

# Ökologische Bilanzierung von Schmelzschweißverfahren unter Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Prozessschritte

A. Pittner, M. Rethmeier, Berlin

Kleinere und mittlere Unternehmen agieren heutzutage in einem globalen Umfeld, wodurch diese zu Elementen einer komplexen Wertschöpfungskette werden. Der zunehmende Anstieg der Preise für industriell essenzielle Ressourcen, wie Primärenergie und Rohstoffe, sowie sich ausweitende klimapolitische Restriktion führen zur Notwendigkeit, die Wettbewerbsfähigkeit durch innovative und ökoeffiziente Fertigungsprozesse langfristig zu sichern. Rahmenbedingungen zu schaffen, welche die Positionierung nachhaltiger Produkte und Prozesse innerhalb globaler Wertschöpfungsketten ermöglicht, ist daher ein wesentliches Ziel der deutschen Industriepolitik [1, 2].

Im Rahmen dieses Beitrages werden aktuelle Forschungsarbeiten zur Bewertung der Umweltwirkungen der schweißtechnischen Fertigungskette anhand ausgewählter Schmelzschweißverfahren unter Berücksichtigung vor- sowie nachgelagerter Fertigungsschritte dargestellt. Das hierzu notwendige Element zur Analyse der Fertigungsprozesse ist die Ökobilanzierung – eine weit verbreitete und standardisierte Methode zur Abschätzung der Umweltwirkungen eines Produktes oder Prozesses. Hierbei stellt die Sachbilanzierung, d.h. die Ermittlung sämtlicher relevanter Energie- und Ressourcenverbräuche während der schweißtechnischen Fertigung, aufgrund des hohen Dokumentationsaufwandes sowie Ableitung assoziierter Wirkkategorien das größte Hindernis für eine Etablierung und Akzeptanz der Ökobilanzierung in der Praxis dar. Gleichwohl wird seitens Unternehmen, welche als Zulieferer von OEM's agieren, die Dokumentation des fertigungsspezifischen CO<sub>2</sub>-Verbrauches gefordert.

Ein weiterer Aspekt der Arbeiten beinhaltet folglich Methoden zur automatisierten Erfassung von schweißtechnischen Produktionsdaten sowie deren Nachverfolgbarkeit aufzuzeigen. Anhand unterschiedlicher Schweißverfahren werden die aus den Produktionsdaten abgeleiteten Energie- und Ressourcenverbräuche automatisiert in den relevanten Umweltwirkungen überführt. Die analysierten Schweißprozesse umfassen dabei ein breites für kmU relevantes Spektrum. Durch die softwareseitige Bereitstellung der aufgestellten Umweltprofile ist der Anwender in der Lage, Schweißprozesse unter ökologischen Aspekten zu bewerten und die effizienteste Variante zu identifizieren.

## 1 Einleitung

Schweißen ist ein industriell relevantes Fertigungsverfahren mit einer branchenübergreifenden Bedeutung. Die Umweltwirkungen von Schweißverfahren sind jedoch bisher unbekannt und werden im Entstehungsprozess eines Produktes entlang seiner Fertigungskette daher meist nicht berücksichtigt [3]. Ferner ist der Schweißprozess durch einen hohen Verbrauch an Energie sowie Ressourcen gekennzeichnet. Zahlreiche Arbeiten [4, 5, 6] zeigen, dass der Bedarf einer Ökobilanzierung enorm ist. Ursache für die bisher mangelhafte Etablierung der Ökobilanzierung von Schweißverfahren ist die Unkenntnis relevanter Einflussgrößen und damit verbunden ein nicht abschätzbarer Aufwand bei der Durchführung sowie Implementierung im fertigungstechnischen Kontext [7, 8]. Demgegenüber ist die Ökobilanzierung in anderen Branchen ein oft genutztes Werkzeug zur Ableitung von Umweltwirkungen [9, 10, 11]. Aufgrund der aktuellen Diskussionen bezüglich des Übergangs hin zu einer klimaneutralen Produktion erfährt auch die Analyse und Optimierung der Umweltwirkungen schweißtechnischer Fertigungsverfahren derzeit eine gesteigerte Aufmerksamkeit. Für Unternehmen stellt die Verfügbarkeit umweltverträglicher Produkte bzw. Prozesses eine gewisse Werbewirksamkeit dar, wie dies im Bereich der Schweißstromquellentechnik aktuell zu beobachten ist [12, 13]. Gleichzeitig wird das Thema des „green welding“ auch bezogen auf die gesamte Fertigungskette immer häufiger diskutiert [14]. Dies zeigt sich durch eine in den letzten Jahren deutlich gestiegene Publikationsaktivität. Neben Analysen zu den Einflussfaktoren auf die Nachhaltigkeit in schweißtechnischen Produktionsumgebungen [15] stehen vor allem auch konkrete Implementierungen in der Fertigung bzw. der Produktentstehung im Fokus [16, 17, 18].

Die grundlegende Vorgehensweise einer Ökobilanzierung (Life-Cycle-Assessment (LCA)) ist als standardisierte Methode in geltenden Normen [19, 20] sowie entsprechender Fachliteratur [21, 22] beschrieben. Kernelement der Ökobilanzierung ist die Sachbilanzierung, d.h. die Erfassung der relevanten Inputs sowie Outputs bezogen auf das System „Schweißprozess“. Aus dem entlang der schweißtechnischen Fertigungskette akkumulierten Ressourcenverbrauch (z.B. Zusatzwerkstoff, elektrische Energie, Schutzgas, etc.) und Abfallprodukten bzw. Emissionen wird die Umweltwirkung entsprechend verschiedener Kategorien gemäß der World Steel Association [23] abgeleitet.

Um die Ökobilanzierung als festen Bestandteil in die schweißtechnische Dokumentation einfließen zu lassen, sind die notwendigen Arbeitsschritte zu automatisieren. Daher wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten sämtliche zu berücksichtigenden Größen digital erfasst und in eine Umweltwirkung durch Zugriff auf entsprechende Datenbanken „übersetzt“. Das Datenmanagement ermöglicht die eindeutige Zuordnung der Umweltwirkung eines geschweißten Bauteiles bei minimalen Dokumentationsaufwand für den Anwender.

Es zeigt sich, dass die Umweltwirkung von Schweißprozessen qualitativ direkt aus dem Ressourcenverbrauch abgeleitet werden kann. Der Einfluss der verschiedenen Input- sowie Outflüsse auf ausgewählte Wirkkategorien ist jedoch nicht ad-hoc quantifizierbar. Eigene Forschungsarbeiten [7] haben gezeigt, dass der Materialverbrauch (z. B. Grund-/Zusatzwerkstoff, etc.), der Energieverbrauch (z.B. Wirkleistung sämtlicher elektrischer Verbraucher während der Prozesszeit), Gasverbrauch (Prozess-, Schutzgas oder Druckluft) sowie Hilfsmittel (z.B. Schutzgläser) signifikante Inputgrößen darstellen, deren Berücksichtigung ausreichend ist.

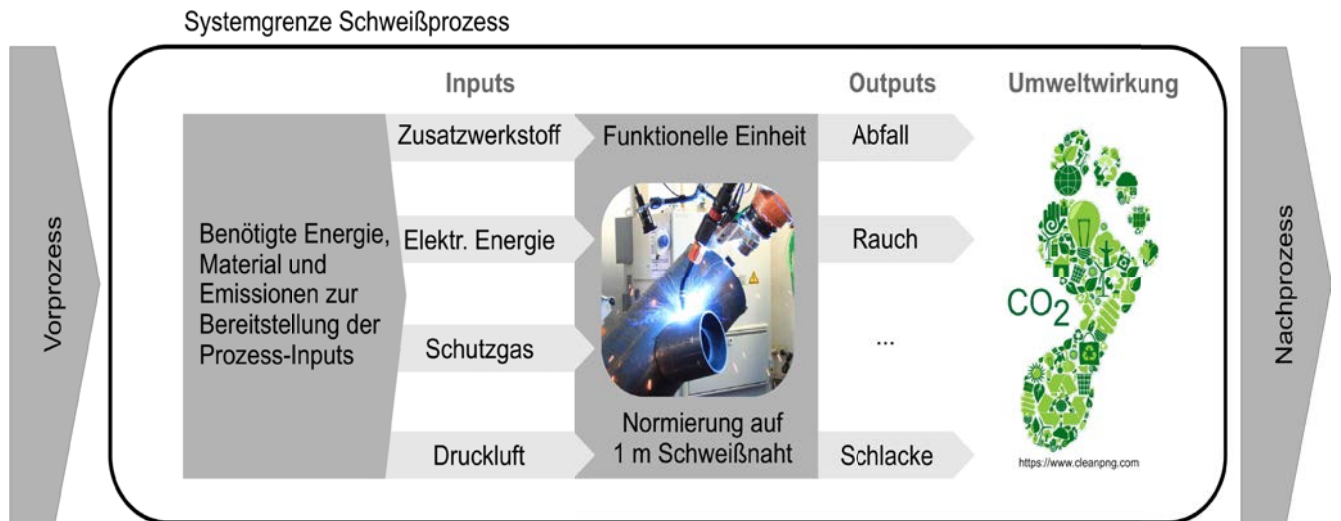
In den nachfolgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse und der darauf basierende automatisierte Workflow zur Erstellung einer Ökobilanz für verschiedene Schmelzschweißverfahren exemplarisch dargestellt.

## 2 Workflow zur Ökobilanzierung von Schmelzschweißverfahren

Während einer Ökobilanzierung erfolgt die Zusammenstellung und Beurteilung der Input- sowie Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges – von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Entsorgung (cradle-to-grave Ansatz). Dabei beschränkt sich die Ökobilanz auf die Umweltaspekte von Produkten und erhebt somit keinen Anspruch auf eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung.

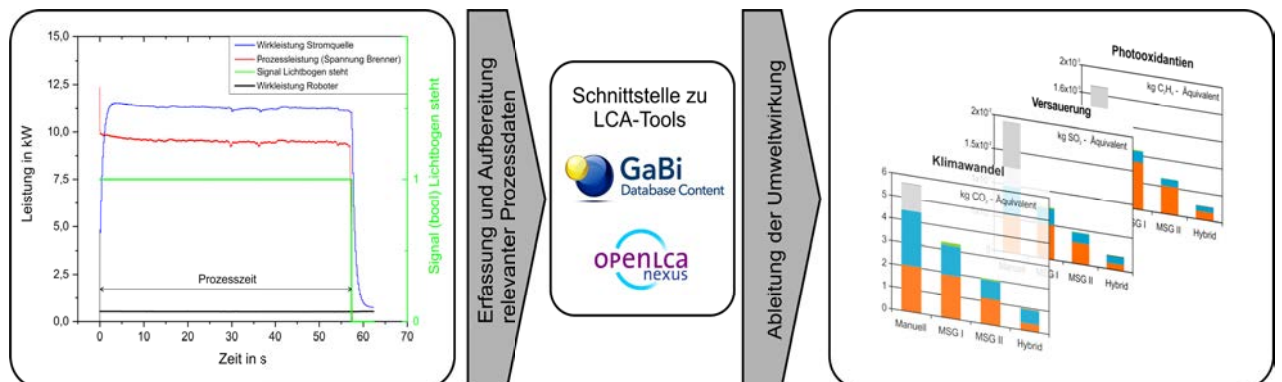
Die Abfolge an Arbeitsschritten, welche während einer Ökobilanzierung von Schweißprozessen zu durchlaufen sind, ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Sachbilanzierung, d.h. die Erfassung der relevanten Inputflüsse und Outputflüsse. Hierbei sind alle Aspekte abzubilden, welche zur Erfüllung der technischen Funktionalität, z. B. Festigkeit der resultierenden Schweißnaht, notwendig sind. Für Schmelzschweißprozesse können der Materialverbrauch (z.B. Grund-/Zusatzwerkstoff, etc.), der Energieverbrauch (z. B. Wirkleistung sämtlicher elektrischer Verbraucher während der Prozesszeit), Gasverbrauch (Prozess-, Schutzgas oder Druckluft) sowie Hilfsmittel (z. B. Schutzgläser, Elektrodenkappen) als signifikante Inputgrößen definiert werden. Die Sachbilanzierung erfolgt auf Basis einer vorab definierten „funktionalen Einheit“, von 1 m Schweißnaht. Diese Normierung ermöglicht die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prozessvarianten. Gleichwohl können Ergebnisse durch Skalierung auf reale Anwendungsbeispiele übertragen werden.

Die Ökobilanzierung beinhaltet dabei die Projektion der Sachbilanzierung, d. h. des Energie- und Ressourcenverbrauches, auf entsprechende Wirkungskategorien. Für Schmelzschweißverfahren haben sich Kategorien in Anlehnung an die World Steel Association [23] als geeignet und allgemein anerkannt erwiesen. Diese umfassen die **Klimaänderung (in kg CO<sub>2</sub> – Äquivalent)** zur Bewertung des langfristigen Beitrags eines Stoffs zum Klimawandel. Der Beitrag eines Stoffs zum Waldsterben, Versauerung von Gewässern wird durch die **Versauerung (in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent)** angegeben. **Photooxidantien (in kg Ethen Äquivalent)** beschreiben die Bildung von Ozon in Bodennähe durch NO<sub>x</sub>-Gase. Die Ungewollte Produktion von Biomasse durch Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor wird durch das **Eutrophierungspotenzial (in kg Phosphat-Äquivalent)** ausgedrückt.



**Bild 1.** Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz für Schweißverfahren

Ein wesentliches Ziel der Forschungsarbeiten war die Entwicklung einer Methode zur automatisierten Sachbilanzierung und darauf basierenden Ökobilanzierung (Bild 2). Hierzu wurden Schnittstellen zwischen dem an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Fachbereich „Schweißtechnische Fertigungsverfahren“ entwickelten Schweißdatenmanagementsystem [24], mit welchem semantisch beschriebene Fertigungsdaten eindeutig und nachverfolgbar archiviert werden können, und Open-Source Softwarepaketen zur Ökobilanzierung entwickelt. Die Ökobilanzen wurden in der Software OpenLCA 1.7 [25] implementiert, deren Berechnungen auf Basis der GaBi-Datenbank [26] (Version 2018) erfolgten. Das Impact-Assessment sowie Definition der Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren wurde nach CML 2001 durchgeführt. Die CML-Methode (CML = **C**entrum voor **M**ilieukunde der **U**niversität **L**eiden) ist ein ökologieorientiertes Informations- und Entscheidungsinstrument zur Erstellung einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040. Die entwickelten Softwareschnittstellen ermöglichen direkt auf Basis von Messdaten (Wirkleistung, Drahtvorschub, Gasverbrauch, usw.) die Sachbilanz sowie die Ökobilanz, d. h. Projektion auf Umweltwirkungen, automatisiert abzuleiten. Durch die Bereitstellung dieses Workflows ist es möglich, Ökobilanzen einheitlich, d. h. ohne Fehlerpotenzial durch manuelle Arbeitsschritte sowie ohne erhöhtem Dokumentationsaufwand zu erstellen und somit vergleichbar zu machen. Die Umweltwirkungen während der schweißtechnischen Fertigung stehen folglich als weiteres Verfahrensmerkmal, korrespondierend zu der integralen Prozessleistung, dem Prozesswirkungsgrad oder der Strecken-energie zur Verfügung.



**Bild 2.** Automatisierte Sachbilanzierung und Ableitung der Ökobilanz

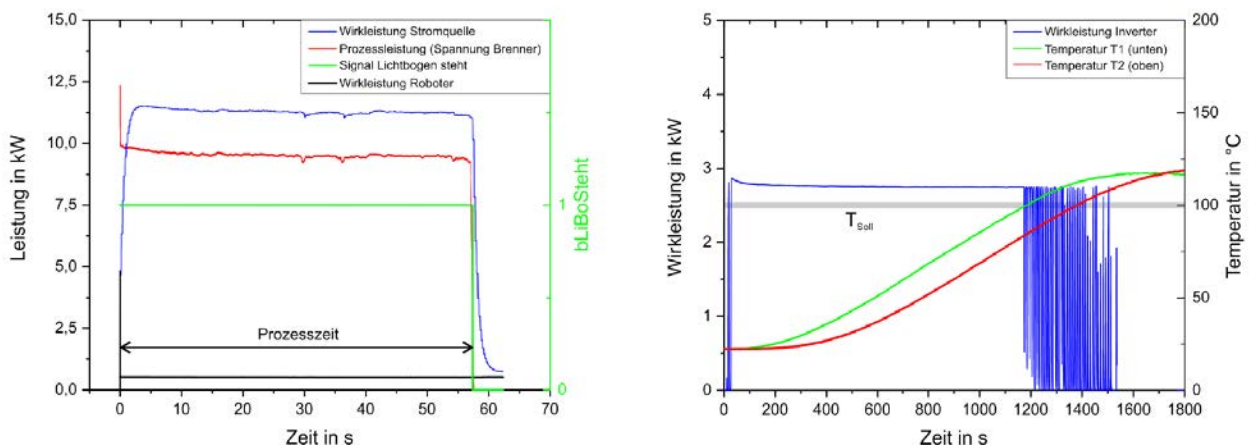
### 3 Anwendungsbeispiele

Der Workflow zur automatisierten Erstellung einer Ökobilanz von Schweißprozessen wird anhand der nachfolgenden Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Gemäß Bild 3 wird zunächst ein MSG-Mehrlagenschweißprozess mit den aufgeführten Verfahrenscharakteristika berücksichtigt. Neben dem MSG-Prozess umfasst die schweißtechnische Fertigungskette die Nahtvorbereitung mittels autogenem Brennschnitt sowie die konduktive Probenvorwärmung mittels Heizmatten.

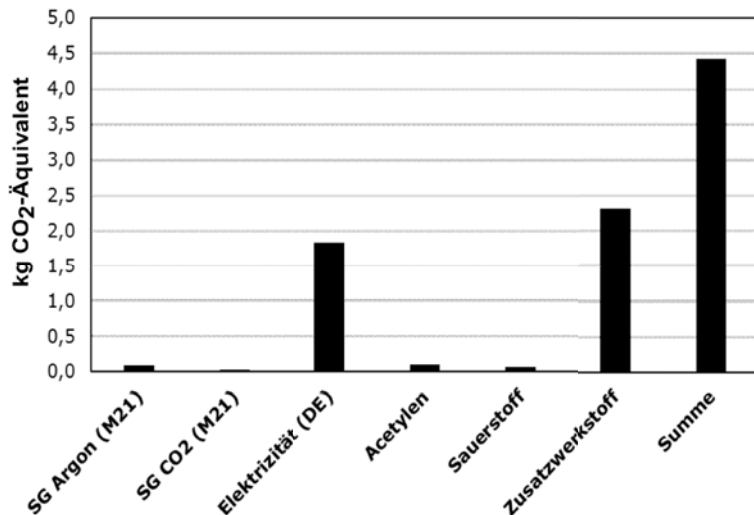


**Bild 3.** Versuchsaufbau zum MSG-Mehrlagenschweißen sowie konduktiver Probenvorwärmung

Die Sensormessdaten, welche für die Sachbilanzierung relevant sind, umfassen einerseits den Schweißprozess sowie vor- und nachgelagerte Prozesse. In Bild 4 ist dies exemplarisch für die Wirkleistungsaufnahme der Stromquelle und Handhabungstechnik sowie des Inverters zum Vorwärmen dargestellt. Zusätzlich werden der Drahtvorschub sowie Schutzgasvolumenstrom bezogen auf die Prozesszeit integral in der Sachbilanz berücksichtigt. Gleiches gilt für die korrespondierenden Gasverbräuche an Sauerstoff sowie Acetylen während des Brennschneidens zur Fertigung der Nahtvorbereitung. Die Messdaten, welche im Rahmen des erwähnten Schweißdatenmanagements archiviert werden, können direkt in das Softwarepaket OpenLCA zur Erstellung der Ökobilanz überführt werden. Dadurch steht in-situ zum Schweißprozess das entsprechende Umweltprofil als quantitatives Maß zur Verfügung (Bild 5).



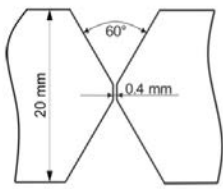
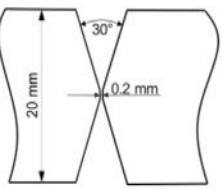
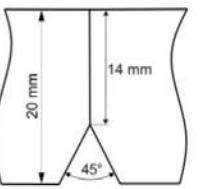
**Bild 4.** Aufbereitung von Messdaten zur automatisierten Sachbilanz



**Bild 5.** Automatisiert erstelltes Umweltprofil (Kategorie CO<sub>2</sub>-Äquivalent)

Die entwickelte Methode zur automatisierten Erstellung von Ökobilanzen ermöglicht es, eine Schweißaufgabe bezüglich der Umweltwirkung unter Berücksichtigung verschiedener Schweißverfahren zu bewerten. Wie in Tabelle 1 aufgeführt, umfassen die zu analysierenden Verfahren zwei MSG-Prozesse (Standard-Sprühlichtbogen (SLB) und modifizierter Sprühlichtbogen (mod. SLB)) sowie einen Laserstrahl-MSG-Hybridschweißprozess. Die funktionelle Einheit stellt 1 m Schweißnaht (V-Naht am Stumpfstoß) dar. Die Schweißversuche wurden an 20 mm dicken ebenen Platten aus niedrig legiertem Stahl durchgeführt.

**Tabelle 1.** Übersicht verschiedener Verfahrensvarianten (Prozesscharakteristika)

Schweißprozess	MSG SLB	MSG mod. SLB	Laser-MSG-Hybrid
<b>Kantenvorbereitung</b>			
<b>Grundwerkstoff</b>	20 mm; S690 (Fe > 95%)	20 mm; S960 (Fe > 95%)	20 mm; X120 (Fe > 95%)
<b>Zusatzwerkstoff</b>	Mn3Ni1CrMo (Fe > 95%)	Mn4Ni2CrMo (Fe > 95%)	Mn4Ni2CrMo (Fe > 95%)
<b>Schutzgas</b>	M21(82% Ar/18% CO <sub>2</sub> )	M21(82% Ar/18% CO <sub>2</sub> )	M21(82% Ar/18% CO <sub>2</sub> )
<b>Schweißgeschwindigkeit</b>	6,2 mm/s	6,7 mm/s	43,3 mm/s Wurzellage 13,3 mm/s Decklage
<b>Integrale Prozessleistung</b>	6,7 kW	12 kW	33 kW Wurzellage 11 kW Decklage

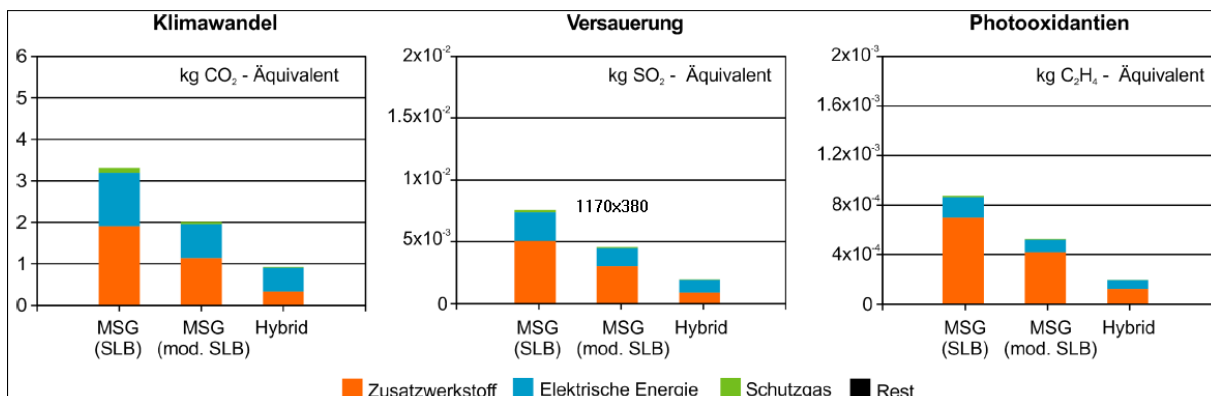
Die Ökobilanzierung wurde hierbei für den reinen Schweißprozess, d. h. ohne Berücksichtigung der Probenvorbereitung (Fertigung der Schweißnahtfuge, Heftschweißen, usw.) durchgeführt. Die Ergebnisse der Sachbilanzierung für die unterschiedlichen Schmelzschweißverfahren sind in Tabelle 2 dargestellt. Hinsichtlich des Werkstoff- sowie Energieverbrauches ist durch Einsatz energiedynamischer Prozessregelvarianten eine deutliche Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauches innerhalb des Spektrums der MSG-Prozesse möglich. Der Bedarf an Zusatzwerkstoff sowie korrespondierend dazu elektrischer Energie ist für den modifizierten Sprühlichtbogen etwa 40% geringer als bei Verwendung des Standard-Sprühlichtbogens.

Wesentliche Triebkraft des Ressourcenverbrauches ist demnach die Nahtvorbereitung, welche direkten Einfluss auf die Nahtquerschnittsfläche und damit Zusatzwerkstoffverbrauch hat. In diesem Kontext verfügt das Laser-MSG-Verfahren über den geringsten Verbrauch an relevanten Ressourcen, was gemäß des Makroschliffs durch den Wirkungsbereich des autogenen Laserstrahlprozesses zu erklären ist. Grundsätzlich muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Schweißbarkeit eines Produktes sowie die resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht als Auswahlkriterium für einen Schweißprozess von Relevanz sind. Gleichwohl ist bei Verfügbarkeit mehrerer Verfahrensvarianten die Ermittlung der ökoeffizientesten Fertigungsstrategie möglich.

**Tabelle 2.** Übersicht verschiedener Verfahrensvarianten (Sachbilanz)

Schweißprozess	MSG SLB	MSG mod. SLB	Laser-MSG-Hybrid
<b>Makroschliff</b>			
<b>Anzahl Lagen</b>	4	2	2
<b>Zusatzwerkstoffbedarf in g/m</b>	890	530	155
<b>Elektrische Energie in kWh/m</b>	2,1	1,3	0,9
<b>Schweißrauche in g/m</b>	7,2	3,6	0,6
<b>Sonstiges</b>	-	-	Druckluft Optik: 249 l

Die Umweltwirkungen der analysierten Schweißverfahren ist exemplarisch für die Kategorien Klimawandel, Versauerung sowie Photooxidantien in Bild 6 dargestellt. Die bereits in der Sachbilanzierung ermittelten Unterschiede zwischen den Verfahren sind hinsichtlich der relevanten Wirkkategorien ebenfalls vorhanden. Neben der verfahrens-spezifischen Umweltwirkung zeigt sich vor allem, dass der Verbrauch an Material (Zusatzwerkstoff) neben dem Energieverbrauch zum Betrieb der Schweißstromquellen, der Laserstrahlquellen sowie der Handhabungstechnik (Robotik) den höchsten Einfluss auf die Umweltwirkungen hat. Folglich zeigt das Laser-MSG-Hybridverfahren für die definierte funktionelle Einheit und Betrachtung des reinen Schweißprozesses bedingt durch den geringeren Zusatzwerkstoffbedarf deutlich reduzierte Umweltwirkungen als die korrespondierenden MSG-Schweißprozesse.



**Bild 6.** Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Schweißverfahren

## 4 Fazit

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde ein Workflow zur automatisierten Ökobilanzierung von Schweißverfahren implementiert. Dem Anwender steht somit ein Werkzeug zur Verfügung, die Umweltwirkungen von Schweißprozessen in-situ ohne erhöhtem Dokumentationsaufwand unter Berücksichtigung entsprechender Regelwerke und Normen abzuleiten. Dadurch werden insbesondere KMU in die Lage versetzt, den Anforderungen bezüglich der Bewertung der Ökoeffizienz von Fertigungsverfahren gerecht zu werden und somit auf die nationalen sowie internationalen klimapolitischen Rahmenbedingungen vorbereitet zu sein.

Die Analysen eines breiten Spektrums an Schweißverfahren haben gezeigt, dass eine Verringerung der Umweltwirkungen von Schweißverfahren demnach nur primär durch eine Reduktion des Zusatzwerkstoff sowie Energieverbrauchs zu realisieren ist. Hierbei zeigen Verfahren mit niedrigem Werkstoffeinsatz, im Extremfall autogene Verfahren, die geringsten Umweltwirkungen. Im Produktentstehungsprozess ist es daher notwendig, unter Berücksichtigung der Schweißbarkeit die ökologischen Verfahrenscharakteristika hinsichtlich konstruktiver, fertigungstechnischer sowie werkstoffspezifischer Randbedingungen zu bewerten, um die vorgeschriebenen Produkteigenschaften zu gewährleisten und die Umweltbelastung zu minimieren.

Damit der Workflow, der bei der Ökobilanzierung zu durchlaufen ist, vereinheitlicht und für jeden verständlich ist, fließen die Forschungsergebnisse direkt in die DIN SPEC 35235 „Nachhaltigkeit in der Schweißtechnik – Ökobilanzierung von Schweißverfahren“, ein. Dies ist die Grundlage, um die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen in der Schweißtechnik zu gewährleisten und so deren Akzeptanz in der Industrie zu erhöhen.

## 5 Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.209 N/DVS-Nummer 03.127 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Schrifttum

- [1] „Forschung und Innovation für die Menschen – Die Hightech-Strategie 2025 – Die Bundesregierung,“ 2020. [Online]. : <https://www.hightech-strategie.de>.
- [2] „Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050,“ [Online]. : <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
- [3] E. Miklos, U. Reisgen, B. Mayer, S. Noack und C. Ahrens, „Ohne Fügetechnik ist nix mit Nachhaltigkeit, ohne Fügetechnik ist nix mit erneuerbaren Energien und ohne Fügetechnik ist nix mit dem Energiewandel in der Zukunft,“ DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Düsseldorf, 2011.
- [4] J. Kim, K. Park, Y. Hwang und I. Park: „Sustainable manufacturing: a case study of the forklift painting process“. International Journal of Production Research, Bd. 48, pp. 3061-3078, 2010.
- [5] „Environmental and Climate Change Issues in the Shipbuilding industry“, OECD Council Working Party on Shipbuilding (WP6), 2010.
- [6] A. Kluczek und W. Wlosinski, „The role of manufacturing techniques in enterprises producing heating devices in the context of sustainable development“. Management and Production Engineering Review, Bd. 4, pp. 30-38, 2013.
- [7] G. Sproesser, Y. Chang, A. Pittner, M. Finkbeiner und M. Rethmeier: „Environmental energy efficiency of single wire and tandem gas metal arc welding“. Welding in the World, Bd. 61, Nr. 4, pp. 733-743, 2017.
- [8] G. Chetan und R. Venkateswara, „Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review,“ Journal of Cleaner Production, Bd. 100, pp. 17-34, 2015.
- [9] J. R. Duflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld und C. Herrmann: „Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach“. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Bd. 61, pp. 587-609, 2012.
- [10] L. M. S. Campos, D. A. de Melo Heizen, M. A. Verdinelli und P. A. Cauchick Miguel: „Environmental performance indicators: a study on ISO 14001 certified companies“. Journal of Cleaner Production, Bd. 99, pp. 286-296, 2015.

- [11] S. Velchev, I. Kolev, K. Ivanov und S. Gechevski: „Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning“. Journal of Cleaner Production, Bd. 80, pp. 139-149, 2014.
- [12] „Sustainable welding: What are the crucial factors?“ Fronius International, [Online]: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/magazine/2018/sustainable-welding>.
- [13] „BlueEvolution – Die Nachhaltigkeitsinitiative von den Entdeckern des ‚Code des Schweißens‘.“, EWM AG, [Online]: [https://www.ewm-group.com/downloads/262418/WM1003\\_00\\_BLUEEVOLUTION.PDF](https://www.ewm-group.com/downloads/262418/WM1003_00_BLUEEVOLUTION.PDF).
- [14] N. Ordman, „Green welding: good for the environment and the bottom line“. AWS, 2019. [Online]: <https://insights.globalspec.com/article/12504/green-welding-good-for-the-environment-and-the-bottom-line>.
- [15] J. Jamal, B. Darras und H. Kishawy: „A study on sustainability assessment of welding processes“. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Bd. 234, Nr. 3, pp. 501-512, 2019.
- [16] H. Ward, M. Burger, Y. Chang, P. Fürstmann, S. Neugebauer, A. Radebach, G. Sproesser, A. Pittner, M. Rethmeier, E. Uhlmann und J. Steckel: „Assessing carbon dioxide emission reduction potentials of improved manufacturing processes using multiregional input output frameworks“. Journal of Cleaner Production, Bd. 163, pp. 154-165, 2017.
- [17] K. Epping und H. Zhang: „A Sustainable Decision-Making Framework for Transitioning to Robotic Welding for Small and Medium Manufacturers“. Sustainability, Bd. 10, Nr. 3651, pp. 2-18, 2018.
- [18] C. Favi, F. Campi und M. Germani: „A data framework for environmental assessment of metal arc welding processes and welded structures during the design phase“. Int J Adv Manuf Technol, Bd. 105, pp. 967-993, 2019.
- [19] ISO 14040:2006 „Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework“.
- [20] ISO 14044:2006 „Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines“.
- [21] W. Klöpffer und B. Grahl, Ökobilanz (LCA): ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [22] J. Guinee: „Handbook on life cycle assessment – Operational guide to the ISO standards“. International Journal of Lifecycle Assessment, Bd. 6, p. 255, 2001.
- [23] „Life Cycle Assessment Methodology Report“. World Steel Association, Brüssel, 2011.
- [24] C. Fabry, A. Pittner und M. Rethmeier: „WeIDX – Datei- und zugehörige Qualitätsstandards für Forschungsdaten im Bereich Schweißtechnik“. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 2019. [Online]: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/WeIDX/welidx.html>.
- [25] OpenLCA. [Online]: <http://www.openlca.org/>.
- [26] GaBi Solutions. [Online]: <http://www.gabi-software.com/deutsch/index/>.