

Offener Brief an die Fachkollegien und die Senatsmitglieder der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Freiburg im Breisgau, den 17.2.2017

Aufnahme der Grundlagenaspekte der Nachhaltigkeitswissenschaften in den Fächerkanon der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Sehr geehrte Damen und Herren,

Die nachhaltige Gestaltung unserer Gesellschaft ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Viele Forscherinnen und Forscher in diesem Land tragen mit ihrer Arbeit zum Aufbau der wissenschaftlichen Basis der Nachhaltigkeit bei. Diese Arbeit findet sowohl in etablierten Disziplinen (Erforschung neuer Wirkmechanismen, Entwicklung von Technologien und Steuerungsinstrumenten) als auch disziplinübergreifend statt. Bei der interdisziplinären Forschung zur Nachhaltigkeit steht der Systemansatz im Mittelpunkt, also das Studium der Auswirkungen von und Wechselwirkungen zwischen einzelnen sektoralen Entwicklungen im globalen sozioökologischen System (Abson et al., 2016; Binder et al., 2013; Fischer-Kowalski and Weisz, 1999). Die interdisziplinäre Systemperspektive auf die Nachhaltigkeit ist zwingend erforderlich, da nur sie eine skalen- und sektorübergreifende wissenschaftliche Beschreibung und Bewertung von Umwelt-Mensch-Technik-Institutionen-Systemen und deren nachhaltiger Entwicklung ermöglicht und somit robuste Entscheidungshilfen für die verschiedenen Akteure in der Gesellschaft liefern kann (Gößling-Reisemann, 2008; Liu et al., 2015).

Die interdisziplinären Nachhaltigkeitswissenschaften haben sich als Forschungsgebiete mit eigener Grundlagenforschung international und in Deutschland etabliert. Während in der Frühphase der Entwicklung von interdisziplinären Beschreibungs- und Bewertungsmethoden auf die vorhandenen theoretischen Grundlagen und Theorien der beteiligten Fachgebiete zurückgegriffen wurde, hat sich schnell gezeigt, dass zusätzlich zu den disziplinären Grundlagen auch neue, eigene Forschungsansätze notwendig sind. Beispiele für solche grundlegenden Konzepte beinhalten das Rahmenwerk „Sustainability Science“ (Clark and Dickson, 2003; Clark, 2007), die Erfassung von Stoffströmen, Energieflüssen und Materialbeständen in der Anthroposphäre, (u.a. Glöser et al., 2013; Gordon et al., 2006; Krausmann et al., 2017; Müller et al., 2006; Schiller et al., 2016), die systematische Entwicklung von Bewertungsmethoden wie dem Life Cycle Assessment, (z.B. Heijungs and Suh, 2002; Klöpffer, 2008) und den dazugehörigen Allokationsmethoden (Majeau-Bettez et al., 2014), die Identifikation und Bewertung kritischer Rohstoffe (z.B. Achzet and Helbig, 2013; Helbig et al., 2016a, 2016b), die Entwicklung gekoppelter monetärer und physischer Aufkommens- und Verwendungstabellen für die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, (z.B. Fischer-Kowalski et al., 2011; Pauliuk et al., 2015; Többen, 2017; Weisz and Duchin, 2006), systemtheoretische Arbeiten zu Mechanismen von technisch-institutioneller Innovation (Bringezu, 2015), der systemischen Betrachtung von Produktion (Duflou et al., 2012), der integrierten Entwicklung nachhaltiger Produkte und Prozesse (Umeda et al., 2012), der

Einbettung industrieller Systeme in natürliche Stoffkreisläufe (Huber, 2000) sowie integrierte Analysen nachhaltiger Transformationspfade der Energie-, Ökonomie- und Landnutzungssysteme (Clarke et al., 2014).

Die Arbeitsgruppen zu interdisziplinären Nachhaltigkeitswissenschaften mit Grundlagenforschung in Deutschland sind zahlreich und eine Auflistung würde den Rahmen dieses Briefes sprengen. Ein Querschnitt durch die Gruppen findet sich in Form der Liste der Unterzeichner dieses Briefes.

Ein großer Teil der Grundlagenforschung für interdisziplinäre Nachhaltigkeitswissenschaften findet nicht mehr innerhalb der traditionellen Disziplinen statt, sondern in neu entstandenen wissenschaftlichen Communities. Beispiele für neue Communities sind Industrial Ecology, Life Cycle Engineering and Management, Ecological Economics, Integrated Assessment Modelling, Humanökologie und sozial-ökologische Forschung. In diesen Communities arbeiten WissenschaftlerInnen aus verschiedensten Disziplinen oft sehr eng an gemeinsamen Forschungsfragen, insbesondere an der Aufklärung von grundlegenden Mechanismen des globalen sozioökologischen Systems und der Erarbeitung von Grundlagenmethodik.

Mitglieder dieser Communities können regelmäßig ihre interdisziplinären Forschungsthemen im Fächerkanon der DFG nicht verorten. Beispiele für nicht oder nur sehr schwer verortbare Grundlagenforschung zur nachhaltigen Entwicklung sind im vorherigen Paragraphen aufgelistet. Andere Förderer exzellenter Forschung, wie z.B. der Europäische Forschungsrat (ERC), bilden mit ihrer Panelsystematik einerseits interdisziplinäre Themen bereits stärker ab und sind andererseits auch flexibler und dynamischer in Bezug auf die thematische Abgrenzung.

Aufgrund hoher Erwartungen von Öffentlichkeit und Politik sowie schwacher institutioneller Strukturen in den interdisziplinären Nachhaltigkeitswissenschaften kommt die Förderung der Grundlagenforschung oft zu kurz, was den wissenschaftlichen Fortschritt in diesen hochrelevanten Bereichen unnötig bremst. Dieser Mangel an grundlegender Forschungsförderung hat außerdem gravierende Auswirkungen auf die Qualität der Nachhaltigkeitsforschung. Es mangelt unter anderem an offenen und transparenten disziplinübergreifenden Datenbanken zu industriellen Prozessen, Landwirtschaft, und urbanen Systemen, was dazu führt, dass viele Forschungsarbeiten auf Annahmen oder schlechten Proxydaten beruhen. Es gibt wenige Förderung und Anreize für einzelne ForscherInnen und Forschergruppen zur kumulativen Wissensbasis beizutragen. Dieser Mangel an Anreizen bremst den wissenschaftlichen Fortschritt, was insbesondere angesichts des immer kleiner werdenden Zeitfensters zur wirkungsvollen Bekämpfung des Klimawandels und eines wirksamen Ressourcenschutzes problematisch erscheint. Auch eine intensive Auseinandersetzung mit Systemlösungen in Hinblick auf ihre absolute Nachhaltigkeit kann nur datenbasiert und auf der Basis eines grundlegenden Verständnisses der Wirkmechanismen zwischen Mensch, Umwelt und Technik erfolgen. Die Replizierbarkeit publizierter Forschungsergebnisse und die Wiederverwertbarkeit von Daten sind gering, (z.B. Speck et al., 2015).

Die Aufnahme der Nachhaltigkeitswissenschaften in den Fächerkanon der DFG kann wesentlich dazu beitragen, die Grundlagenforschung zur nachhaltigen Entwicklung in der deutschen Forschungslandschaft zu stärken. Bei der Grundlagenforschung zur Nachhaltigkeit geht es um die systematische Analyse der physischen Basis von Wirtschaft und Gesellschaft, die Funktionsweise und die Regulation des sozio-industriellen Metabolismus, die damit verbundenen ökologischen, sozialen und ökonomischen Implikationen von der lokalen, über die regionale bis zur globalen Ebene sowie die politisch-gesellschaftlichen Steuerungsmöglichkeiten. Außerdem spielt qualitative empirische und konzeptionelle Forschung zu Wechselwirkungen und Akteuren in sozio-ökologischen Systemen eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Nachhaltigkeitskonzepten und Bewertungsmethoden zur

Nachhaltigkeit. Während die Veränderungen der natürlichen Umwelt, die Funktionsprinzipien ökonomischen Handelns und menschlichen Verhaltens, spezifische Ingenieurtechnologien und der Metabolismus von Organismen vom Programm der DFG in vielfältiger Weise abgedeckt werden, ist die Erforschung des komplexen Systemgefüges der Anthroposphäre zwar hochrelevant, im DFG-Fächerkanon aber derzeit kaum anschlussfähig.

Vor diesem Hintergrund möchten wir die Fachkollegien der Deutschen Forschungsgemeinschaft darum bitten, die Grundlagenaspekte der Nachhaltigkeitswissenschaften im Fächerkanon der DFG stärker zu verankern und schlagen als Diskussionsgrundlage folgende sich ergänzende Bereiche mit jeweiligen Forschungsgegenständen vor:

Innerhalb der „Geistes- und Sozialwissenschaften“: Etablierung eines Fachkollegiums und/oder Faches für ***Umweltsozialwissenschaften*** mit quantitativer und qualitativer empirischer und konzeptioneller Forschung zu Wechselwirkungen, Akteuren und Institutionen in sozio-ökologischen Systemen bei expliziter Berücksichtigung von stofflichen und/oder technischen Aspekten der Wechselwirkungen.

Innerhalb der „Lebenswissenschaften“ oder „Naturwissenschaften“: Etablierung eines Fachkollegiums und/oder Faches für ***Umweltwissenschaften oder Umweltnaturwissenschaften*** mit Forschung zu Ökosystemen, Ökosystemdienstleistungen, zur Ko-Entwicklung von Mensch-Umwelt-Systemen und zur Reaktion von Ökosystemen auf menschliche Einwirkung bei expliziter Berücksichtigung von sozialen, ökonomischen und/oder technischen Fragestellungen. Außerdem schlagen wir vor, die Fachgebiete 23 oder 34 um die Umweltwissenschaften zu erweitern.

Innerhalb der „Ingenieurwissenschaften“: Etablierung eines Fachkollegiums oder Faches für ***(Umwelt-Mensch-Technik)-Systemanalyse*** mit transparenten und replizierbaren systematischen Analysen der physischen Basis von Wirtschaft und Gesellschaft sowie der Funktionsweise und der Regulation des sozio-industriellen Metabolismus bei expliziter Berücksichtigung von sozialen und/oder ökonomischen Wechselwirkungen. Aufnahme der Systemanalyse in eines der Fachgebiete innerhalb der Ingenieurwissenschaften.

Für Rückfragen und weitere Diskussion stehen wir gerne zur Verfügung. Die mit (*) gekennzeichneten Unterzeichner haben sich bereit erklärt, als Ansprechpartner zu fungieren.

Mit freundlichen Grüßen,

Prof. Dr. Stefan Baumgärtner, Lehrstuhl für Umweltökonomie und Ressourcenmanagement,
Universität Freiburg

Andres Blum, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung,
Dresden

PD Dr. phil. Dipl.-Ing. Stefan Böschen, Ko-Leitung Forschungsbereich Wissensgesellschaft und
Wissenspolitik, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)

(*) Prof. Dr. Stefan Bringezu, Professor für Nachhaltiges Ressourcenmanagement, Leiter der
Forschungsgruppe Sustainable Resource Futures am Center for Environmental Systems Research

(CESR) der Universität Kassel. Ansprechpartner für ein mögliches Fachgebiet „Umwelt-Mensch-Technik-Systemanalyse“, Kontakt: bringezu@cesr.de

Prof. Dr. Timo Busch, Inhaber des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre an der Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität Hamburg

Prof. Dr. Michael Decker, Institutsleiter und Professor für Technikfolgenabschätzung am Institut für Philosophie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Dr. Mathias Effenberger, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

apl. Prof. Dr. Klaus Fichter, Department für Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, Apl. Professur für Innovationsmanagement und Nachhaltigkeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Prof. Dr. Daniel Fischer, Junior-Professor für Nachhaltigkeitswissenschaft, Leuphana Universität Lüneburg

Prof. Dr. Magnus Fröhling, Professur für Allgemeine BWL, insb. Rohstoffmanagement, TU Bergakademie Freiberg

Prof. Doris Fuchs, Ph.D., Zentrum für Interdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung, Westfälische Wilhelms Universität Münster

Prof. Dr. rer. nat. Stefan Gößling-Reisemann, Professur für Resiliente Energiesysteme, Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen

Prof. Dr. Jutta Günther, Professur für Volkswirtschaftslehre, insbes. Innovations- und Strukturökonomik, Universität Bremen

Prof. Dr. Rainer Griebshammer, Mitglied der Geschäftsführung und Forschungsschwerpunkt Nachhaltiger Konsum und Produkte, Öko-Institut e.V.

Prof. Dr. Armin Grunwald, Institutsleiter, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am KIT. Professor für Technikphilosophie am Institut für Philosophie des KIT. Leiter des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Dr. Kerstin Hermuth-Kleinschmidt, NIUB-Nachhaltigkeitsberatung, Freiburg

Prof. Dr. Bernd Hirschl, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin und Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Prof. Dr. Thomas Hirth, Vizepräsident für Innovation und Internationales, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Ralf Isenmann, BWL im Technologie- und Innovationsmanagement, Wilhelm Büchner Hochschule | Private Fernhochschule Darmstadt, und IPMI Institut für Projektmanagement und Innovation der Universität Bremen

Dr. Klaus Jacob, Forschungsdirektor am Forschungszentrum für Umweltpolitik, Freie Universität Berlin

Dr. Götz Kaufmann, Managing Director Environmental Justice Institute | Centre for Environmental Justice Studies, Berlin

Prof. Dr. Rolf Kreibich, Professor für Soziologie der Technik, Technikfolgenabschätzung und Zukunftsforschung; Wissenschaftlicher Direktor und Geschäftsführer des Sekretariats für Zukunftsforschung an der Freien Universität Berlin

Dr. Elmar Kriegler, Stellvertretender Leiter des Forschungsbereichs Nachhaltige Lösungsstrategien, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz, Nachhaltiges Technologie- und Innovationsmanagement / Sustainable Technology and Innovation Management, Institut für Industrial Ecology (INEC), Hochschule Pforzheim

Prof. Dr. Dr. Walter Leal, Fakultät Life Sciences, HAW Hamburg

Prof. Dr. Markus Lederer, Leiter des Arbeitsbereichs Internationale Politik, Technischen Universität Darmstadt

Dr. Sina Leipold, Leiterin der Forschungsgruppe Circulus, Professur für Forst- und Umweltpolitik, Universität Freiburg.

Dr. Gunnar Luderer, Arbeitsgruppenleiter „Global Energy Systems“, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

(*) Prof. Dr. Jens Newig, Lehrstuhl für Governance and Sustainability, Fakultät Nachhaltigkeit, Leuphana Universität Lüneburg, Ansprechpartner für ein mögliches Fachgebiet „Umweltsozialwissenschaften“, Kontakt: newig@uni.leuphana.de

Jun-Prof. Stefan Pauliuk, PhD, Nachhaltiges Energie- und Stoffstrommanagement, Universität Freiburg.

Dr.-Ing. Alexandra Pehlken, Nachwuchsgruppenleiterin Cascade Use, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

(*) Dr. Martin Pehnt, Geschäftsführer und wissenschaftlicher Vorstand, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Ansprechpartner für ein mögliches Fachgebiet „Umwelt-Mensch-Technik-Systemanalyse“, Kontakt: martin.pehnt@ifeu.de

Prof. Dr. Michael Pregernig, Professur für Sustainability Governance, Institut für Umweltsozialwissenschaften und Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Anika Regett, M.Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Doktorandin, Technische Universität München

Prof. Dr. Ortwin Renn, Wissenschaftlicher Direktor am Institute for Advanced Sustainability Studies e.V.(IASS), Potsdam

Ulrich Riehm, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Holger Rohn, Freier Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, sowie Geschäftsführer des Faktor 10 - Institut für nachhaltiges Wirtschaften gGmbH

Prof. Dr. Arno Rolf, Professor für Informatiksysteme in Organisationen und Gesellschaft an der Universität Hamburg,

Jutta Sandner, (Raumplanerin, Pädagogin, Musikerin), Münster

(*) apl. Prof. Dr. habil. Rüdiger Schaldach, Leiter der Forschungsgruppe GRID-Land am Center for Environmental Systems Research, Universität Kassel, Ansprechpartner für ein mögliches Fachgebiet „Umweltnaturwissenschaften“, Kontakt: schaldach@usf.uni-kassel.de

(*) Prof. Dr. Heiner Schanz, Professur für Environmental Governance, Universität Freiburg. Ansprechpartner für ein mögliches Fachgebiet „Umweltsozialwissenschaften“, Kontakt: heiner.schanz@ifp.uni-freiburg.de

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, Fachgebietsleiterin Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft, Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. Mario Schmidt, Direktor des Instituts für Industrial Ecology, Hochschule Pforzheim / Leuphana Universität Lüneburg

Prof. Dr. Ulf Schrader, Leiter des Fachgebiet Arbeitslehre/ Ökonomie und Nachhaltiger Konsum an der Technische Universität Berlin, sowie Direktor der School of Education der TU Berlin (SETUB)

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Stefan Seuring, Professur für Supply Chain Management, Universität Kassel

Prof. Dr. Stefanie Sievers-Glotzbach, Juniorprofessur Ökonomie der Gemeingüter, Department für Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Dr.-Ing. Marcus Steierwald, Dozent für Diskurs & Integrierte Planung im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Tübingen

Dr. Volker Stelzer, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Nachhaltigkeit und Umwelt, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Dr. Andrea Thorenz, Akad. Rätin, Institut für Materials Resource Management, Universität Augsburg

Prof. Dr. Tobias Viere (Prof. für Energie- und Stoffstromanalyse), Institut für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim.

Dr. Herena Torío, PPRE-Postgraduate Programme Renewable Energy, Institut für Physik, Universität Oldenburg.

Dr. Gregor Weber, Gründer und Geschäftsführer ecoistics.institute - Beratung und Forschung für nachhaltiges Wirtschaften

Dr.-Ing. Marcel Weil, I. Gruppenleiter „Ressourcen, Umwelt und Nachhaltigkeit“. Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicher (HIU), Karlsruhe Institut für Technologie (KIT). II. Gruppenleiter „Materialien für emergente Technologien“. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Ernst Ulrich v. Weizsäcker, Ko-Vorsitzender des International Panel on Sustainable Resource Management der UNEP und Ko-Präsident des Club of Rome

Literatur

- Abson, D.J., Fischer, J., Leventon, J., Newig, J., Schomerus, T., Vilsmaier, U., von Wehrden, H., Abernethy, P., Ives, C.D., Jager, N.W., Lang, D.J., 2016. Leverage points for sustainability transformation. *Ambio* 46, 1–10.
- Achzet, B., Helbig, C., 2013. How to evaluate raw material supply risks-an overview. *Resour. Policy* 38, 435–447.
- Binder, C.R., Hinkel, J., Bots, P.W.G., Pahl-Wostl, C., 2013. Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. *Ecol. Soc.* 18, 26.
- Bringezu, S., 2015. On the mechanism and effects of innovation: Search for safety and independence of resource constraints expands the safe operating range. *Ecol. Econ.* 116, 387–400.
- Clark, W.C., 2007. Sustainability science: a room of its own. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 1737–1738.
- Clark, W.C., Dickson, N.M., 2003. Sustainability science: The emerging research program. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 100, 8059–8061.
- Clarke, L.E., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P.R., Tavoni, M., van der Zwaan, B.C.C., van Vuuren, D.P., 2014. Assessing Transformation Pathways., in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler,].
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., Kellens, K., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 61, 587–609.
- Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Giljum, S., Lutter, S., Mayer, A., Bringezu, S., Moriguchi, Y., Schütz, H., Schandl, H., Weisz, H., 2011. Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting. *J. Ind. Ecol.* 15, 855–876.
- Fischer-Kowalski, M., Weisz, H., 1999. Society as Hybrid between Material and Symbolic Realms: Toward a Theoretical Framework of Society-Nature Interaction. *Adv. Hum. Ecol.* 8, 215–251.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L. a, 2013. Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation. *Environ. Sci. Technol.* 47, 6564–72.
- Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E., 2006. Metal stocks and sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 1209–14.
- Göbbling-Reisemann, S., 2008. Von der Verschränktheit der Nachhaltigkeits-Dimensionen., in: *Industrial Ecology. Vieweg+Teubner.*, pp. 264–270.
- Heijungs, R., Suh, S., 2002. *Computational Structure of Life Cycle Assessment.* Kluwer Academic Publications., Dordrecht, The Netherlands.
- Helbig, C., Bradshaw, A.M., Kolotzek, C., Thorenz, A., Tuma, A., 2016a. Supply risks associated with CdTe and CIGS thin-film photovoltaics. *Appl. Energy* 178, 422–433.
- Helbig, C., Wietschel, L., Thorenz, A., Tuma, A., 2016b. How to evaluate raw material vulnerability - An overview. *Resour. Policy* 48, 13–24.
- Huber, J., 2000. Towards industrial ecology: sustainable development as a concept of ecological modernization. *J. Environ. Policy Plan.* 2, 269–285.
- Klöppfer, W., 2008. Life Cycle Sustainability Assessment of Products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 89.
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H., Haberl, H., 2017. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 201613773.
- Liu, J., Mooney, H., Hull, V., Davis, S.J., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K.C., Gleick, P., Kremen, C., Li, S., 2015. Systems integration for global sustainability. *Science (80-.)*. 347, 12588321–12588329.
- Majeau-Bettez, G., Wood, R., Strømman, A.H., 2014. Unified Theory of Allocations and Constructs in Life Cycle Assessment and Input-Output Analysis. *J. Ind. Ecol.* 18, 747–770.
- Müller, D.B., Wang, T., Duval, B., Graedel, T.E., 2006. Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 16111–16116.
- Pauliuk, S., Majeau-Bettez, G., Müller, D.B., 2015. A General System Structure and Accounting Framework for Socioeconomic Metabolism. *J. Ind. Ecol.* 19, 728–741.
- Schiller, G., Müller, F., Ortlepp, R., 2016. Mapping the anthropogenic stock in Germany: Metabolic evidence for a circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.*
- Speck, R., Selke, S., Auras, R., Fitzsimmons, J., 2015. Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. *J. Ind. Ecol.* 00, n/a–n/a.
- Többen, J., 2017. On the simultaneous estimation of physical and monetary commodity flows. *Econ. Syst. Res.* 5314, 1–24.
- Umeda, Y., Takata, S., Kimura, F., Tomiyama, T., Sutherland, J.W., Kara, S., Herrmann, C., Duflou, J.R., 2012. Toward integrated product and process life cycle planning - An environmental perspective. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 61, 681–702.
- Weisz, H., Duchin, F., 2006. Physical and monetary input-output analysis: What makes the difference? *Ecol. Econ.* 57, 534–541.