

Vernetzte Systembewertung zur Unterstützung einer nachhaltigen Energieversorgung

Rixrath, Doris; Schauer, Raphael; Piringer, Gerhard; Fachhochschule Burgenland GmbH

Abstract. Das Ziel, erneuerbare Energien im gesamten Versorgungssystem auszubauen soll durch ein ausgereiftes Methodenset zur Bewertung der technischen, ökologischen, sozialen und ökonomischen Auswirkungen unterstützt werden.

Das Josef-Ressel (JR)-Zentrum "LiSA" widmet sich der Aufgabe Bewertungsmethoden zu entwickeln, die eine effiziente und zielgerichtete Bewertung von Energietechnologien und -systemen ermöglicht. Der Fokus liegt auf thermischen Energieumwandlungssystemen, die in eine an erneuerbaren Energien reiche Energielandschaft eingebettet sind. Drei Systemebenen werden untersucht: 1) Einzeltechnologien, die Wärme/Kälte (und Strom) bereitstellen, 2) Verteilungsnetze für Wärme- und Kälteleistungen, 3) integrierte Energiesysteme, die Wärme-/Kältesysteme mit erneuerbaren Energiequellen (Sektorkopplungstechnologien) kombinieren. Ziel ist die Anpassung und Entwicklung von Methoden um eine dynamische Nachhaltigkeitsbewertung durchführen zu können.

Zur Modellierung und Bewertung werden die folgenden Methoden eingesetzt:

- 1) technische Modellierung der verschiedenen Systeme und Systemebenen (Simulationen)
- 2) ökologische Lebenszyklusbewertung (LCA, Ökobilanz)
- 3) soziale Lebenszyklusbewertung (SLCA)
- 4) wirtschaftliche Bewertung der Lebenszykluskosten (LCC)

Der Beitrag stellt die Ziele des JR-Zentrums "LiSA" vor und gibt einen Überblick über den Wissensstand zu Ökobilanzen, zu sozialer Lebenszyklusbewertung und zu Lebenszykluskostenbewertung, angewandt auf thermische Energiesysteme. Abschließend wird auf der Grundlage aktueller Literatur diskutiert, wie diese Methoden auf den drei genannten Systemebenen zu einer Nachhaltigkeitsbewertung beitragen können.

Keywords: Nachhaltigkeit, Energiesystembewertung, Life cycle sustainability assessment

1 EINLEITUNG

Im Josef Ressel-Zentrum für Vernetzte Systembewertung einer nachhaltigen Energieversorgung (JR-Centre for Linked System Assessment to Support Sustainable Energy Supplies, JR-Zentrum LiSA) werden Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung identifiziert, angepasst und weiterentwickelt, mit dem Ziel einen leicht anwendbaren Bewertungsrahmen zu schaffen. Bewertet werden thermische Energiesysteme mit erneuerbaren Energiequellen. Dabei steht der gesamte Lebenszyklus im Fokus, also auch Auswirkungen, die z.B. durch Vorkettenprozesse entstehen. In der vorliegenden Arbeit werden solche Methoden und deren Anwendung auf Energiesysteme vorgestellt und diskutiert.

2 METHODEN

Zur Modellierung und Bewertung von thermischen Energiesystemen wird von etablierten Methoden mit einem Lebenszyklusansatz ausgegangen, die im Zuge weiterer Arbeiten im JR-Zentrum LiSA zu einer Gesamtbewertung kombiniert werden sollen. Es handelt sich um drei Methoden, die im ersten Schritt auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden: Die Ökobilanzierung (life cycle assessment, LCA), die soziale Lebenszyklusbewertung (social LCA, SLCA) und die Lebenszykluskostenrechnung (life cycle costing, LCC). Durch die Kombination dieser drei Methoden soll die Durchführung einer Nachhaltigkeitsbewertung über den gesamten Lebenszyklus von Energiesystemen möglich werden. Diesen Bewertungsmethoden wird als vierte, grundlegende Methode immer eine technische Modellierung vorangestellt. Die Kombination dieser vier Methoden mit drei Systemebenen (d.h. Einzeltechnologien, Verteilnetze und Energieverbundsysteme) – bildet eine 3 x 4-Matrix (3 Systemebenen x 4 Methoden), welche den konzeptionellen Rahmen für unser JR-Zentrum „LiSA“ darstellt (siehe Abbildung 1)

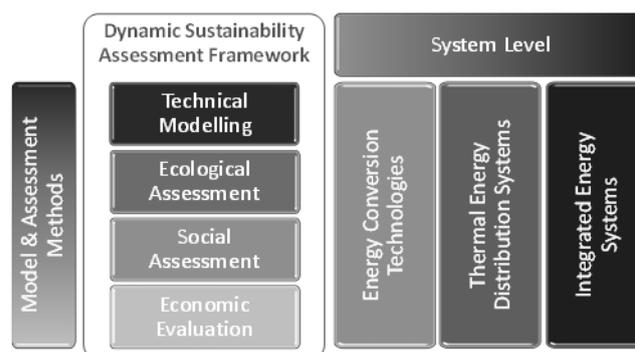


Abbildung 1. Übersicht der inhaltlichen Struktur des JR-Zentrums „LiSA“. Zeilen sind die Modellierungs- und Bewertungsmethoden, die im JR-Zentrum angepasst und weiterentwickelt werden sollen; Spalten beschreiben die drei Kategorien geplanter Anwendungsfälle (= Systemebenen).

Die folgenden Unterkapitel folgen der Matrixstruktur von Abbildung 1, mit einer kurzen Beschreibung der Modellierungs- und Bewertungsmethoden (Zeilen in Abbildung 1) in Kapitel 2.1 bis 2.4.

2.1 Ökologische Bewertung von Energiesystemen (LCA, Life Cycle Assessment)

Die Ökobilanz (LCA) ist eine etablierte, quantitative und systematische Methode zur Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus. Der Lebenszyklus besteht aus vier Stufen: 1) Rohstoffgewinnung und -beschaffung, 2) Produktion, 3) Nutzung und 4) End-of-Life einschließlich Entsorgung und Recycling [1] [2]. Eine große Anzahl von Anwendungen kann speziell auch im Bereich der Energiesysteme identifiziert werden [3]. Aufgrund des quantitativen Ansatzes kann die Ökobilanz verwendet werden um die Umweltauswirkungen verschiedener Technologien und Produkte zu vergleichen. Die Methode ist daher gut geeignet, um Entscheidungsprozesse und Maßnahmen im Energiesektor zu unterstützen.

Um die LCA-Methode zu harmonisieren, wurde sie in der 14040er Reihe internationaler Standards definiert - ISO 14040 [1], ISO 14044 [4] und verwandte Standards [5]. Diese beschreiben vier Phasen der Durchführung einer Ökobilanz: 1) Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, 2) Sachbilanz, 3) Wirkungsabschätzung und 4) Interpretation.

In der ersten Phase („Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen“) werden das Ziel der Ökobilanz definiert und die Regeln für die nachfolgenden Phasen spezifiziert, z.B. die Systemgrenzen und die Bezugsgröße für die Ergebnisdarstellung. In der zweiten Phase (Sachbilanz oder „Life-Cycle Inventory“, LCI) wird ein Modell des Lebenszyklus aus Einheitsprozessen erstellt und eine Liste der Ressourcen und Schadstoffe erstellt, die während des Lebenszyklus des Produkts oder der Dienstleistung verbraucht bzw. emittiert werden. Drittens werden bei der Wirkungsabschätzung oder „Life-Cycle Impact Assessment (LCIA)“ die Sachbilanzergebnisse aus der zweiten Phase mit einer ausgewählten Liste von Umweltauswirkungen in Beziehung gesetzt. In der vierten und letzten Phase („Interpretation“) werden die Erkenntnisse der vorangegangenen Phasen in Bezug auf Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie bewertet und Schlussfolgerungen gezogen.

2.2 Soziale Bewertung der Energiesysteme (SLCA, Social Life Cycle Assessment)

Die soziale Lebenszyklusanalyse (SLCA) ist eine Methode zur Bewertung der sozialen oder sozioökonomischen Auswirkungen. Ihr Zweck ist es, die positiven und negativen Auswirkungen eines Produkts auf Stakeholder oder Interessensgruppen während des gesamten Lebenszyklus des Produkts zu bewerten [6]–[8]. SLCA kann als Entscheidungshilfe dienen, und ihre Ergebnisse bewerten das menschliche Wohlbefinden, wie z. B. die Autonomie, Fairness und Freiheit des Einzelnen und der Gemeinschaft. "Menschliches Wohlbefinden" ist der sogenannte Schutzbereich (AoP, area of protection), der üblicherweise mit SLCA in Verbindung gebracht wird [6], [7], [9].

Zur Durchführung einer SLCA-Studie wird in der Regel der Aufbau der Ökobilanz aus den internationalen Normen [1], [4] herangezogen [10]. Obwohl es noch keine allgemein anerkannte Methode für SLCA-Studien gibt, ist die bekannteste methodische Quelle die UNEP/SETAC-Leitlinie [11], die kürzlich umfassend aktualisiert wurden [12].

Die UNEP/SETAC-Leitlinien definieren fünf verschiedene Stakeholdergruppen mit Unterkategorien (Tabelle 1 zeigt einen Auszug) und sechs auf die Stakeholdergruppen bezogene Wirkungskategorien (Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, Gesundheit und Sicherheit, kulturelles Erbe, Regierungsführung und sozioökonomische Auswirkungen).

Table 1: Stakeholdergruppen und zugehörige Unterkategorien gemäß den Leitlinien zur sozialen Lebenszyklusanalyse (SLCA), ein Auszug [11]

Stakeholdergruppe	Unterkategorie
Stakeholder "Arbeitnehmer"	Kinderarbeit; Faires Gehalt; Arbeitszeit; Zwangsarbeit; Chancengleichheit; ...
Stakeholder "Konsument"	Gesundheit & Sicherheit; Transparenz; Verantwortung am Lebensende; ...
Stakeholder "locale Bevölkerung"	Zugang zu materiellen und immateriellen Ressourcen; Sichere und gesunde Lebensbedingungen; Achtung der indigenen Rechte; ...
Stakeholder "Gesellschaft"	Öffentliches Bekenntnis zur Nachhaltigkeit; Prävention und Milderung bewaffneter Konflikte; Korruption; Technische Entwicklung; ...
Akteure der Wertschöpfungskette *ohne Verbraucher	Fairer Wettbewerb; Förderung der sozialen Verantwortung; Lieferantenbeziehungen; ...

Zur Operationalisierung dieser Auswirkungen wurden verschiedene Indikatoren festgelegt; die meisten von ihnen können als bewertende Indikatoren klassifiziert werden [13]. Daher kann SLCA nicht als rein quantitative Bewertungsmethode angesehen werden.

2.3 Wirtschaftliche Bewertung von Energiesystemen (LCC, Life Cycle Costing)

Die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC; [14], [15]) fasst alle Kosten von Produkten und Systemen über ihren gesamten Lebenszyklus zusammen, die direkt mit einem oder mehreren am Lebenszyklus beteiligten Akteuren verbunden sind. In einer LCC werden die Kosten als reale Zahlungsströme definiert, die den wirtschaftlichen Wert von Produkten und Dienstleistungen widerspiegeln.

Um den ökonomischen Teil einer Nachhaltigkeitsbewertung abdecken zu können wurde das Environmental LCC (ELCC) etabliert [15]. Der Zusatz „Environmental“ weist darauf hin, dass die ELCC konsistent mit der Ökologischen Analyse (LCA) nach anerkannten Methoden (z. B. [1]) durchgeführt werden soll.

2.4 Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen (LCSA, Life-cycle sustainability assessment)

Der aktuelle Stand der Technik in der Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung wurde von Visentin et al. [16] und – speziell für Energietechnologien – von Buchmayr et al. [17] diskutiert. Die meisten Ansätze kombinieren drei Bewertungsmethoden aus dem „Triple Bottom Line“ Ansatz der Nachhaltigkeitsbewertung [18]:

- Ökobilanz (LCA), bei der Umweltauswirkungen detaillierter untersucht werden, basierend auf der ISO 14040 [1].
- Die soziale Lebenszyklusanalyse (SLCA), bei der soziale Auswirkungen berücksichtigt werden, enthält ebenfalls Elemente der ISO 14040-Familie [1], bezieht jedoch im Gegensatz zu den beiden anderen Methoden positive und negative soziale Auswirkungen während des gesamten Lebenszyklus des Produkts mit ein.
- Lebenszykluskostenrechnung (LCC), die ebenfalls weitgehend auf Elementen der LCA-Methode nach ISO 14040 [1] basiert; LCC vernachlässigt häufig externe

Kosten, um eine Doppelzählung von Umweltbelastungen zu vermeiden, die bereits durch die Ökobilanz abgedeckt sind.

Das Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) als Methode ([14], [19], [20]) kombiniert diese Dimensionen, idealerweise innerhalb derselben Systemgrenzen (Gleichung 1):

$$LCSA = LCA + SLCA + LCC \quad (1)$$

Wie genau LCA mit anderen Methoden zu einer Nachhaltigkeitsbewertung kombiniert werden kann, kann stark von der spezifischen Anwendung und den Zielen des Benutzers abhängen [21]. Eine besondere Herausforderung für eine LCSA ist die Tatsache, dass LCA, SLCA und LCC methodisch nicht gleich weit fortgeschritten sind [22]: Lediglich die LCA-Methode hat einen eigenen internationalen Standard. Darüber hinaus hat SLCA im Gegensatz zu LCA keine etablierten Wirkungskategorien oder Indikatoren, und für LCC ist die Phase der Folgenabschätzung, also das „Life-Cycle Impact Assessment“ überhaupt nicht definiert.

Bei Alejandrino et al. [23] wurden bestehende LCSA-Studien untersucht, um zu überprüfen, wie die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (siehe Gleichung 1) zusammenkommen und wie die verschiedenen Methoden angewendet wurden. Eine wichtige Frage war, wie Methoden kombinierbar sind, und ob es möglich ist, konsistente Ergebnisse zu erhalten. Große Unterschiede wurden in der wirtschaftlichen und sozialen Bewertung festgestellt – sehr oft wurden nicht alle Stakeholder oder Akteure der Wertschöpfungskette berücksichtigt. Die Literatur zur Frage, wie Indikatorergebnisse kombiniert werden können, ist umfangreich, jedoch nicht unbedingt mit einem Fokus auf thermische Systeme. Speziell für Energiesysteme überprüften Martin-Gamboa et al [24] 62 Artikel zu verschiedenen Anwendungen der Multikriterien Analyse (multi-criteria decision analysis- MCDA) für die Nachhaltigkeitsbewertung. Allerdings befassten sich nur fünf Studien explizit mit thermischen Energiesystemen. Methodisch wählten die Autoren eine Kombination aus Lebenszyklusansätzen (einschließlich LCA, SLCA) mit Data Envelopment Analysis als vielversprechenden Rahmen für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen, die die Entscheidungsfindung und Energieplanung erleichtern kann.

3 ENERGIESYSTEMBEWERTUNG MITTELS LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSEMENT

Die folgenden Unterkapitel geben einen Literaturüberblick zur Anwendung der Nachhaltigkeitsbewertung auf die drei Ebenen von Energiesystemen (die Spalten in Abbildung 1).

3.1 Energiewandlungstechnologien

Für eine Systematik der Nachhaltigkeitsanalyse von Energie aus Biomasse verglichen Buytaert et al [25] die Leistung und Anwendbarkeit von fünf Bewertungsinstrumenten (einschließlich LCA und Exergieanalyse). Sie kamen zu dem Schluss, dass kein einzelnes Instrument für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung von Bioenergiesystemen geeignet ist. Während sie vorschlugen, eine Toolbox zu erstellen, die Teile der Tools kombiniert, erwähnten die Autoren die im Abschnitt 2.3 aufgeführte SLCA nicht. Grunwald & Rösch [26] stellten ein integriertes Nachhaltigkeitskonzept für Energietechnologien vor. Sie verwendeten als Beispiel Energie aus Kraft-Wärme-Kopplungen, die mit Grünlandbiomasse befeuert werden. Sie identifizierten sechzehn

Nachhaltigkeitsindikatoren, pragmatisch basierend auf der Datenverfügbarkeit, und verglichen die Indikatorwerte für Energie aus verschiedenen Arten von Grünlandbiomasse mit der aus einem Referenzbrennstoff. Es wurde festgestellt, dass alle Kraftstoffketten fossile Brennstoffe und Treibhausgasemissionen einsparen, mit bescheidenen sozialen Vorteilen, aber nur eine (Kurzumtriebspappel) war auch kosteneffektiv. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Energietechnologien eine Vielzahl von Indikatoren notwendig ist.

Atilgan und Azapagic [27] präsentierten eine LCSA von Stromerzeugungstechnologien in der Türkei unter Berücksichtigung ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Aspekte. Sie identifizierten geothermische Quellen als umweltschonend, aber die Kosten waren von allen Quellen am höchsten. Im Gegensatz dazu weisen Erdgaskraftwerke die niedrigsten Kapitalkosten auf, bieten aber aus gesellschaftlicher Sicht die geringsten Beschäftigungsmöglichkeiten bei vergleichsweise hohen Kosten je Megawatt Stunde und hohem Beitrag zum Ozonschichtabbau.

Mit dem Fokus auf Gebäudemanager haben Luong et al. [28] eine Methode zur Nachhaltigkeitsbewertung für erneuerbare Energietechnologien entwickelt (Abbildung 2). Im Gegensatz zu den meisten LCSA-Arbeiten, die auf der Triple-Bottom-Line-Perspektive basieren, fügten die Autoren ihrem Framework die technischen Kriterien Leistung, Langlebigkeit und Flexibilität/Anpassungsfähigkeit hinzu.

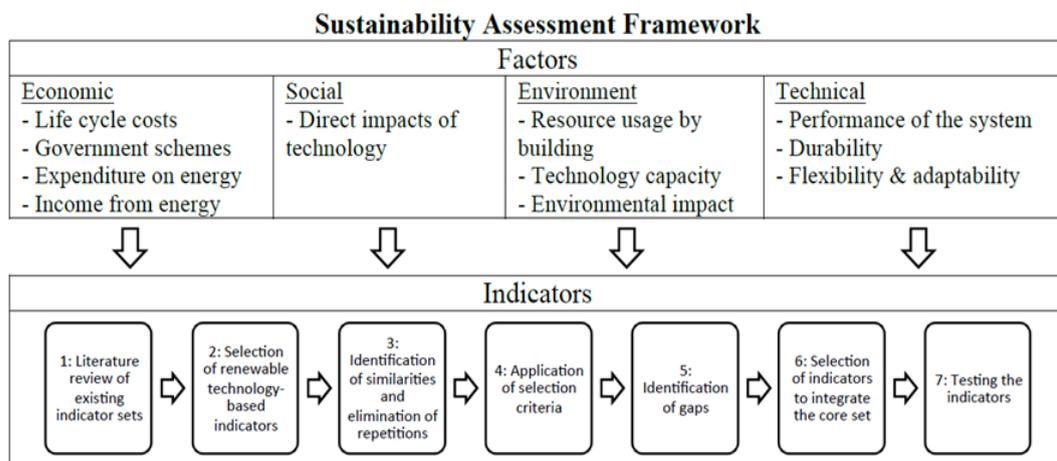


Abbildung 2. Methode zur Nachhaltigkeitsbewertung für erneuerbare Energietechnologien [28]

Li et al. [29] haben mehr als 70 Studien zur Bewertung von geothermischen Kraftwerken nach dem LCSA-Ansatz gesichtet. Sie kamen zu dem Schluss, dass sich die wenigen vorhandenen Studien auf die Umweltauswirkungen konzentrierten, während die Stromgestehungskosten häufig für die Bewertung in der wirtschaftlichen Analyse verwendet werden. Bei der sozialen Bewertung wurde häufig die soziale Akzeptanz als Indikator gewählt.

3.2 Energieverteilsysteme

Es wurde kein Beispiel für Nachhaltigkeitsbewertungen gefunden, die sich allein auf Fernwärme- und Fernkältenetze konzentrieren. Eine Reihe integrierter Systemstudien bezieht sich jedoch auf Fernwärmesysteme, z. B. Kontu et al. [30]. Ghafghazi et al. [31] reihen unterschiedliche Energiequellen (Erdgas, Holzpellets, Umgebungswärme und Geothermie) für ein Fernwärmesystem in Kanada, basierend auf sechs Kriterien unter Verwendung der Analytical Hierarchy Process (AHP)-Methode. Die Studie enthält keine

sozialen Kriterien. Holzpellets wurden dennoch als beste Alternative für alle Stakeholder identifiziert unter der Voraussetzung, dass die Anliegen der Stakeholder gut kommuniziert werden. Koefinger et al. [32] quantifizierten die Bedeutung verschiedener Anreize und Geschäftsmodelle für Stakeholder-Gruppen durch Stakeholder-Interviews; Vertragsmodelle wurden von mehreren Interessensgruppen als interessant erachtet, während die Meinungen zu finanziellen Anreizen und Tarifen gemischt waren.

3.3 Integrierte Energiesysteme

Ein Beispiel für eine Nachhaltigkeitsbewertung integrierter thermischer Systeme ist die Studie von Kontu et al. [30] für eine Siedlung in Finnland. Es wurden elf alternative Heizsysteme für neue Einfamilienhäuser bewertet, darunter eines mit Fernwärme aus Biomasse. Fünfzehn verschiedene technische, wirtschaftliche, ökologische und Nutzungskriterien wurden mit einer erweiterten stochastischen multikriteriellen Akzeptanzanalyse bewertet. Die Autoren fanden heraus, dass Fernwärme mit einem Biomasse-Heizkraftwerk sowohl von Experten als auch von den Bewohnern am besten akzeptiert wird, gefolgt von Erdwärmepumpen. Zusätzliche Solarwärme wurde aufgrund der hohen Investitionskosten nicht gut bewertet. Dombi et al. [33] untersuchten sowohl Technologien für die Stromerzeugung als auch Technologien für die Wärmeversorgung, um die beste Lösung im Hinblick auf die Nachhaltigkeit zu finden. In der Studie wurde die Bedeutung sozialer Auswirkungen wie die Erhöhung der Beschäftigung und die Schaffung von Einkommen vor Ort hervorgehoben. Chen et al. [34] führten eine quantitative Nachhaltigkeitsbewertung eines Fernwärmesystems durch, das mit einer Wärmepumpe, einer Photovoltaikanlage und einem solarthermischen Kollektor gekoppelt ist. Sie berechneten einen zusammengesetzten Nachhaltigkeitsindex für solche hybriden Systeme, indem sie eine Informationsentropie-Methode verwenden, um elf einzelne Indikatoren für die Auswirkungen auf Energie, Umwelt (Luftschadstoffe), Wirtschaft und Gesellschaft (Beschäftigung) zu gewichten und zu aggregieren [35]. Der zusammengesetzte Nachhaltigkeitsindex wurde für fünf verschiedene Verteilungen der verfügbaren Fläche zwischen photovoltaischer und solarthermischer Nutzung bewertet. Der Index war am niedrigsten für eine Nullnutzung der Photovoltaik (die gesamte Fläche wurde für die Solarthermie genutzt) und am höchsten für eine 100 %ige Nutzung der Photovoltaik (keine solarthermische Komponente).

Die Abbildung 3 gibt einen Überblick über eine LCSA-Methode für Energiesysteme und erneuerbare Energien [36], mit vorgeschlagenen Endpunktauswirkungen für jede Methode.

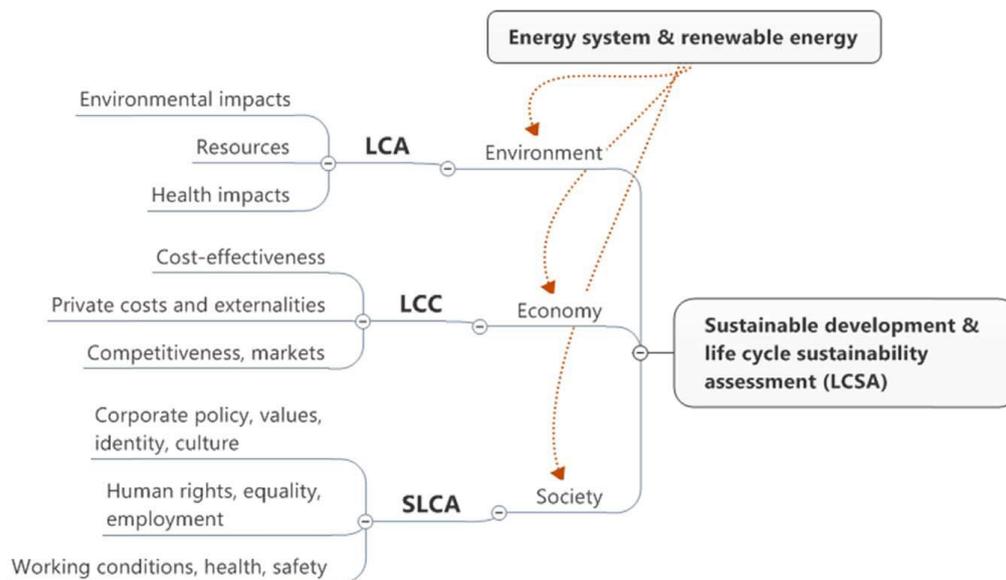


Abbildung 3. LCSA-Framework, angewendet auf ein generisches Energiesystem. Links: Endpunktauswirkungen der einzelnen Bewertungsmethoden LCA, LCC, SLCA [36]

4 Schlussfolgerungen

Die Zusammenführung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Dimension in einen Methodenkomplex zur Nachhaltigkeitsbewertung erscheint sinnvoll und praktikabel, wenn die Systemgrenzen der einzelnen Methoden (LCA, SLCA und LCC) ident sind, Indikatoren vorhanden sind und diese bereits Anwendung auch für Energiesysteme finden. Dies wurde auch von Visentin et al. [16] und speziell für Energietechnologien von Buchmayr et al. [17] analysiert.

Die Indikatoren zur Bestimmung der sozialen Auswirkungen müssen jedoch zumeist als qualitative Indikatoren eingestuft werden [13]. Das macht es schwierig diese mit den anderen, quantitativen Dimensionen der Nachhaltigkeitsbewertung zu harmonisieren.

5 Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie durch die Christian Doppler Forschungsgesellschaft, sowie bei der Wien Energie GesmbH und der Burgenland Energie AG.

6 REFERENZEN

- [1] International Standard Organization, "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)." p. 20, 2006.
- [2] H. Baumann and A.-M. Tillman, *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lund: Studentlitteratur, 2004.
- [3] A. Laurent, N. Espinosa, and M. Z. Hauschild, "LCA of Energy Systems," in *Life Cycle Assessment - Theory and Practice*, M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, Eds. Cham: Springer International Publishing AG, 2018, p. 1216.
- [4] International Standard Organization, "Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)." p. 46, 2006.
- [5] W. Klöpffer and B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [6] C. Benoit Norris and B. Mazijn, "Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products," Paris, 2009. [Online]. Available: http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf.
- [7] A. Jørgensen, A. Le Bocq, L. Nazarkina, and M. Hauschild, "Methodologies for social life cycle assessment," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 13, no. 2, pp. 96–103, Mar. 2008, doi: 10.1065/lca2007.11.367.
- [8] C. Reitingger, M. Dumke, M. Barosevic, and R. Hillerbrand, "A conceptual framework for impact assessment within SLCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 16, no. 4, pp. 380–388, May 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0265-y.
- [9] E. Ekener-Petersen, "Tracking down Social Impacts of Products with Social Life Cycle Assessment," KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [10] R. Grießhammer *et al.*, "Feasibility Study: Integration of social aspects into LCA," Freiburg, 2006.
- [11] C. Benoit Norris and B. Mazijn, "Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products," Paris, 2009.
- [12] C. Norris *et al.*, *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020*. Paris: United Nations Environment Programme, 2020.
- [13] S. Henke and L. Theuvsen, "Social Life Cycle Assessment: Erweiterter Qualitätsbegriff und sozioökonomische Analyseverfahren," in *Vielfalt Qualität – Tendenzen im Qualitätsmanagement*, R. Woll and M. Uhlemann, Eds. Aachen: Shaker Verlag, 2012, p. 275.
- [14] A. Zamagni, P. Feschet, A. I. De Luca, N. Iofrida, and P. Buttol, "Social Life Cycle Assessment: Methodologies and Practice," in *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies*, First., J. Dewulf, S. De Meester, and R. A. F. Alvarenga, Eds. John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 229–240.
- [15] D. Hunkeler, K. Lichtenvort, and G. Rebitzer, *Environmental Life Cycle Costing*. CRC Press, 2008.
- [16] C. Visentin, A. W. da S. Trentin, A. B. Braun, and A. Thomé, "Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 270, p. 122509, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122509>.

- [17] A. Buchmayr, E. Verhofstadt, L. Van Ootegem, D. Sanjuan Delmás, G. Thomassen, and J. Dewulf, "The path to sustainable energy supply systems: Proposal of an integrative sustainability assessment framework," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 138, p. 110666, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110666>.
- [18] W. Klöpffer and I. Renner, "Lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten," *TATuP - Zeitschrift für Tech. Theor. und Prax.*, vol. 16, no. 3, pp. 32–38, Nov. 2007, doi: [10.14512/tatup.16.3.32](https://doi.org/10.14512/tatup.16.3.32).
- [19] J. B. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: Past, present, and future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: [10.1021/es101316v](https://doi.org/10.1021/es101316v).
- [20] R. Heijungs, G. Huppes, and J. B. Guinée, "Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 3, pp. 422–428, Mar. 2010, doi: [10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.010](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.010).
- [21] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, and M. Ritthoff, "Options for broadening and deepening the LCA approaches," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 2, pp. 120–127, Jan. 2010, doi: [10.1016/j.jclepro.2009.09.023](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.023).
- [22] S. Neugebauer, "Enhancing life cycle sustainability assessment," Technische Universität Berlin, 2016.
- [23] C. Alejandrino, I. Mercante, and M. D. Bovea, "Life cycle sustainability assessment: Lessons learned from case studies," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 87, p. 106517, Mar. 2021, doi: [10.1016/j.eiar.2020.106517](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106517).
- [24] M. Martín-Gamboa, D. Iribarren, D. García-Gusano, and J. Dufour, "A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 150, pp. 164–174, May 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.03.017](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.017).
- [25] V. Buytaert, B. Muys, N. Devriendt, L. Pelkmans, J. G. Kretzschmar, and R. Samson, "Towards integrated sustainability assessment for energetic use of biomass: A state of the art evaluation of assessment tools," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3918–3933, Oct. 2011, doi: [10.1016/j.rser.2011.07.036](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.036).
- [26] A. Grunwald and C. Rösch, "Sustainability assessment of energy technologies: towards an integrative framework," *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 1, no. 1, p. 3, Dec. 2011, doi: [10.1186/2192-0567-1-3](https://doi.org/10.1186/2192-0567-1-3).
- [27] B. Atilgan and A. Azapagic, "An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey," *Energy Policy*, vol. 93, pp. 168–186, Jun. 2016, doi: [10.1016/j.enpol.2016.02.055](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.055).
- [28] S. Luong, K. Liu, and J. Robey, "Sustainability assessment framework for renewable energy technology," Reading, 2012. [Online]. Available: www.reading.ac.uk/web/FILES/tsbe/Luong_TSBE_Conference_Paper_2012.pdf.
- [29] J. Li, R. R. Z. Tarpani, L. Stamford, and A. Gallego-Schmid, "Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 35, pp. 141–156, Jan. 2023, doi: [10.1016/j.spc.2022.10.027](https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.027).
- [30] K. Kontu, S. Rinne, V. Olkkonen, R. Lahdelma, and P. Salminen, "Multicriteria evaluation of heating

- choices for a new sustainable residential area," *Energy Build.*, vol. 93, pp. 169–179, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.003.
- [31] S. Ghafghazi, T. Sowlati, S. Sokhansanj, and S. Melin, "A multicriteria approach to evaluate district heating system options," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1134–1140, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.021.
- [32] M. Koefinger *et al.*, "Low temperature district heating in Austria: Energetic, ecologic and economic comparison of four case studies," *Energy*, vol. 110, pp. 95–104, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.103.
- [33] M. Dombi, I. Kuti, and P. Balogh, "Sustainability assessment of renewable power and heat generation technologies," *Energy Policy*, vol. 67, pp. 264–271, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.12.032.
- [34] Y. Chen, J. Wang, and P. D. Lund, "Sustainability evaluation and sensitivity analysis of district heating systems coupled to geothermal and solar resources," *Energy Convers. Manag.*, vol. 220, no. 2, p. 113084, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113084.
- [35] X. Zeng, J. Wu, D. Wang, X. Zhu, and Y. Long, "Assessing Bayesian model averaging uncertainty of groundwater modeling based on information entropy method," *J. Hydrol.*, vol. 538, pp. 689–704, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.038.
- [36] H. Mälkki and K. Alanne, "An overview of life cycle assessment (LCA) and research-based teaching in renewable and sustainable energy education," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 218–231, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.176.