. Die Autoren kommen zum Schluss, dass die direkte Umwandlung von Sonnenenergie entscheidend und notwendig ist, um den Bedarf der wachsenden, zukünftigen Bevölkerung zu decken und eine mit erneuerbaren Energien betriebene Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass Solarstrom, der mit aktuellen Technologien auf der Fläche der heutigen gebauten Umwelt gewonnen werden könnte, eine globale 2000-Watt-Gesellschaft versorgen könnte. Alle anderen Quellen erneuerbarer Energien könnten die Solarenergie ergänzen und dazu beitragen, ihre Schwankungen auszugleichen. Wüsten können als Reserve für den weiteren Ausbau der Solarenergie betrachtet werden, wenn alle anderen Potenziale ausgeschöpft sind.

Energie muss jedoch weiterhin überlegt und effizient genutzt werden – auch angesichts der komplexen Aufgabe von fossilen Brennstoffen und Kernenergie wegzukommen.

Um detailliertere Lösungen zu liefern, könnten verschiedene räumliche Masstäbe berücksichtigt werden, wobei der nachhaltige Energiemix an die lokalen Bedingungen angepasst wird. Idealerweise würde der vorgeschlagene Ansatz erweitert, um Szenarien für Staaten und Regionen auszuwerten. Die zeitliche Genauigkeit beträgt derzeit ein Jahr, daher werden tägliche und saisonale Schwankungen der Flüsse erneuerbarer Energien nicht berücksichtigt. Auf der Verbraucherseite könnten Produkte so gestaltet werden, dass sie solche Schwankungen berücksichtigen und ausgleichen. Gebäude sind hierfür ein gutes Beispiel, da sie viel Energie verbrauchen und gleichzeitig viel Energie bereitstellen können.

Methode

Um die verschiedenen Energiequellen und Technologien für erneuerbare Energien zu vergleichen und zu quantifizieren, wird im Modell die elektrische Energie als Vergleichsbasis verwendet. Die Verwendung von Elektrizität als gemeinsame «Währung» ist gerechtfertigt, weil die meisten Technologien für Erneuerbare die Energie des Erdsystems in Elektrizität umwandeln können und weil die Elektrifizierung der Energie als Schlüssel für eine postfossile Gesellschaft angesehen wird.

Um die Berechnungen zu erleichtern, verwendet der Ansatz ein vereinfachtes Modell des Systems: Es werden weder Übergänge noch Temperaturänderungen berücksichtigt, die Bestände werden als konstant angesehen (keine Änderungen der Land- oder Waldbiomasse), und auch räumliche oder zeitliche Schwankungen und Unterschiede werden vernachlässigt. Außerdem werden weder der Ressourcenbedarf noch die Auswirkungen

aufgrund des Lebenszyklus (Produktion, Installation, Stilllegung usw.) der Technologien im Modell berücksichtigt.

Aufgrund der Komplexität, die sich aus der Entwicklung präziser Modelle auf der globalen Skala ergibt, wird ein vorsorgender Ansatz verfolgt. Dies bedeutet, dass im Modell eine niedrige Wahrscheinlichkeit («worst-case») der Verletzung von Erdsystemgrenzen oder technischen Grenzen gefordert wird: Es wird ein 99-prozentiges Konfidenzniveau festgelegt, was bedeutet, dass es eine 1-prozentige Chance gibt, dass das geschätzte angemessene technische Potenzial ökologisch oder technisch nicht umsetzbar ist, während 99 Prozent der plausiblen Potenziale über der für jede Ressource festgelegten Grenze liegen. Aufgrund der Ungewissheit, die mit der Entwicklung zukünftiger Technologien verbunden ist, wird das Vorsorgeprinzip auch für die technologischen Parameter angewendet. Letztere basieren auf dem Stand der Technik.

Bei den Berechnungen der nutzbaren Fläche werden drei verschiedene Szenarien, basierend auf unterschiedlichen Landnutzungsarten (Ackerland, Weide, bebaute Umgebung), eingesetzt:

- *Szenario 1: Proportional* – die insgesamt genutzte Fläche wird entsprechend den jeweiligen Anteilen im Jahr 2000 aufgeteilt;
- *Szenario 2: Weide reduzieren* – die Fläche von Ackerland und der bebauten Umgebung wird auf dem Niveau von 2010 gehalten; die Weidefläche wird auf das der planetaren Grenze entsprechende Niveau reduziert; die bebaute Umgebung darf sich in den Wüsten ausdehnen;
- *Szenario 3: Ackerland maximieren* – basierend auf Szenario 2 wird Ackerland, wann immer möglich, auf Kosten von Weideland maximiert, um das mögliche Nahrungsangebot für eine wachsende Bevölkerung zu erhöhen.

Diese Landnutzungsszenarien definieren die für die technische Energieumwandlung verfügbare Fläche. Die Szenarien wurden entwickelt, um den Einfluss verschiedener Landnutzungen auf die Endergebnisse zu testen. Da sich die gewählten Landnutzungsszenarien mit Ausnahme von Solaranlagen in der Wüste als wenig einflussreich auf die Ergebnisse erwiesen haben, wird in dieser Arbeit das Szenario 3 verwendet.

Für die Süßwassernutzung wird die maximale monatliche Flusswasserentnahme verwendet, wobei der entsprechende Grenzwert vereinfachend aus den niedrigsten und den höchsten Werten berechnet wird.

Drei verschiedene Indikatoren werden verwendet, um verschiedene Energiemixe und deren nutzbares technisches Potenzial in verschiedenen Betrachtungsrahmen (Produkt-ebene bis zur Ebene der globalen Wirtschaft) zu vergleichen: Der Indikator τ_i beschreibt den Druck auf eine Energieressource, indem er die aus jeder Ressource erzeugte Energiemenge mit ihrem nutzbaren technischen Potenzial vergleicht.

Ein zweiter nützlicher Indikator ist der *Anteil erneuerbarer Energien*: Er zeigt an, wie viel des gesamten Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt wird.

Schließlich wird ein *Indikator für erneuerbare Energien* eingeführt, der den tatsächlichen Energiemix mit dem theoretisch nutzbaren technischen Potenzial vergleicht. Dies ist wichtig, da eine optimale Nutzung aller erneuerbaren Energieressourcen erreicht wird, wenn der tatsächliche Energiemix mit dem potenziellen Energiemix übereinstimmt.

Was ist NFP 73?

Dieses Forschungsprojekt wird im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft: ressourcenschonend, zukunftsfähig, innovativ» (NFP 73) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) durchgeführt.

Das NFP 73 hat zum Ziel wissenschaftliche Erkenntnisse über eine nachhaltige Wirtschaft mit schonender Nutzung natürlicher Ressourcen, mehr Wohlfahrt und erhöhter Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Schweiz zu erarbeiten. Das NFP 73 berücksichtigt dabei die Umwelt, die Wirtschaft und die Gesellschaft, betrachtet sämtliche natürliche Ressourcen und alle Stufen der Wertschöpfungskette.



Nachhaltige Wirtschaft
Nationales Forschungsprogramm

Weitere Informationen zum Nationalen Forschungsprogramm finden Sie unter:

www.nfp73.ch

Was ist LACE?

Das Labor für angewandte Kreislaufwirtschaft (Laboratory for Applied Circular Economy, kurz LACE) ist ein inter- und transdisziplinäres Projekt, an dem Forschende aus drei Schweizer Hochschulen und aus verschiedenen Disziplinen beteiligt sind: Umwelt- und Materialwissenschaften, Betriebswirtschaft sowie Rechts- und Politikwissenschaften. Das LACE-Projekt arbeitet mit sieben namhaften Partnerunternehmen zusammen, um zu zeigen, wie die ressourceneffizienten Muster der Kreislaufwirtschaft und die damit verbundenen Geschäftsmodelle in den Wertschöpfungsketten der beteiligten Unternehmen implementiert werden können. Ziel des Projektes ist es, zu zeigen, dass die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft für Schweizer Unternehmen ökologisch vorteilhaft und profitabel sein können. Die Stiftung sanu durabilitas ist Wissenstransferpartnerin des LACE-Projektes.



Weitere Informationen zum Labor für angewandte Kreislaufwirtschaft finden Sie unter:

www.nrp73.ch/de/projekte/kreislaufwirtschaft/labor-fuer-eine-kreislaufwirtschaft

Was ist sanu durabilitas?

Die Stiftung sanu durabilitas ist ein unabhängiger Think and Do Tank mit Sitz in Biel/Bienne. Ihr Ziel ist es, neue praxisorientierte und wirkungsvolle Lösungen für den Übergang zu einer nachhaltigen Schweiz zu entwickeln, die in Wirtschaft, Politik und Verwaltung Anwendung finden, sowie die institutionellen Rahmenbedingungen für Nachhaltigkeit zu verbessern. In Zusammenarbeit mit Partner/innen aus Forschung, Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft identifiziert sanu durabilitas erfolgversprechende Lösungen, entwickelt sie weiter, erprobt ihre Anwendung in der Praxis, erarbeitet Empfehlungen und bringt sie den Entscheidungsträger/innen und der Öffentlichkeit zur Kenntnis. Die aktuellen Schwerpunkte von sanu durabilitas sind Kreislaufwirtschaft, nachhaltige Nutzung der Ressource Boden und soziale Kohäsion in einer sich wandelnden Gesellschaft.



Weitere Informationen zu sanu durabilitas finden Sie unter:

www.sanudurabilitas.ch