

Schmidt, Mario

Research Report

Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement

Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 124

Provided in Cooperation with:

Hochschule Pforzheim

Suggested Citation: Schmidt, Mario (2006) : Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement, Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 124, Hochschule Pforzheim, Pforzheim,
<https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:951-opus-616>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/97580>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

Mario Schmidt

Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im
Stoffstrommanagement

Nr. 124

Prof. Mario Schmidt
Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
mario.schmidt@hs-pforzheim.de

Mario Schmidt ist Professor an der Fakultät für Wirtschaft und Recht und wissenschaftlicher Direktor des Instituts für Angewandte Forschung IAF. Er forscht auf dem Gebiet des Stoffstrommanagements und des Life Cycle Assessments und lehrt Quantitative Methoden der BWL sowie Umweltmanagement.

Herausgeber: Prof. Dr. Ansgar Häfner, Prof. Dr. Norbert Jost,
Prof. Dr. Karl-Heinz Rau, Prof. Dr. Roland Scherr,
Prof. Dr. Christa Wehner, Prof. Dr. Rainer Maurer
(geschäftsführend; maurer@hs-pforzheim.de)

Sekretariat: Frau Alice Dobrinski
Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
alice.dobrinski@fh-pforzheim.de
Telefon: 07231/28-6201
Telefax: 07231/28-6666

Ausgabe: Dezember 2006

Mario Schmidt

**Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im
Stoffstrommanagement**

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Historie	5
2.1 Die thermische Effizienz und Captain Riall Sankey	5
2.2 Die Anwendung von Sankey-Diagrammen in Deutschland	10
2.3 Stoffstromwirtschaft in der Stahlindustrie	17
3 Methodik	25
3.1 Implizite Annahmen der Sankey-Darstellung.....	25
3.2 Darstellungsvarianten von Sankey-Diagrammen	26
3.3 Sankey-Diagramme mit Wertströmen.....	33
3.4 Sankey-Diagramme für die betriebliche Kostenstruktur.....	35
3.5 Sankey-Diagramme ohne Vollkostenrechnung	40
3.6 Anwendungsbeispiel: Innerbetriebliches Recycling	43
4 Schlussfolgerung	48
Quellen	50

Zusammenfassung

Ein wichtiges Hilfsmittel, Ineffizienzen und Einsparpotentiale im Umgang mit Ressourcen aufzuzeigen, ist das so genannte Sankey-Diagramm. Es wurde vor über 100 Jahren von dem irischen Ingenieur Captain Riall Sankey erstmals für die Analyse der thermischen Effizienz von Dampfmaschinen verwendet und wird seitdem eingesetzt, um die Energie- und Materialbilanzen von komplexen Systemen zu verdeutlichen. Interessanterweise hat es in der Geschichte des 20. Jahrhunderts immer dann eine wichtige Rolle gespielt, wenn Rohstoffe knapp und teuer waren und die Ingenieure große Anstrengungen unternahmen, die technischen Systeme zu verbessern. So wurden Sankey-Diagramme bei den ersten wissenschaftlichen Vergleichstests von PKWs zu Beginn des 20. Jahrhunderts eingesetzt, als der Wirkungsgrad der Automobile noch katastrophal niedrig war. Nach dem ersten Weltkrieg nutzte man die Diagramme, um Wärmebilanzen von Produktionsanlagen für Glas oder Zement zu erstellen und den Energieeinsatz zu optimieren. In den 30er Jahren spielten Stahl und Eisenerz im Vorkriegsdeutschland eine strategische Rolle – der effiziente Umgang wurde mit Sankey-Diagrammen veranschaulicht. Sie sind seit den 90er Jahren Standard-Darstellungen beim Life Cycle Assessment von Produkten. Sankey-Diagramme können auch dazu eingesetzt werden, um die Wertströme in betrieblichen Systemen oder längs globaler Wertschöpfungsketten abzubilden. In dem Diskussionspapier werden neben der historischen Entwicklung die methodischen Aspekte und impliziten Annahmen solcher Sankey-Diagramme behandelt.

Summary

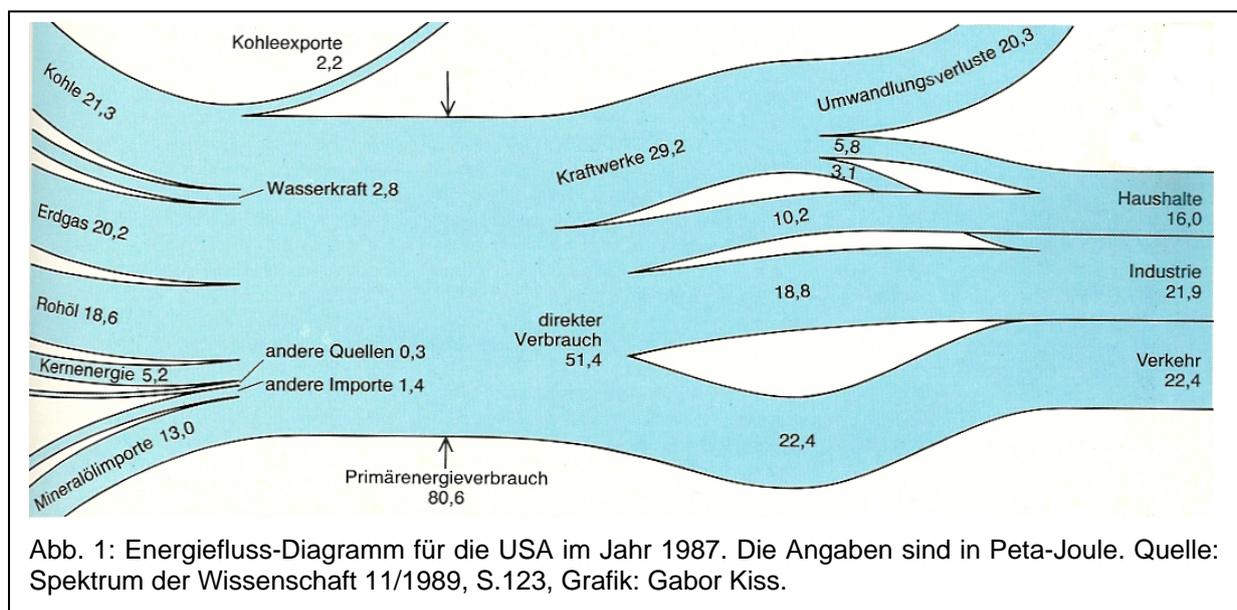
An important aid helping to identify inefficiencies and potentials for savings when dealing with resources is the Sankey diagram. It was first used over 100 years ago by the Irish engineer Captain Riall Sankey to analyse the thermal efficiency of steam engines, and has since been applied to illustrate the energy and material balances of complex systems. Interestingly, in the history of the 20th century it has always played a major role when raw materials were scarce and expensive and engineers were making great efforts to improve the technical systems. For instance, Sankey diagrams were used for the first scientific car comparison tests at the beginning of the 20th century when automobile efficiency was still disastrously low. After the First World War the diagrams were used to produce thermal balances of production plants for glass and cement, and to optimise the energy input. In the 1930s steel and iron ore played a strategic role in Nazi Germany. Their efficient use was highlighted with Sankey diagrams. Since the 1990s these diagrams have become standard for displaying data in Life Cycle Assessments of products. Sankey diagrams can also be used to map value flows in systems at operational level, or along global value added chains. The discussion paper not only charts the historical development, but also discusses the methodology and the implicit assumptions of such Sankey diagrams.

1 Einleitung

Der Einsatz von Sankey-Diagrammen ist seit langer Zeit Standard in Technik und Naturwissenschaften. Sie werden als graphische Wärmebilanz (Minister of Fuel and Power 1944, S. 709), Wärmebilanzdiagramm (Christensen 1990, S. 394), Energiefluss-Bild (Schnitzer 1991) oder eben als Sankey-Diagramm (Pople 2001, S. 138) bezeichnet. Im Mittelpunkt stehen dabei stets der Energiefluss und seine Aufteilung auf verschiedene Quellen oder Senken, dargestellt durch Pfeile, deren Breite die Energiemenge andeutet. Auch Materialströme werden oft mit Sankey-Diagrammen dargestellt und z.B. als Materialfließbilder (Kölbel u. Schulze 1960) bezeichnet.

Diese graphische Darstellungsform veranschaulicht auf einfache Weise mitunter komplexe Zusammenhänge. So war es bis in die 90er Jahre in Deutschland üblich, die Energieflüsse in der Energiewirtschaft mittels solcher detaillierten Diagramme darzustellen (Abb. 2). Ein einfacheres Energiediagramm bildet den Energiefluss der USA ab (Abb. 1). Aber Sankey-Diagramme wurden auch zur Darstellung anderer Sachverhalte genutzt. In den letzten Jahren gewinnen sie im Zusammenhang mit der Ressourcenfrage und der Forderung nach effizienter Technologie und Materialeffizienz wieder an Bedeutung.

Was weniger bekannt ist: Auch die Einführung des Sankey-Diagramms vor mehr als 100 Jahren durch seinen Erfinder, den Iren Captain Riall Sankey, hing ursprünglich



mit der Forderung nach Effizienz, in diesem Fall von Dampfmaschinen, zusammen. Ob für sparsamere Automobile oder für produktivere Stahlwerke, das Sankey-Diagramm wurde später stets eingesetzt, wenn es um den Verbrauch knapper Ressourcen ging.

2 Historie

2.1 Die thermische Effizienz und Captain Riall Sankey

Im späten 19. Jahrhundert versuchten die Ingenieure in den aufstrebenden Industrieländern mit wissenschaftlichen Methoden, die Dampfmaschinen weiter zu verbessern und auf die jeweiligen Anwendungen zu optimieren. Eine große Hilfe war dabei das Theoriegebäude der Thermodynamik, das in diesen Jahren vervollständigt wurde. Besonders die Frage, was eine ideale Dampfmaschine sein könnte, wurde intensiv diskutiert. Der beste thermodynamische Kreislauf, der Carnot-Prozess, war für praktische Anwendungen zu abstrakt. Stattdessen wurde von William J. M. Rankine und Rudolf Clausius der nach ihnen benannte Claudius-Rankine-Prozess vorgeschlagen, mit dem man reale Maschinen vergleichen wollte.

In den 70er Jahren nutzte Willard Gibbs das Entropie-Temperatur-Diagramm. Damit wurde es möglich zu verdeutlichen, mit welchem Wirkungsgrad eine Maschine die Wärmeenergie in Arbeit umsetzt (Cardwell, 1995, S. 360). Auch der irische Ingenieur Captain Riall Sankey beschäftigte sich mit der Frage, wie man eine ideale „praktische“ Dampfmaschine definieren kann, wie der Wirkungsgrad oder die Effizienz gemessen wird. In diesem Zuge nutzte er für Beratungen der Institution of Civil Engineers erstmals das nach ihm benannte Diagramm, 1898 wurde es veröffentlicht.

Captain Matthew Henry Phineas Riall Sankey wurde am 9. November 1853 als Sohn eines Generals in Menagh im Landkreis Tipperary in Irland geboren (Anonymus 1925). Er ging im schweizerischen Morges und Schaffhausen zur Schule, kam dann an die Königliche Militärakademie in Woolwich bei Greenwich, einer der damals besten technischen Schulen Großbritanniens, und schließlich an die Schule für Militäringenieurwesen in Chatham in der Grafschaft Kent. Er war einer der Besten, hatte ein profundes theoretischen Wissen, erhielt 1873 sein Patent als Königlicher Ingenieur und diente dann in England, in Gibraltar und später als Ausbilder im neuen Royal

Military College in Kingston, Kanada. 1882 wurde er der Landesvermessung in Southampton zugeteilt.



Abb. 3: Captain Matthew Henry Phineas Riall Sankey (1853-1926). Quelle: Institution of Mechanical Engineers.

Bei der drucktechnischen Erstellung von Landkarten lernte er den galvanischen Klischeedruck kennen. Dazu war Strom erforderlich, der damals aus teuren Batterien gespeist wurde. Sankey suchte nach alternativen Methoden und setzte Dynamos ein, die von konstant laufenden Dampfmaschinen betrieben wurden. Er testete mehrere hinsichtlich ihrer Eignung und stieß auf die Maschinen von Peter Willans, einem der führenden Erfinder im Bereich der Dampfmaschinen (Cardwell 1993, S. 122). Seine Maschinen wurden in Großbritannien in den meisten Kraftwerken eingesetzt. In der folgenden Zeit führte Sankey verschiedene Untersuchungen durch, die er auch veröffentlichte. So beschrieb er den galvanischen Prozess mit Kupferplatten in mehreren Beiträgen, für die er auch Auszeichnungen erhielt. Mit Willans verband ihn das Inte-

resse an der wirtschaftlichen Verbesserung der Dampfmaschinen. Ab 1886 engagierte sich Sankey auch als ordentliches Mitglied in der Institution of Civil Engineers.

Auf Betreiben von Willans quittierte Sankey im Jahr 1889 den Militärdienst und arbeitete danach in leitender Funktion bei der Firma Robinson & Willans. Dort führte er u.a. thermodynamische Versuche an den Dampfmaschinen durch und übernahm nach dem Tod von Willans im Jahr 1892 die Verantwortung für die Konstruktion der Dampfmaschinen und Turbinen der Firma.

Es war Sankey, der in der Fachdiskussion zur Effizienz von Dampfmaschinen im Jahr 1896 forderte, dass ein Standard beim Vergleich mit einer perfekten Dampfmaschine erforderlich sei und sich hierfür die Rankine-Clausius-Maschine am besten eignete (Sankey 1896). Das inhaltlich wichtige Diagramm für diese Analysen war *nicht* das später so genannte Sankey-Diagramm, sondern das Entropie-Temperatur-Diagramm. Als eine von der Institution of Civil Engineers eingesetzte Kommission zwei Jahre später Sankey im Wesentlichen bestätigte, stellte er diesem Protokoll eine Einleitung voran, die er – eher beiläufig – durch ein Schaubild im Anhang ergänzte (Sankey 1898). In dieser Einleitung verglich er eine „reale“ Dampfmaschine mit einer idealisierten, deren Wärmeflüsse in dem Schaubild dargestellt waren (Abb. 4). Diese Darstellung wurde von ihm später nicht mehr verwendet. Sie war ein Abfallprodukt der Diskussion zur Effizienz von Dampfmaschinen und diente nur der Anschauung.

Später arbeitete Sankey als Berater und war im Vorstand verschiedener Firmen. In späten Jahren, von 1920 bis 1921 war er Präsident der Institution of Mechanical Engineers. Er veröffentlichte im Verlauf seines wissenschaftlichen Lebens verschiedene Bücher und technische Beiträge, darunter „Das Energieschaubild und seine praktische Anwendung auf Kolbenmotoren“ (in Engl.) oder die Übersetzung aus dem Deutschen von August Ritters Standardwerk über Brücken- und Dächerkonstruktionen. Sankey starb am 3. Oktober 1925.

Das obere Diagramm in Abb. 4 zeigt eine amerikanische Dampfmaschine (Louisville Leavitt Pumping Engine). Der Wasserdampf verlässt den Kessel mit einer Menge von 159.250 B.T.U./min (B.T.U. = British Thermal Unit, alte Energieeinheit). Berücksichtigt man die Rückflüsse so ist die Nettozufuhr in die Dampfmaschine 142.150 B.T.U. Nach allen Verlusten bleiben 27.260 B.T.U. für die mechanische Arbeit übrig. In dem

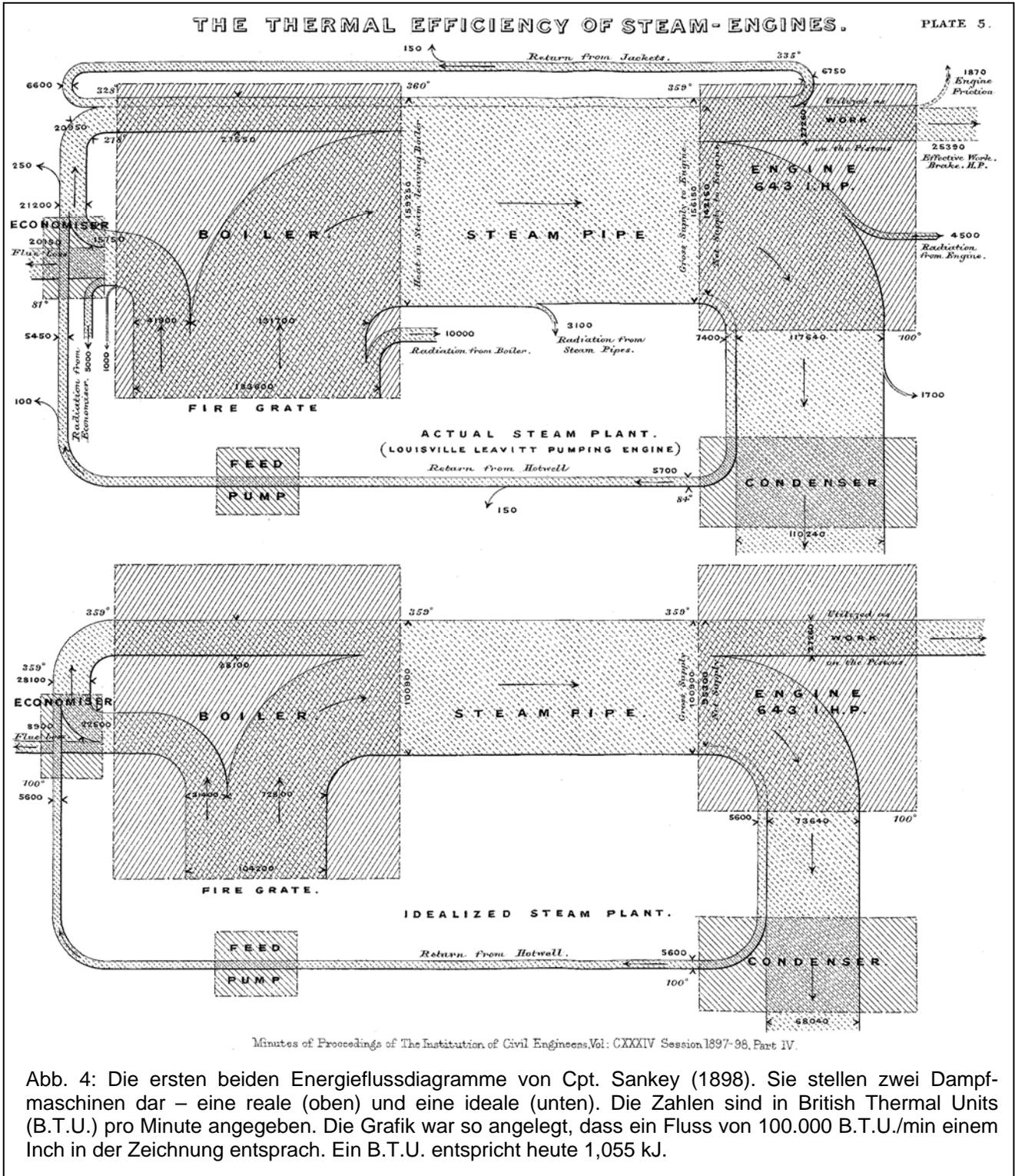


Abb. 4: Die ersten beiden Energieflussdiagramme von Cpt. Sankey (1898). Sie stellen zwei Dampfmaschinen dar – eine reale (oben) und eine ideale (unten). Die Zahlen sind in British Thermal Units (B.T.U.) pro Minute angegeben. Die Grafik war so angelegt, dass ein Fluss von 100.000 B.T.U./min einem Inch in der Zeichnung entspricht. Ein B.T.U. entspricht heute 1,055 kJ.

Bericht wird die thermische Effizienz der Maschine mit $27.260 / 142.150 = 0,19$ angegeben.

Das untere Diagramm stellt eine ideale Dampfmaschine mit einem unterstellten Rankine-Zyklus bei gleichen Temperaturniveaus dar. Die Verluste fallen weg. Die thermische Effizienz wird hier mit 0,285 beziffert.

Sankey erläutert anschaulich, wie das Diagramm zu interpretieren ist (Sankey 1898, S. 279):

„No portion of a steam plant is perfect, and each is the seat of losses more or less serious. If therefore it is desired to improve the steam plant as a whole, it is first of all necessary to ascertain separately the nature of the losses due to its various portions; and in this connection the diagrams in Plate 5 have been prepared, which it is hoped may assist to a clearer understanding of the nature and extent of the various losses.

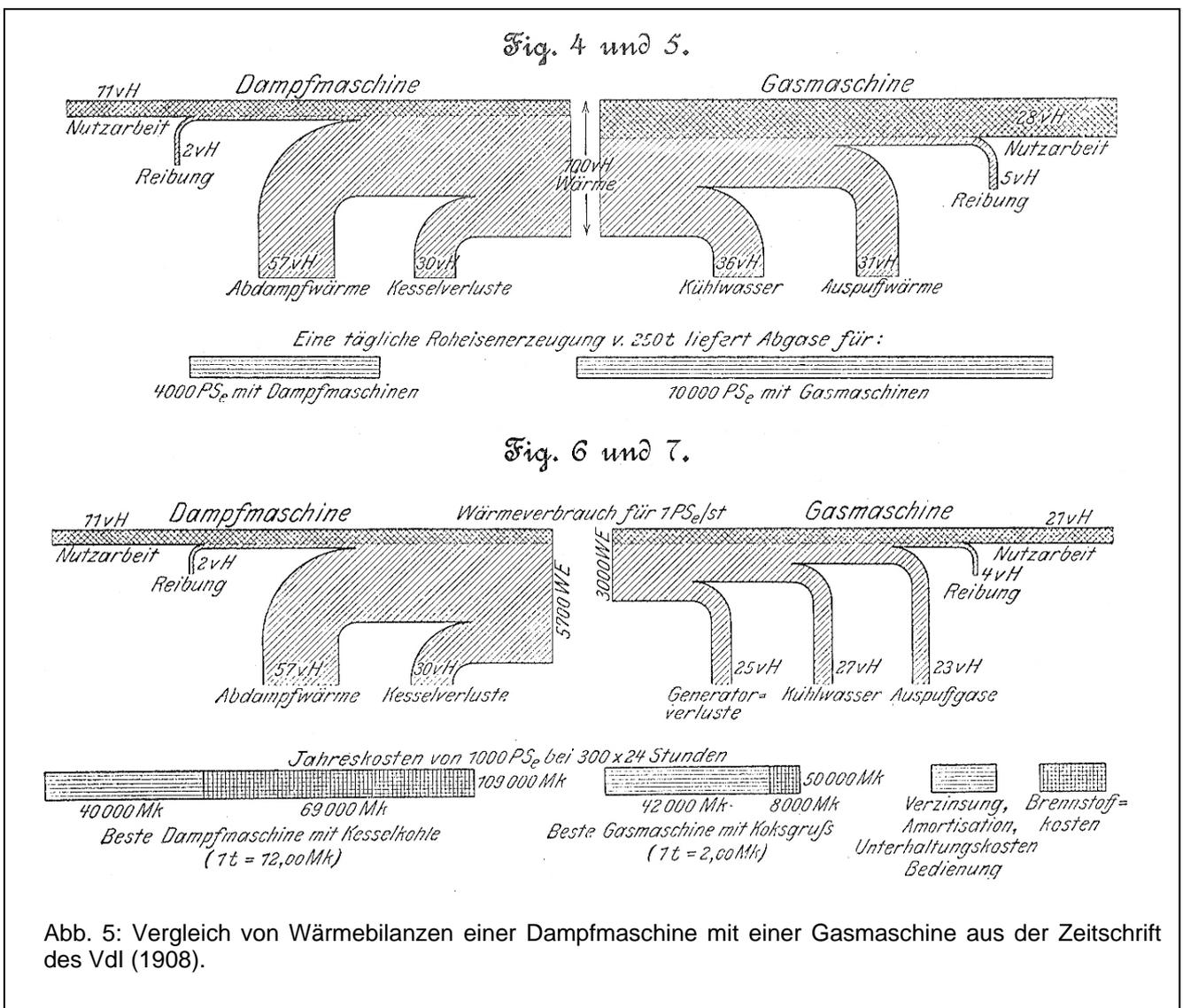
The boiler; the engine; the condenser and air-pump; the feedpump and the economiser, are indicated by rectangles upon the diagram. The flow of heat is shown as a stream, the width of which gives the amount of heat entering and leaving each part of the plant per unit of time; the losses are shown by the many waste branches of the stream. Special attention is called to the one (unfortunately small) branch which represents the work done upon the pistons of the engine.”

Der Wärmefluss wird also als Strom dargestellt, dessen Breite jene Wärmemenge angibt, die pro Zeiteinheit der Fabrik zugeführt wird bzw. sie wieder verlässt. Die Wärmeverluste werden durch die Abzweigungen angezeigt. Damit wird die Nutzenergie, in diesem Fall die mechanisch geleistete Arbeit, im Vergleich zum ursprünglichen Aufwand sehr anschaulich gemacht. Die Zahlen sind in absoluten Mengen angegeben. Außerdem zeigt die Darstellung die beteiligten Prozesse, also den Kessel oder die Maschine.

Das Schaubild ist direkt einsichtig. Es kann flexibel an den Bedarf oder die technischen Rahmenbedingungen angepasst werden. Damit bestehen viele Möglichkeiten, solche Schaubilder anzufertigen. Wesentliches Merkmal ist die Darstellung von Stromgrößen durch bewertete Pfeile, also durch entsprechend breite Pfeile.

2.2 Die Anwendung von Sankey-Diagrammen in Deutschland

Schon ein Jahrzehnt später wurden die Diagramme des Captain Sankey international eingesetzt. Im Jahr 1908 wurden in der Rundschau der „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure“ gleich mehrere „Wärmebilanzen“ abgedruckt: von einem Hochofen, einem Koksofen, und der Vergleich einer Dampfmaschine mit einer Gasmaschine (Vdl 1908, S. 2017). Dabei wurde auf die große Überlegenheit der Gasmaschine bei der Wärmeausnutzung hingewiesen und dass die Abbildung „keiner weiteren Erläuterung bedarf“.



Einer der ersten deutschsprachigen Ingenieure, der Sankey-Diagramme im größeren Stil einsetzte, war Alois Riedler (1850-1936), der seit 1888 Professor für Maschinenbau an der TU Berlin war, später sogar Rektor der Technischen Hochschule (TH)

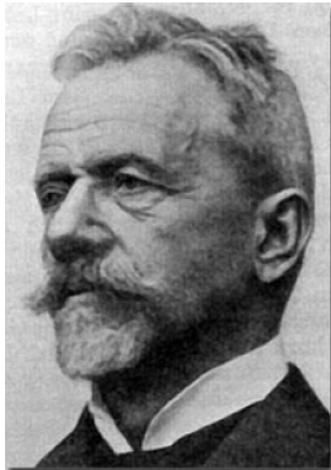


Abb. 6: Alois Riedler (geb. in Graz, 1850-1936).

Berlin wurde – unter seiner Ägide wurde der TH 1899 von Kaiser Wilhelm II. das Promotionsrecht verliehen. Riedler bereiste viel das Ausland, war auf den Weltausstellungen in Philadelphia (1876), Paris (1878) oder Chicago (1893), und besuchte zahlreiche technische Lehranstalten z.B. in den USA. Dadurch kannte er die Entwicklung im Ausland und erfuhr auf diesem Weg wahrscheinlich auch von Sankeys Arbeiten.

Riedler war sehr praxisbezogen und forderte die Einrichtung von Maschinenbaulaboratorien an den Technischen Hochschulen. Er beschäftigte sich u. a. mit der Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen und baute ab 1903 an der TH Berlin ein Laboratorium für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftwagen auf. Dort entwickelte er den ersten Rollenprüfstand für Kraftwagen und begann als Erster mit deren wissenschaftlichen Vermessung. Er wandte sich damals besonders gegen die Bewertung von Kraftwagen anhand der üblichen Wettrennen, die sich an Höchstleistungen wie z.B. der Geschwindigkeit orientierten, was dann entsprechend in der Reklame der Automobilfirmen vermarktet wurde. Dies, so Riedler, sei jedoch unzweckmäßig für die wirtschaftliche Beurteilung von Kraftwagen im praktischen Fahrbetrieb. Hierzu suchte er objek-

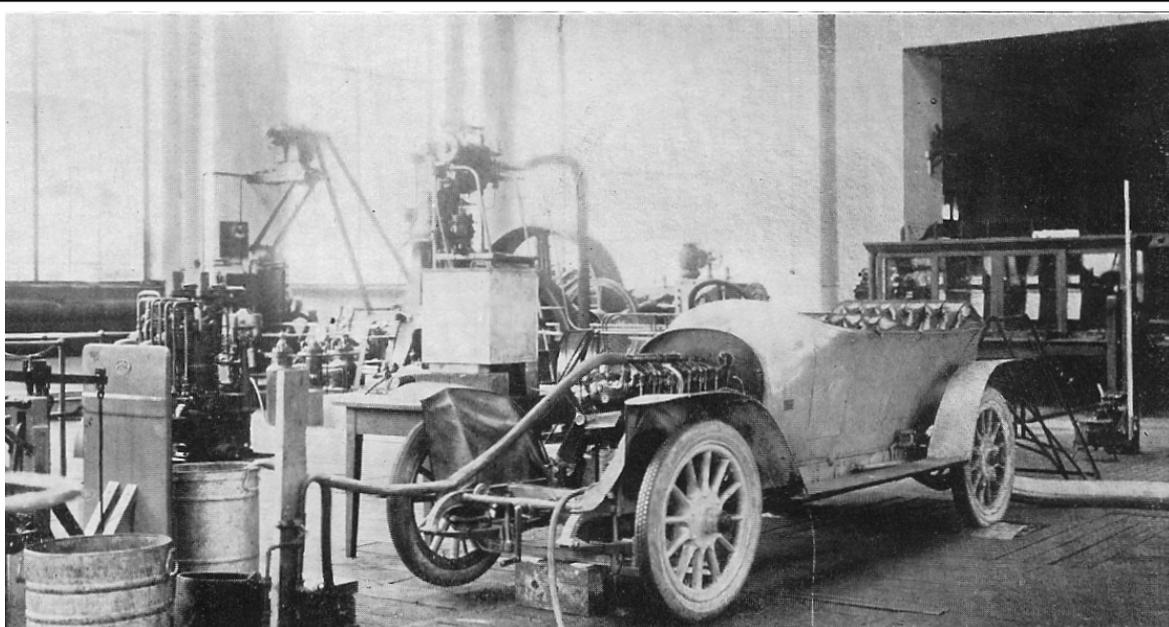


Abb. 7: Ein 100-PS-Benz-Rennwagen auf dem Berliner Pkw-Rollenprüfstand von Riedler (1911).

tive und nachvollziehbare Kriterien zum Fahrzeugvergleich und führte die Messung von typischen Fahrsituationen auf Rollenprüfständen ein. Er wollte die „wirkliche Leistung“ und die Verluste von Wagen und Motor messen. Er kann deshalb als einer der Begründer von Automobiltests, die heute für jeden Autokäufer unverzichtbar sind, angesehen werden.

Im Jahr 1911 veröffentlichte er das Werk „Wissenschaftliche Automobil-Wertung“, in dem er erste Messergebnisse, u.a. eines 30 PS-Renault-, eines 100 PS-Benz- und eines 75 PS-Adler-Wagens vorstellte. Als Begründung für die Untersuchungen führte er die Treibstoffknappheit und die Herkunft aus dem Ausland an: *„Eine Lebensfrage aller Kraftfahrzeuge: ihre Abhängigkeit von bestimmten Brennstoffen, von ausländischen insbesondere“* (Zitat Riedler 1911, Bericht I, S. 18). Die Ergebnisse waren zur damaligen Zeit erstaunlich: Er konnte aufzeigen, dass die Triebwerksverluste geringer als allgemein angenommen waren; stattdessen hatten die Bereifung und die thermischen Verluste des Motors einen entscheidenden Einfluss auf den Wirkungsgrad.

„Da die Rollverluste bei Kraftwagen einen sehr großen Teil der verfügbaren Motoren-Nutzleistung aufzehren, ist eine vollständige Klärung ... von großer Wichtigkeit. ... Ein geringer Bruchteil der Kosten der in der höchsten Blüte stehenden Pneumatik- und Automobilreklame oder ein geringer Teil der Summen, welche Automobilklubs und auch Städte für Rennveranstaltungen verausgaben, würde zur gründlichen Untersuchung dieser wichtigen Frage ausreichen.“ (Zitat Riedler 1911, Bericht V, S. 13)

Die Energieflussdiagramme waren für Riedler dabei ein wichtiges Mittel, die Ergebnisse anschaulich zu verdeutlichen (siehe Abb. 8). Die Wagen-Nutzleistung zur Überwindung des Luftwiderstandes und für Beschleunigung bzw. Steigungen bezifferte er in diesem konkreten Fall schließlich auf nur noch 12,5 % der eingesetzten Kraftstoffenergie.

Er schrieb weiter: *„Energiediagramme stellen die Einnahme, Ausgabe und Verluste, sowie den dann noch verfügbaren Energiebetrag graphisch dar und geben so ein charakteristisches Bild der Brennstoff-Ausnutzung der untersuchten Wagen. Die aus den Energiediagrammen gewonnene Erkenntnis der Energieverteilung im Kraftwagen ist eines der Mittel zur Beurteilung seiner wirtschaftlichen Vervollkommnung.“*

einstimmung der Ansichten über den Begriff ‚Wirkungsgrad‘ herrschte“ und dies zu Missverständnissen und Fehldeutungen bei der Frage der Wirtschaftlichkeit führte (Riedler 1911, Bericht V, S. 25).

Eine große Bedeutung hatte Riedlers Werk „Das Maschinen-Zeichnen“ von 1896 für die Maschinenkonstruktion. Dort forderte er exakte, bemaßte, dem jeweiligen Zweck angepasste Schwarz-Weiß-Zeichnungen und wurde damit zum Begründer des modernen technischen Zeichnens. Bereits in der Ausgabe von 1913 stellte er neben den Entropiediagrammen auch das „*Energiediagramm*“ vor, welches den Energiefluss einer Dampfmaschine zeigt (Siehe Abb. 9).

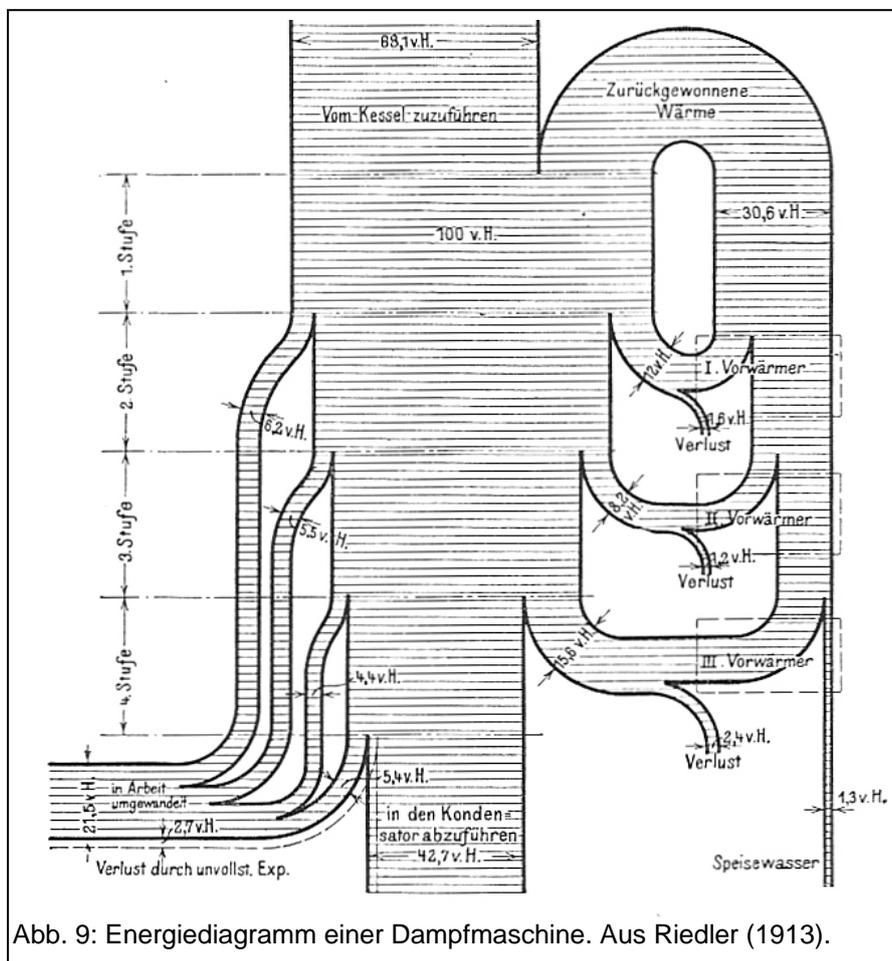


Abb. 9: Energiediagramm einer Dampfmaschine. Aus Riedler (1913).

Auch Güldner (1913, S. 13) stellte in seinem Lehrbuch „Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgas-Anlagen“ die „*besondere Art eines Wärmeplans*“, das sog. Sankey-Diagramm vor. Er bemängelte allerdings, dass diese Darstellung zwar übersichtlich, aber im Aufzeichnen nicht so bequem und si-

cher sei und sich deshalb eher für die allgemeine Veranschaulichung als für den technischen Gebrauch eignet.

Trotz dieser Kritik spielten die Sankey-Diagramme in den folgenden Jahrzehnten eine bedeutende Rolle in den technischen Analysen von Anlagen in Deutschland. Der Hintergrund war, dass Deutschland aufgrund der Reparationszahlungen nach dem Ersten Weltkrieg mit seinen Ressourcen sparsam umgehen musste. Das Ziel war es, die Ausbeute von energieintensiven Prozessen zu verbessern. In verschiedenen Branchen wie z.B. in der Zementherstellung, der Glasherstellung oder der Stahlherstellung wurden Anlagen in Versuchsreihen detailliert vermessen und Wärmebilanzen aufgestellt, um Ineffizienzen und Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Die Arbeiten erfolgten meistens in firmenübergreifenden Kommissionen der einzelnen Branchen. Auf den volkswirtschaftlichen Aspekt der Einsparungen wurde oft genug hingewiesen.

So wurde beispielsweise 1920 die Wärmetechnische Beratungsstelle der Deutschen Glasindustrie (WBG) eingerichtet (Trier 1992). Die Mitgliedsbeiträge wurden nach dem Brennstoffverbrauch der Firmen bemessen. Es wurden wärmetechnische Messungen bei den realen Anlagen der Mitglieder durchgeführt, um z.B. die Gasgeneratoren oder die Schmelzöfen zu verbessern. So wurde auch die erste bekannt gewordene Wärmebilanz einer ganzen Glasschmelzanlage erstellt. Die Ergebnisse wurden in den WBG-Schriften zusammengestellt und trugen erheblich zum Fortschritt der Wärmetechnik in der Glasindustrie bei.

Innerhalb der Zementindustrie hatten die Portland-Zementwerke Heidelberg-Mannheim seit 1904 Versuche unternommen, die Abgase zur Dampferzeugung zu nutzen. In den 20er Jahren erarbeitete eine so genannte Ofenkommission des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabriken e.V. mit umfangreichen Messungen systematische Wärmebilanzen von verschiedenen Zementöfen. Die Ergebnisse aus 3 Jahrzehnten sind in Schott (1954) eindrucksvoll zusammengestellt. Die ersten Sankey-Diagramme zum Zementbrennen wurden 1927 vorgestellt (Abb. 10) und waren dann ein unverzichtbares Darstellungsinstrument. Die Analyseergebnisse wurden genutzt, um verschiedene Ofentypen zu vergleichen, verfahrenstechnische Verbesserungen anzuregen und letztendlich die theoretische optimale Wärmebilanz mit der

realen technischen Wärmebilanz zu vergleichen. Je nach der Ofenart, dem Herstellungsverfahren und der Brenneinrichtung schwankte der Wärmeverbrauch der Zementherstellung in den 30er Jahren zwischen dem Doppelten und Fünffachen des theoretischen Wärmeaufwands (Schott 1933).

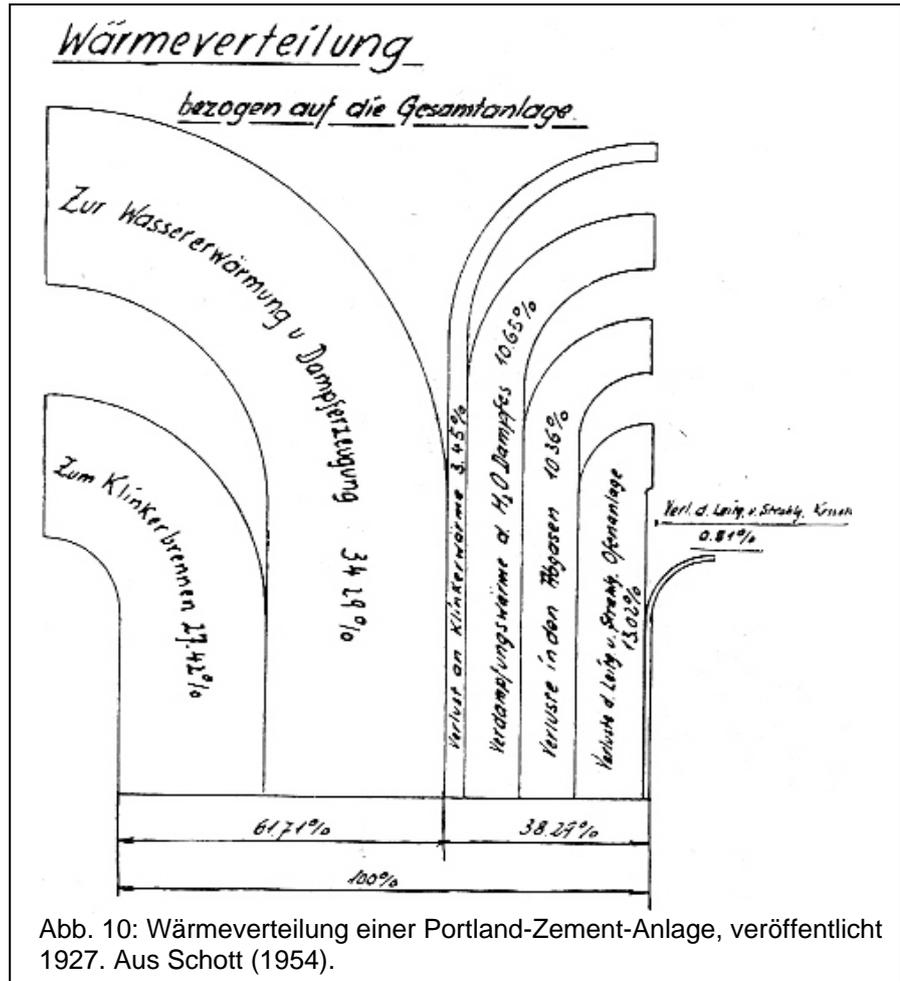


Abb. 10: Wärmeverteilung einer Portland-Zement-Anlage, veröffentlicht 1927. Aus Schott (1954).

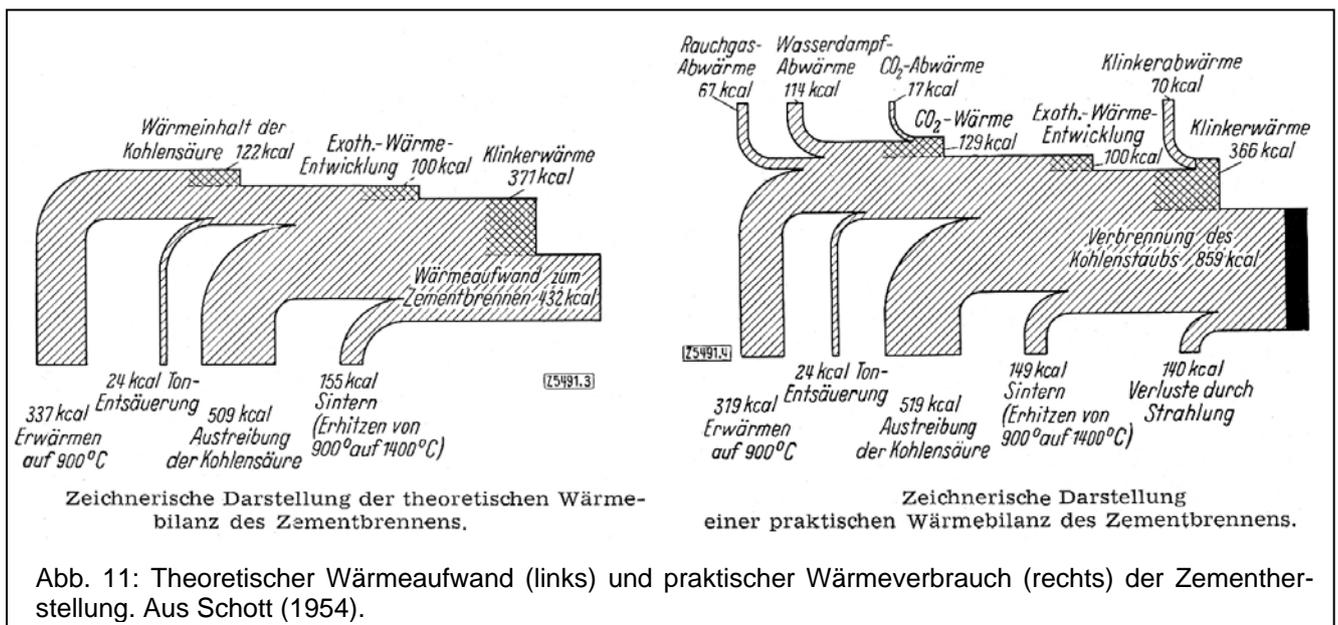


Abb. 11: Theoretischer Wärmeaufwand (links) und praktischer Wärmeverbrauch (rechts) der Zementherstellung. Aus Schott (1954).

2.3 Stoffstromwirtschaft in der Stahlindustrie

Nach dem Ersten Weltkrieg war in der deutschen Stahlwirtschaft die Versorgung mit Rohstoffen sehr kritisch. Es fehlte an Brennstoffen. Die Hauptaufgaben in den 20er und 30er Jahren gruppieren sich deshalb um die Begriffe „Sparsames Wirtschaften“ und „Verbesserung der Beschaffenheit der Erzeugnisse“ (Spingorum 1936, S. 1043f.) – in modernen Begriffen also um Effizienzsteigerung und Qualitätsmanagement. Die Ausgaben für Energie machten in einem Hüttenwerk etwa ein Viertel der gesamten Herstellkosten der Erzeugnisse aus. Deshalb wurde Anfang der 20er Jahre die Wärmestelle Düsseldorf des Vereins deutscher Eisenhüttenwerke als Gemeinschaftsunternehmen aller deutschen Eisenhüttenwerke gegründet. Es wurde das Messwesen ausgebaut, um zuverlässige Daten über die Erzeugung und den Verbrauch der Energieträger zu erhalten. Die Berichte gaben den Werksleitungen Richtwerte und Anhaltspunkte für Verbesserungen, für eine gleichmäßigere Energienutzung und für die laufende Kostenüberwachung. Durch eine planmäßige Wärmewirtschaft konnte der Wärmeverbrauch je Tonne Stahl innerhalb von 10 Jahren um mehr als ein Viertel gesenkt werden.

Weiterhin wurden ab 1923 auch Daten über die gesamte – wie man damals sagte – *Stoffwirtschaft*, also über den Einsatz von Roh- und Hilfsstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse, gesammelt. Dies geschah damals im Sinne der Kostenüberwachung und wurde wesentlich von einer neuen Gattung an Fachleuten, den Betriebswirten, forciert.

Es gab aber noch einen weiteren Grund: Eisenerz war in Deutschland ein knappes Gut geworden, nachdem die reichhaltigen Erzminen in Lothringen nach dem Ersten Weltkrieg wieder an Frankreich abgetreten werden mussten. Viele Vorkommen in Deutschland hatten mindere Qualität, was die Verarbeitung im Hochofen erschwerte. Durch die intelligente Kombination der verschiedenen Verfahren zur Gewinnung von Roheisen wurde die Ausbeute deutlich erhöht. Eine Schlüsselrolle spielte dabei die Verwendung von Schrott und Alteisen und die Schließung von Stoffkreisläufen (Reichardt 1937, S. 1104 f.), was Abb. 12 mit Durchschnittswerten für die ganze deutsche Volkswirtschaft verdeutlicht.

Während für die Energie- und Wärmewirtschaft die Verwendung von Sankey-Diagrammen ab 1931 Standard war (Wärmestelle Düsseldorf 1931, S. 9), erfuhr ihr Einsatz für die massebezogene Stoffwirtschaft ab Mitte der 30er Jahre einen großen Auftrieb. In einem Vortrag beim Tag der Technik in Breslau 1935 äußerte sich Prof. Paul Goerens zu Fragen der Rohstoffbewirtschaftung (Goerens, 1935) – der Vortrag war ganz im Zeichen der Zeit auf staatliche Zwangsbewirtschaftung und nationale Autarkie ausgerichtet. Dabei verwies er auf das *Stoffstrombild* als wertvolles Hilfsmittel, das mengenmäßige Angaben über Herkunft, Erzeugung, Verarbeitung und Bestimmung eines Stoffes enthält. Er stellte nationale Bilanzen für Eisen, für Kupfer oder für Schmieröl vor.

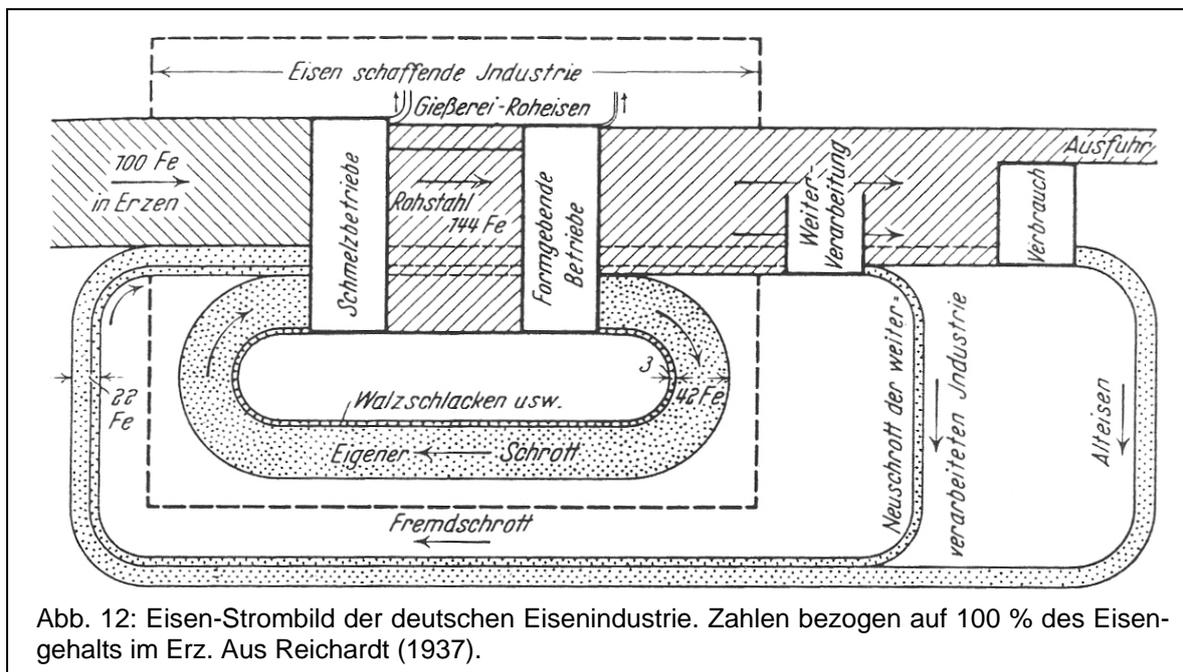
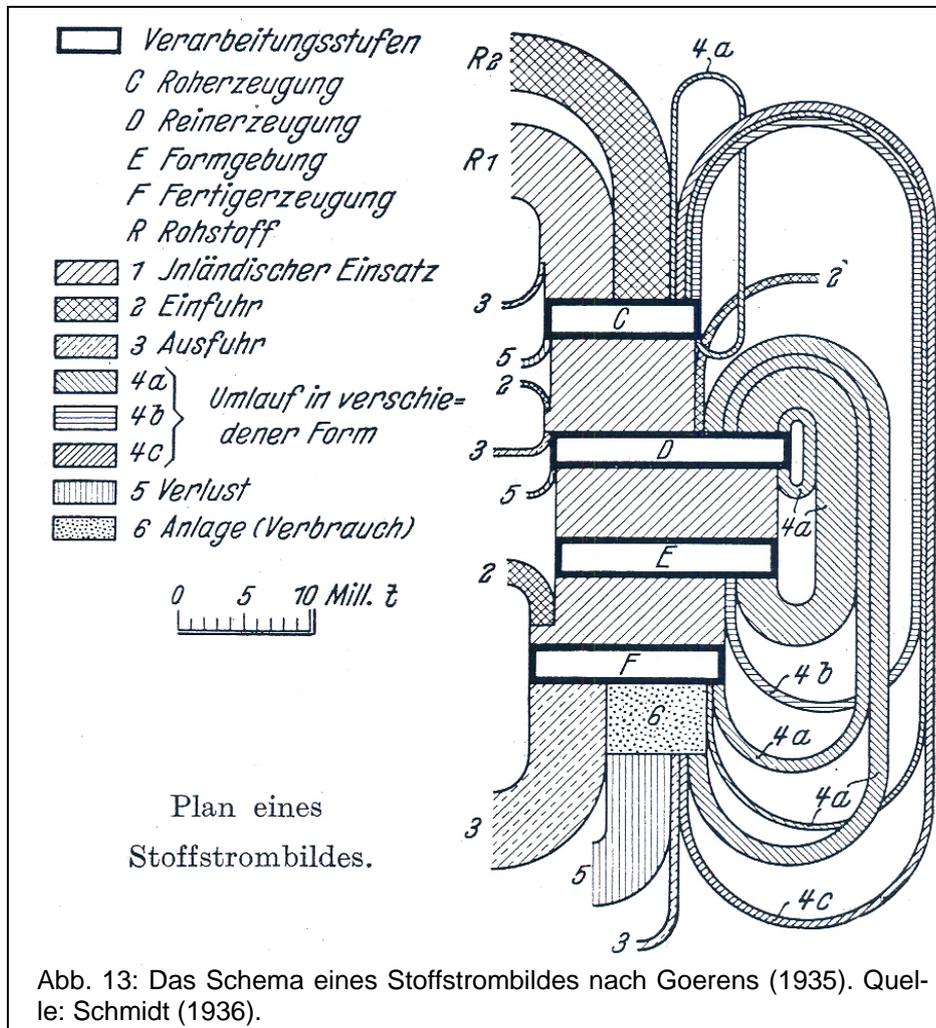


Abb. 13 zeigt die allgemeine Anordnung eines *Stoffstrombildes* von Goerens (Schmidt 1936, S. 14). Aufschlussreich sind die Ausführungen dazu. Zitat:

„Ein Stoff R kommt aus dem Inland 1 oder dem Ausland 2 und durchläuft bis zum Verbrauch eine Reihe von Stufen C, D, E, F der Auslese, Umwandlung, Verarbeitung und Formgebung. In jeder Stufe, schon mit dem heimischen Rohstoff beginnend, kann eine Ausfuhr 3 stattfinden. Daneben scheidet in jeder Stufe ein Teil des Stoffes aus dem Arbeitsstrom aus. Lässt er sich wertmäßig in irgendeiner Form retten und in eine der vorausgegangenen Stufen wieder einfügen, so erscheint er als Stoffumlauf in verschiedenen Formen 4a, 4b, 4c. Kommt eine Wiedergewinnung weder technisch noch wirtschaftlich in Betracht, dann erscheint der Verlustteilstrom 5. Ein Verlust des Stoffes tritt auch dann ein, wenn er während

des Verarbeitungsganges vollständig aufgebraucht wird. Ebenso stellt die Ausfuhr für die Stoffwirtschaft eines Landes einen stofflichen Verlust dar. ... Die maßstäbliche Auftragung der einzelnen Ströme ergibt einen genauen Ueberblick über die Bewirtschaftung eines Stoffes.



Der durch den Umlauf bewirkte Rückfluß eines Teiles des Stoffes in den Arbeitsgang gibt den Ausschlag für den zusätzlichen Bedarf an neuem Rohstoff. Deshalb kann der Umfang einer Zwischenerzeugung kein genügender Maßstab für die Bemessung des Rohstoffwertes sein. Je nach Art des Verbrauchs kann man eine Einteilung in verschiedene Stoffgruppen vornehmen, wobei das Strombild eine besonders kennzeichnende Gestalt hat.

Die erste Gruppe umfaßt alle Stoffe, die völlig verzehrt werden. Als Beispiele seien Brennstoffe, Treibstoffe und Nahrungsmittel genannt. Das Strombild derartiger Stoffe ist dadurch gekennzeichnet, daß in ihm der Stoffumlauf fehlt. Die einzelnen Stufen sind Auslese, Reinigung, Verfeinerung und ähnliche Maßnahmen.

In der zweiten Gruppe gehören diejenigen Stoffe, die ihren Stoffwert nicht verlieren, aber in ihrer Gebrauchsform entwertet werden, wie Metall, Kautschuk, Schmieröl, Papier. Stoffverlust tritt außer durch Ausfuhr nur durch Verschleiß ein. Da in jeder Verarbeitungsstufe Abfälle entstehen, die wieder verarbeitet werden können, so ist der Schrottentfall für die Stoffwirtschaft ohne größere Bedeutung, solange die Umwandlung keinen nennenswerten Stoffverlust verursacht; die Wirtschaftlichkeit wird dagegen beeinflusst. Für den Ersatz an frischem Stoff gibt die Höhe des Rücklaufes allein den Ausschlag.

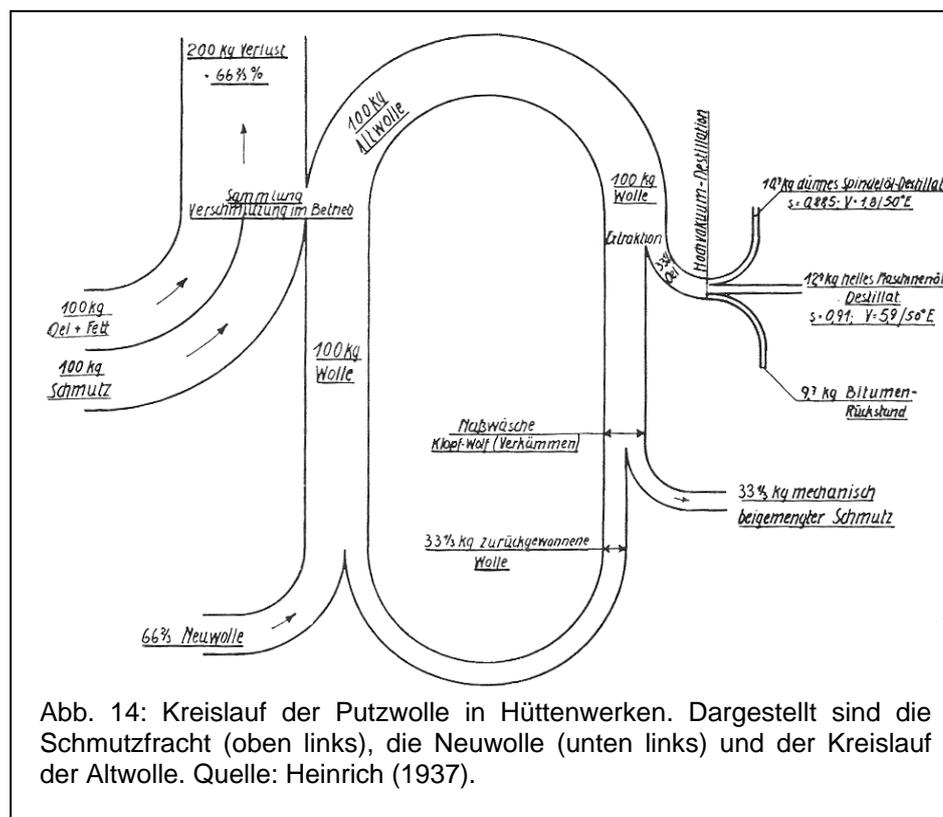
Die dritte Gruppe bilden die Stoffe, die als Hilfsmittel dienen, z. B. als Lösungs- oder Bindemittel bei der chemischen Umwandlung anderer Stoffe. Ihre Bewirtschaftung hat die Bildung eines möglichst verlustlosen Kreislaufes zum Ziel.

Hat man durch Stoffbilanz und Stoffstrombild die Notwendigkeit einer Bewirtschaftung festgestellt, so wird man dann Wege suchen müssen, wie die Einfuhr ausländischer Stoffe ohne Schädigung der heimischen Wirtschaft eingeschränkt werden kann. Hierhin gehören Sparmaßnahmen, die Heranziehung der Wissenschaft und der Fortschritt der Technik. Ferner sind alle Mittel zur Verminderung von Verlusten und zur Verwertung von Abfällen aufzubieten.“ (Zitatende)

In dem Beitrag sind damit die wichtigen Aspekte des modernen Stoffstrommanagements und der Kreislaufwirtschaft genannt – allerdings zum Zwecke einer sich rüstenden Kriegswirtschaft. Die spezielle Diagrammart wurde von den Ingenieuren der Stahlindustrie dann vielfach aufgegriffen, um die Rohstofflage zu analysieren (Bansen 1936; Bansen 1937). Fast schon kurios mutet die Ernsthaftigkeit an, mit der die Stoffwirtschaft in der damaligen Zeit betrieben wurde, etwa am Beispiel der Verwertung von Putzwolle in Hüttenwerken (Heinrich 1937) (siehe Abb.14).

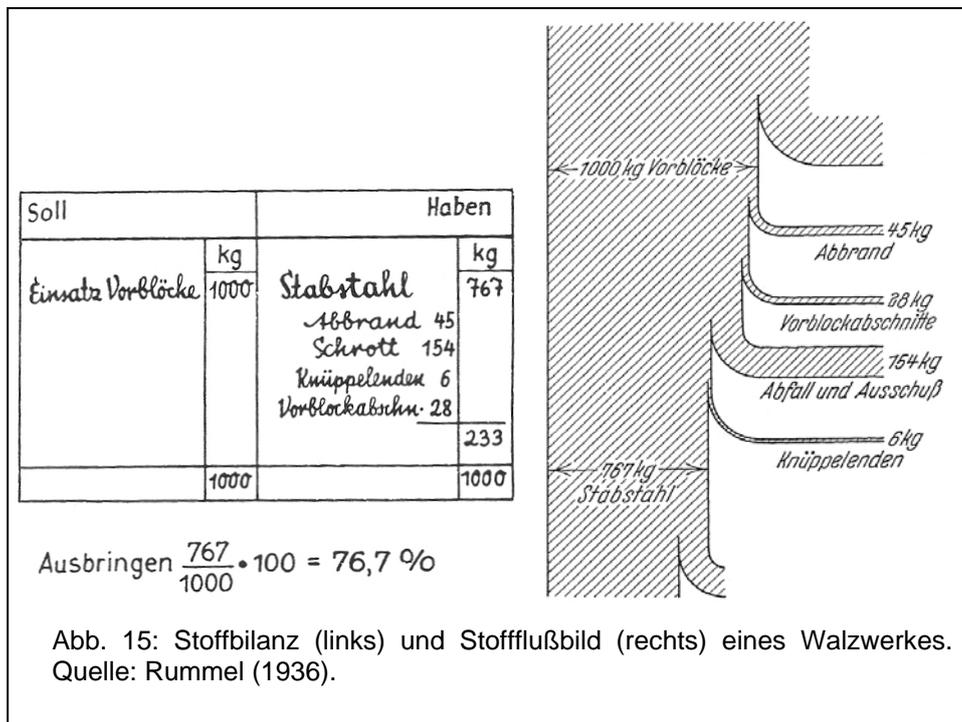
Bemerkenswert ist, dass die so genannte „Stoffwirtschaft“ in der Stahlindustrie hauptsächlich von den Betriebswirten propagiert und betrieben wurde. Insgesamt mussten die neuen Betriebswirte ihr Dasein gegenüber dem klassischen Kaufmann und dem Ingenieur rechtfertigen. Die Betriebswirtschaftslehre wurde in Deutschland erst ab 1898 mit der ersten Handelshochschule in Leipzig als akademisches Fach eingeführt, zuerst noch unter den Namen Privatwirtschaftslehre oder Handelswissenschaft (Schneider 1999, S. 16). In einem Artikel wies Kurt Rummel, der Vorsitzenden des Ausschusses für Betriebswirtschaft des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, auf

die Vorzüge und die Arbeitsweise der Betriebswirtschaft hin, „die in einer Planung besteht, einer Planung nicht auf Grund irgendwelcher durch die Fingerspitzen vermittelten Tastempfindung, sondern auf Grund sehr sorgfältiger statistischer und versuchsmäßiger Feststellungen über den Lauf des Stoffes durch die Betriebe am Leitfaden der Zeit. Alle wichtigen Einflüsse werden festgestellt und mit besonderen Hilfsmitteln die Auswirkung dieser Einflüsse herausgeschält und in ein System gebracht. Bilanzmäßiges Denken lässt die Verlustquellen deutlicher erscheinen, Rechnen mit sorgfältig bewerteten Mengen hilft den geeigneten Stoff, das zweckmäßigste Verfahren, die richtige Anlage zu wählen“ (Zitat Rummel 1936, S. 228).



Rummel stellte fest, dass die Nachfrage nach Stoffwirtschaftern und nach einer ausgeprägten Stoffwirtschaft sehr groß sei. In der Stahlindustrie sei das verständlich, da sie stoffbedingt ist, d. h. Roh- und Hilfsstoffe – außer dem Brennstoff – umfassen hier 35 bis 45 % der Selbstkosten (Rummel 1936, S. 222). Die geforderten Untersuchungen verfolgen deshalb den Lauf des Stoffes an Hand der Zeit, nach seiner Menge und seiner Güte. Besonders die scharfe Trennung der Kosten in ihre beiden Bestandteile: Verbrauch in Mengeneinheiten und die Bewertung der Menge in Geldeinheiten sei wichtig (Rummel 1936, S. 224): „Die rein mengenmäßige Betrachtung ist heute besonders wichtig bei der Knappheit der Rohstoffe und der gebotenen Scho-

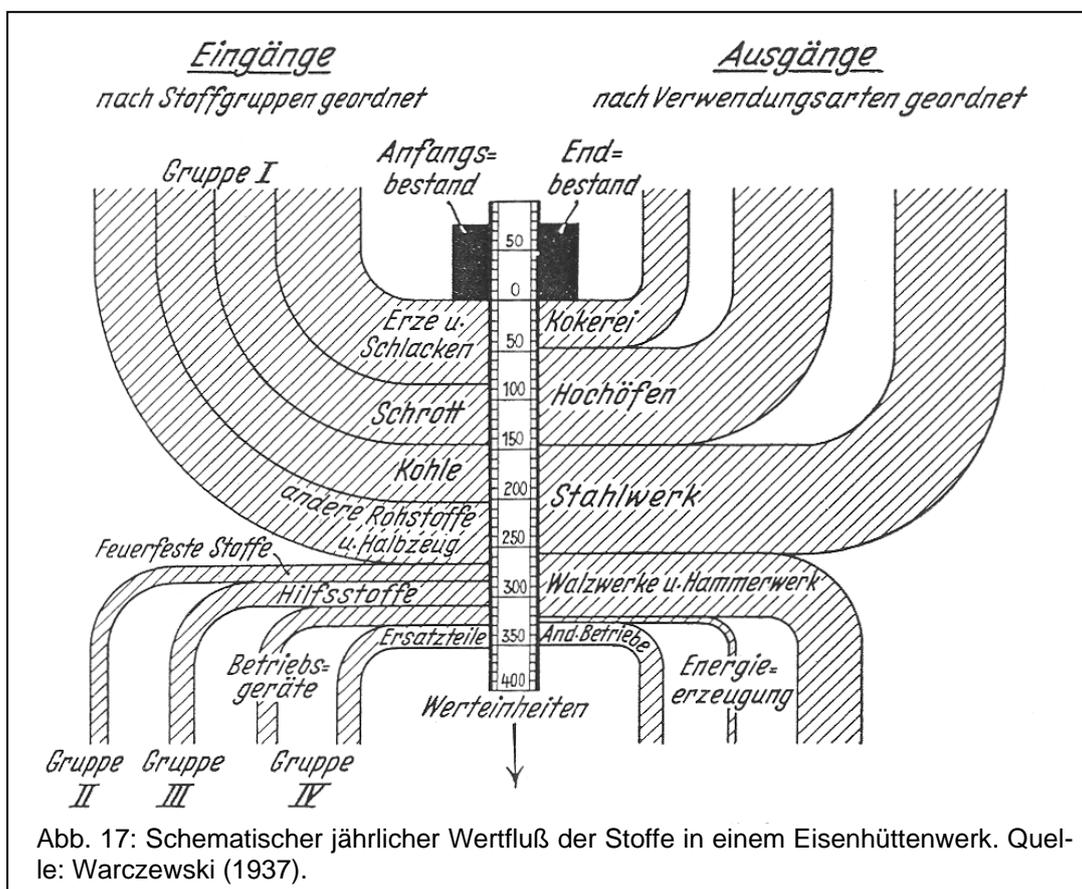
nung der Bestände an den wenigen Rohstoffen, die unser Land uns selbst zu liefern vermag.“



Rummel spricht in diesem Zusammenhang vom „Stoffhaushalt“ – ein Begriff, der 60 Jahre später ausführlich in den Umweltwissenschaften aufgegriffen wird (Baccini u. Bader 1996) – und geht ausführlich auf die Stoffbilanz ein. Zitat: „Das bilanzmäßige Denken muß immer mehr den rohen Begriff „des Ausbringens in Prozent“ ersetzen. Dem Ausbringen steht in der Wärmewirtschaft der sogenannte Wirkungsgrad gegenüber... Oft genug liegt aber gar nicht fest, was eigentlich im Nenner und was im Zähler steht, weder bei dem Wirkungsgrad noch bei dem Ausbringen.“ Als Beispiel führt er den Umlaufschrott an, der in vielen Nettobetrachtungen einfach weggelassen wird und dann zu Fehlinterpretationen der Gesamtleistung einer Anlage führt – übrigens ein Fehler, der auch heute noch (oder wieder) in Betrieben mit innerbetrieblichem Recycling auftritt.



Natürlich führte Rummel seine Überlegungen weiter in Richtung der wertmäßigen Analyse: „Man muß sich nun freilich darüber klar sein, daß die mengenmäßige Ersparnis, die durch alle diese Maßnahmen erzielt werden kann, nur gering ist. Wertmäßig ist freilich, wie in jeder Bilanz, das einzelne ersparte Prozent von ausschlaggebender Bedeutung für die Erfolgsrechnung; das tritt erst in der Gewinn- und Verlustrechnung hervor.“ (Zitat Rummel 1936, S. 226) Dabei geht er dann auf relevante Fragestellungen ein, z.B. wie Lagerbestände bewertet werden können – also nach Einkaufspreis, Buchbestandspreis, Wiederbeschaffungspreis usw. – und wie der Kapitaldienst von Anlagen berücksichtigt werden soll, wobei er die Position vertritt, dass vorhandene Anlagen, gleichgültig ob sie abgeschrieben sind oder nicht, in Vergleichsrechnungen nicht einzusetzen seien.



Das erste Sankey-Diagramm mit Wertflüssen wurde in diesem Zusammenhang von Warczewski (1937) vorgeschlagen (Abb. 16). Bemerkenswert an der Darstellung ist, dass sie auf Input- und Outputseite nach unterschiedlichen Kriterien gliedert – nach Stoffgruppe bzw. nach Verwendungsart – und auch versucht, die Anfangs- und Endbestände einzubeziehen, die in dem Beispiel immerhin 21 % des Jahresumsatzes betragen. Denn die Bestandsfrage bekommt eine Relevanz, wenn nicht mehr nur

Wärme oder Energie als Flussobjekt, sondern gegenständliche Objekte betrachtet werden, die auch gelagert werden können und der Massenbilanzerhaltung unterliegen. Diese Analysen wurden dazu verwendet, die Bestandsmengen bei erhöhter Umschlagsgeschwindigkeit zu verringern, d. h. das Beschaffungswesen zu optimieren.

Als Zwischenfazit kann man zusammenfassen, dass die schwierigen Rahmenbedingungen der Stahlproduktion mit hohen Preisen und einer Verknappung an Rohstoffen in den 30er Jahren zu einer konsequenten „Stoffwirtschaft“ führten, die den Einsatz von Stoffbilanzen oder Sankey-Diagrammen geradezu erzwang. Der Umstand, dass dies unmittelbar mit den Kriegsvorbereitungen Deutschlands zusammenhing, sollte den Blick nicht dafür verstellen, dass das konkrete Anliegen das Erreichen von Rohstoffeffizienz war. An diesem Anliegen kann heute wieder angeknüpft werden, wenngleich aus einem anderen Grund, nämlich weil die Rohstoffe weltweit knapp und teuer sind und ihre Nutzung die Umwelt belastet.

3 Methodik

3.1 Implizite Annahmen der Sankey-Darstellung

Sankey hatte das später nach ihm benannte Diagramm eher beiläufig eingeführt und nur zur Verdeutlichung der Energieeffizienz von Dampfmaschinen verwendet. Viele Ingenieure haben sich von dieser Darstellung inspirieren lassen und ähnliche Diagramme eingesetzt, oft für populäre Veröffentlichungen. Regeln für die Erstellung gab es deshalb keine, außer der Anschauung und Intuition. Trotzdem gibt es ein paar Aspekte, die bei Sankeys Diagramm implizit angenommen wurden:

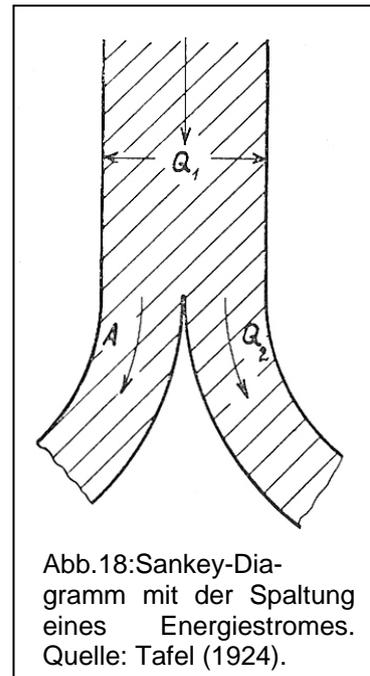
- Es handelt sich um Mengengrößen, die auf eine Zeitperiode bezogen sind.
- Die Mengengrößen sind extensive Größen (s.u.).
- Die Mengenskala mittels der Pfeilbreite ist proportional, d.h. die doppelte Menge wird durch einen doppelt so breiten Pfeil dargestellt.
- Es werden keine Bestandsgrößen berücksichtigt, d.h. es gibt keine Lagerbildung.
- Es wird stillschweigend von einer Energie- oder Massenerhaltung ausgegangen.

Diese Annahmen sind wichtig, da ihre Missachtung zu Fehlinterpretationen führen kann. Von *extensiven* Größen wird typischerweise in der Thermodynamik gesprochen: Sie sind proportional zur Stoffmenge – im Gegensatz zu intensiven Größen wie etwa der Temperatur. Infolgedessen können diese Größen addiert werden. Die Annahme der fehlenden Lagerbildung ist bei Energiegrößen (Dampf, elektrischer Strom etc.) nachvollziehbar, da hier i.d.R. nur mit Stromgrößen und nicht mit Beständen gearbeitet wird. Bei der Ausdehnung von Sankey-Diagrammen auf andere Anwendungen, z.B. auf massebehaftete Flüsse, müssen diese Annahmen überdacht werden. Eine wesentliche Idee, die den Sankey-Diagrammen zugrunde liegt, ist sicher die implizite Erfüllung von Bilanzgleichungen. Zusammen mit der proportionalen Mengenskala können Unstimmigkeiten in der Bilanz, etwa durch Verluste und Ineffizienzen, intuitiv durch die graphische Darstellung aufgedeckt werden.

3.2 Darstellungsvarianten von Sankey-Diagrammen

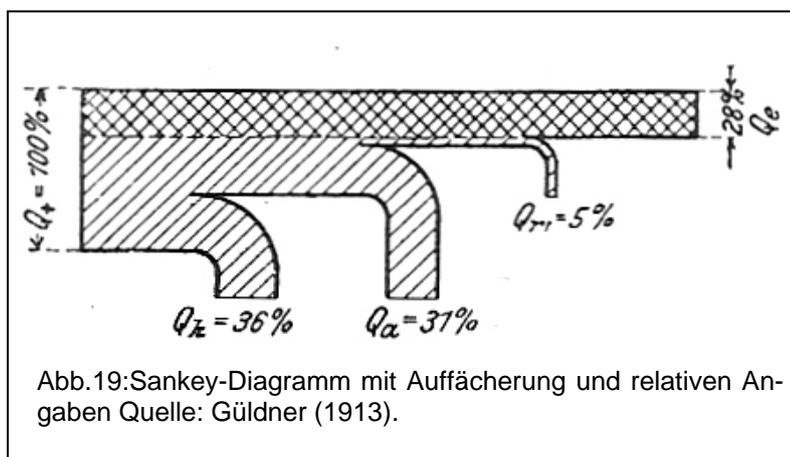
Wie bereits aus der historischen Darstellung in Kapitel 2 deutlich wurde, gibt es nicht das typische Sankey-Diagramm. Im Verlauf der vergangenen 100 Jahre wurden Sankey-Diagramme in verschiedener Weise dargestellt und auf viele Probleme angewendet. Wahrscheinlich ist diese Vielseitigkeit auch der Grund für seinen Erfolg.

Ganz puristisch betrachtet sind Sankey-Diagramme Energieflussbilder, die im Wesentlichen die Aufteilung eines Wärme- oder Energieflusses nach den verschiedenen Quellen oder Senken oder nach anderen Ordnungskriterien darstellen (Abb. 18). Die bekannteste Darstellung sind knotenlose Strom- oder Pfeildiagramme, die sich dann nach diesem Ordnungskriterium auffächern (Abb. 19). Ein modernes Beispiel ist das Energieflussdiagramm der USA (Abb. 1).



Die quantitativen Angaben können absolut, z. B. in Petajoule, oder relativ in Prozent sein. Allerdings deutet

schon die ureigene Visualisierung des Sankey-Diagramms die Größenordnung der verschiedenen Energieflüsse an; die relative Angabe ist eine mehr oder weniger redundante Veranschaulichung der Mengenverhältnisse, während absolute Angaben neben der graphischen Darstellung wirklich neue Informationen liefern.



der Prozessindustrie kann man das unterstellen. Aber schon das Beispiel der Stahl- und Eisenerzströme hat gezeigt, dass bei der Bilanzerhaltung von massebehafteten Stoffen neben den Input- und Outputströmen noch die Bestandsveränderung in einem möglichen Lager berücksichtigt werden muss. Selbst in Energiesystemen können solche Bestände relevant werden, wenn man z.B. an die strategischen Energie-reserven in Ländern oder einfach nur an den Heizölkessel im Keller denkt. Für eine Zeitperiode vom Zeitpunkt i bis zum Zeitpunkt $i+1$ gilt dann:

$$\sum_m IN_{(i,i+1),m} + S_i = \sum_n OUT_{(i,i+1),n} + S_{i+1}$$

wobei IN und OUT die verschiedenen Input- (m) bzw. Outputflüsse (n) der Periode sind und S für den Bestand zum Zeitpunkt i bzw. $i+1$ steht.

Normale Sankey-Diagramme stellen allerdings nur Ströme und keine Bestände dar. Man kann sich behelfen, indem man die Bestandsveränderung wieder als einen Strom darstellt und aus einer Bestandsentnahme einen zusätzlichen Inputfluss und aus einer Bunkerung einen zusätzlichen Outputfluss macht. Dieses Vorgehen wurde bei dem Energieflussdiagramm für Deutschland in Abb. 2 gewählt. Man hat in dem Diagramm allerdings keinen Anhaltspunkt, wie hoch der Bestand in absoluten Zahlen ist.

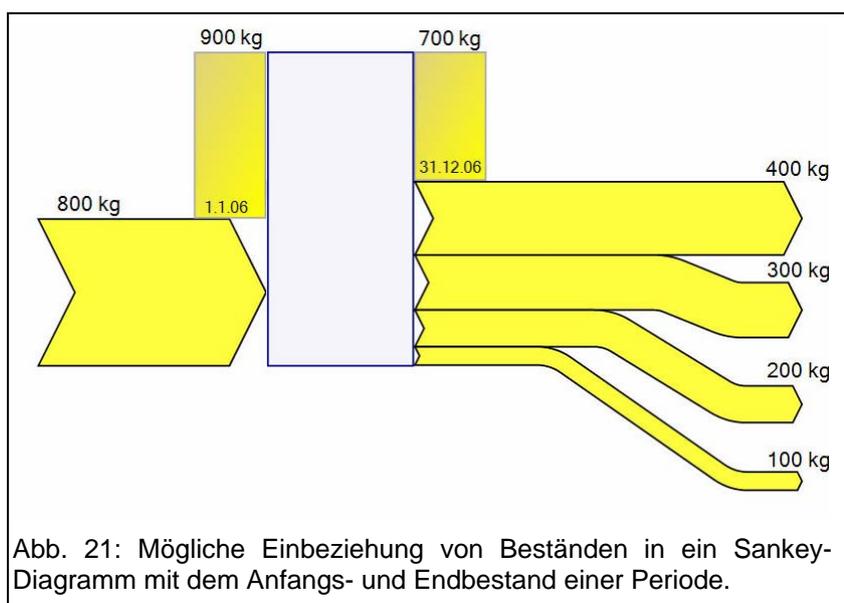
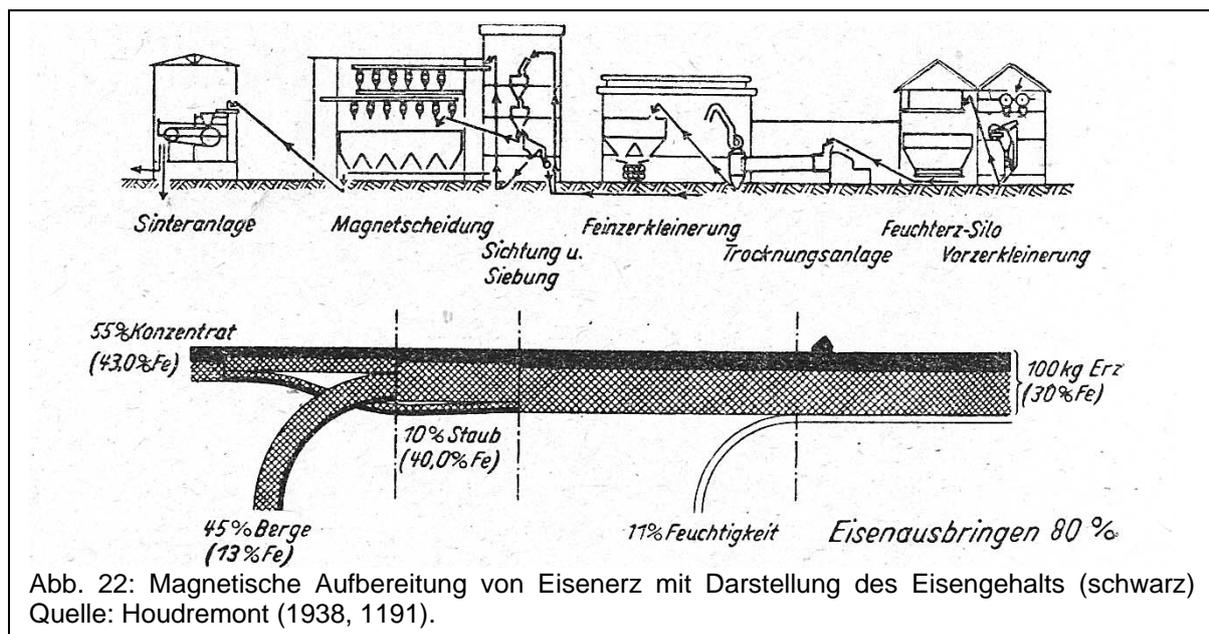


Abb. 21: Mögliche Einbeziehung von Beständen in ein Sankey-Diagramm mit dem Anfangs- und Endbestand einer Periode.

Im betrieblichen Kontext oder allgemein im Stoffstrommanagement spielen Bestände oft eine ebenso wichtige Rolle wie die Ströme selbst und sollten mit abgebildet werden. Eine mögliche Erweiterung des Sankey-Diagramms wäre deshalb die Abbildung der Bestände in einem Lager durch zusätzliche Säulen, die den Knoten zugeordnet sind. Die Säulen können entweder den Anfangs- und Endbestand angeben oder als Alternative – allerdings unter Verlust von Information – nur die Bestandsänderung; ihre Skalierung muss dabei gleich dem Maßstab der Ströme sein, damit eine intuitive Erfassung der Mengenverhältnisse möglich ist (Abb. 21).



Eine beliebte Variante von Sankey-Diagrammen ist die Darstellung mehrerer Flussobjekte gleichzeitig, also bei Massen z. B. die Mengen verschiedener Stoffe oder Materialien mit verschiedenen Eigenschaften oder bei Energie verschiedene Energieformen. Sie werden durch unterschiedliche Farbgebung oder Schraffur voneinander unterschieden. Entweder es gelten dann für jedes Flussobjekt einzeln die Erhaltungssätze – z.B. für chemische Elemente. Bereits in den 30er Jahren wurde so der Eisengehalt von Erzen ausgewiesen (Abb. 22). Eine modernere Darstellung eines Stahlwerks ist in Abb. 23 zu sehen, bei der zuerst der Gesamtmaterialstrom, dann der Eisenstrom und schließlich der Schwefelstrom dargestellt sind. Neben der Gesamtmassenerhaltung muss in diesem Fall an jeder Stelle auch eine Bilanzgleichung für die einzelnen chemischen Elemente erfüllt sein.

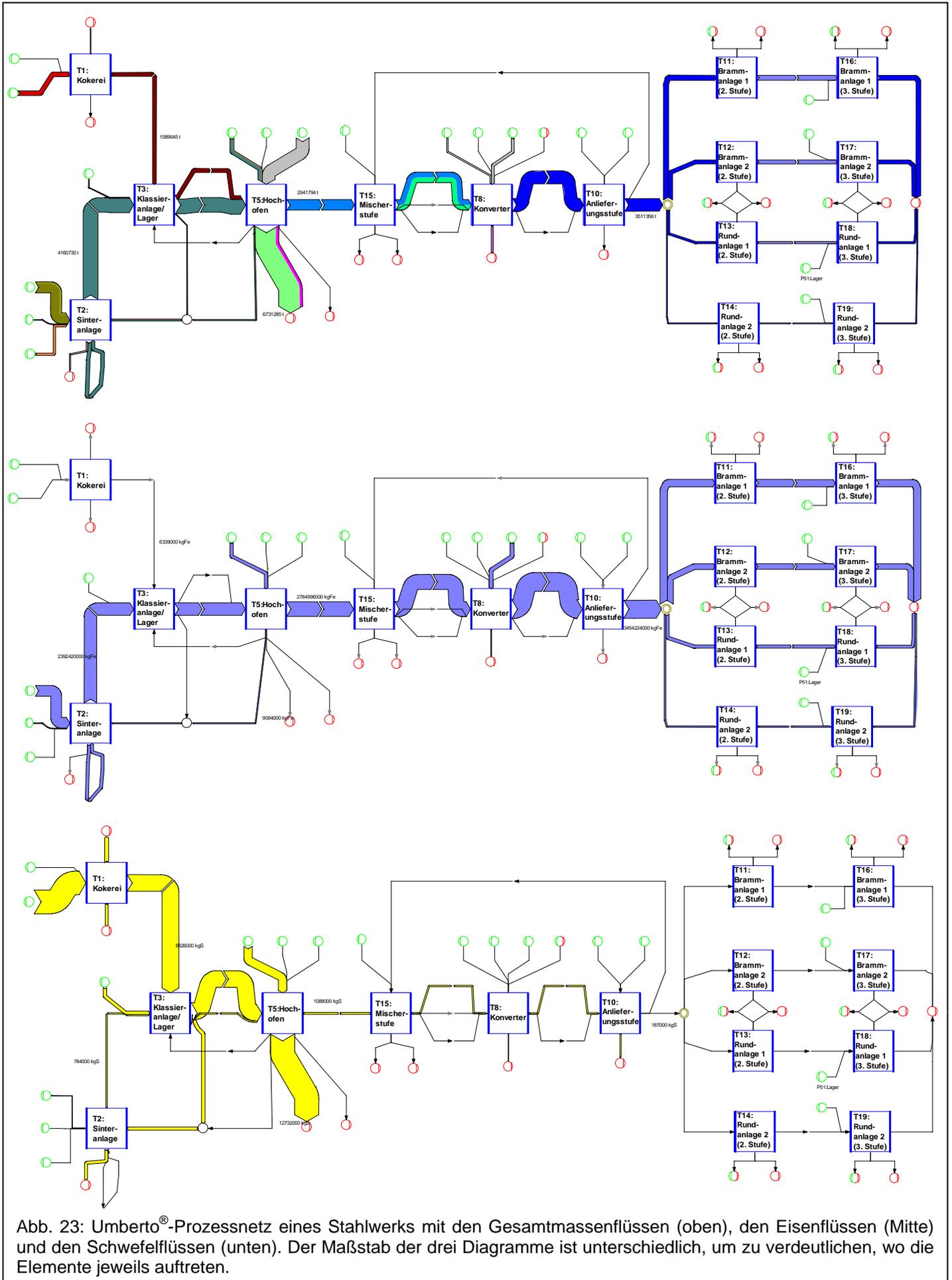
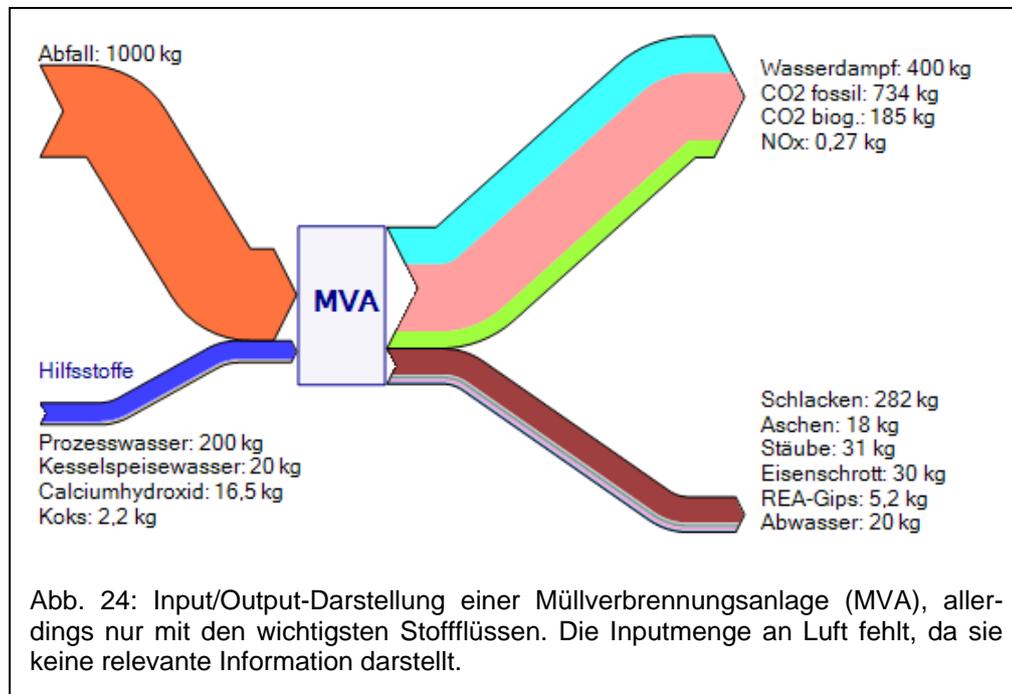


Abb. 23: Umberto[®]-Prozessnetz eines Stahlwerks mit den Gesamtmassenflüssen (oben), den Eisenflüssen (Mitte) und den Schwefelflüssen (unten). Der Maßstab der drei Diagramme ist unterschiedlich, um zu verdeutlichen, wo die Elemente jeweils auftreten.

Oder man beschreibt mit den verschiedenen markierten Flussobjekten explizit die Stoff- oder Energieumwandlung, wie sie in der Produktion oder Abfallentsorgung (Reduktion) stattfindet. Die Darstellung verschiedener Materialien innerhalb eines Dia-



gramms ist besonders für das Life Cycle Assessments von Produkten von Bedeutung. Hier steht nicht nur im Mittelpunkt, wie viel für eine Produktion benötigt wird und wie viel als Emissionen, Abfälle usw. entsteht, sondern auch um *welche* Rohstoffe, Schadstoffe usw. es sich dabei handelt. Das Augenmerk liegt auf den ökologisch relevanten Objekten. Dafür wird teilweise sogar in Kauf genommen, dass ökologisch irrelevante Stoffströme vernachlässigt werden und damit die Massenbilanz verletzt wird.

Als Beispiel kann ein Verbrennungsprozess angeführt werden, bei dem zwar der Brennstoffeinsatz und die Emission diverser Schadstoffe berücksichtigt wird (Abb. 24). Der Einsatz von Luft (mit dem notwendigen Sauerstoff zur Verbrennung und Stickstoff zur Bildung von NO_x) wird aber meistens stillschweigend vorausgesetzt und nicht explizit mitbilanziert. Ein entsprechendes Sankey-Diagramm zeigt in diesem Fall nur die ökologisch relevanten Stoffströme und die Mengenbilanz geht streng genommen nicht mehr auf. Bei dieser Anwendung liegt der Nutzen der Sankey-Darstellung weniger im Aufzeigen von mengenmäßigen Bilanzunstimmigkeiten, als vielmehr im Verfolgen ökologisch relevanter Stoffströme.

Ein anderes Problem zeigt sich in Abb. 25: Hier werden die Stoffströme von Platinmetallen dargestellt; es handelt sich um ca. 10^2 Tonnen. Die Erzmengung, aus denen die Metalle gewonnen werden, liegt aber im Bereich von 10^7 Tonnen und ist in dem Diagramm oben links angedeutet. Die Darstellung ist natürlich nicht mehr maßstäblich, da man ansonsten die wesentlichen Mengenströme (die der Platinmetalle) nicht mehr erkennen könnte.

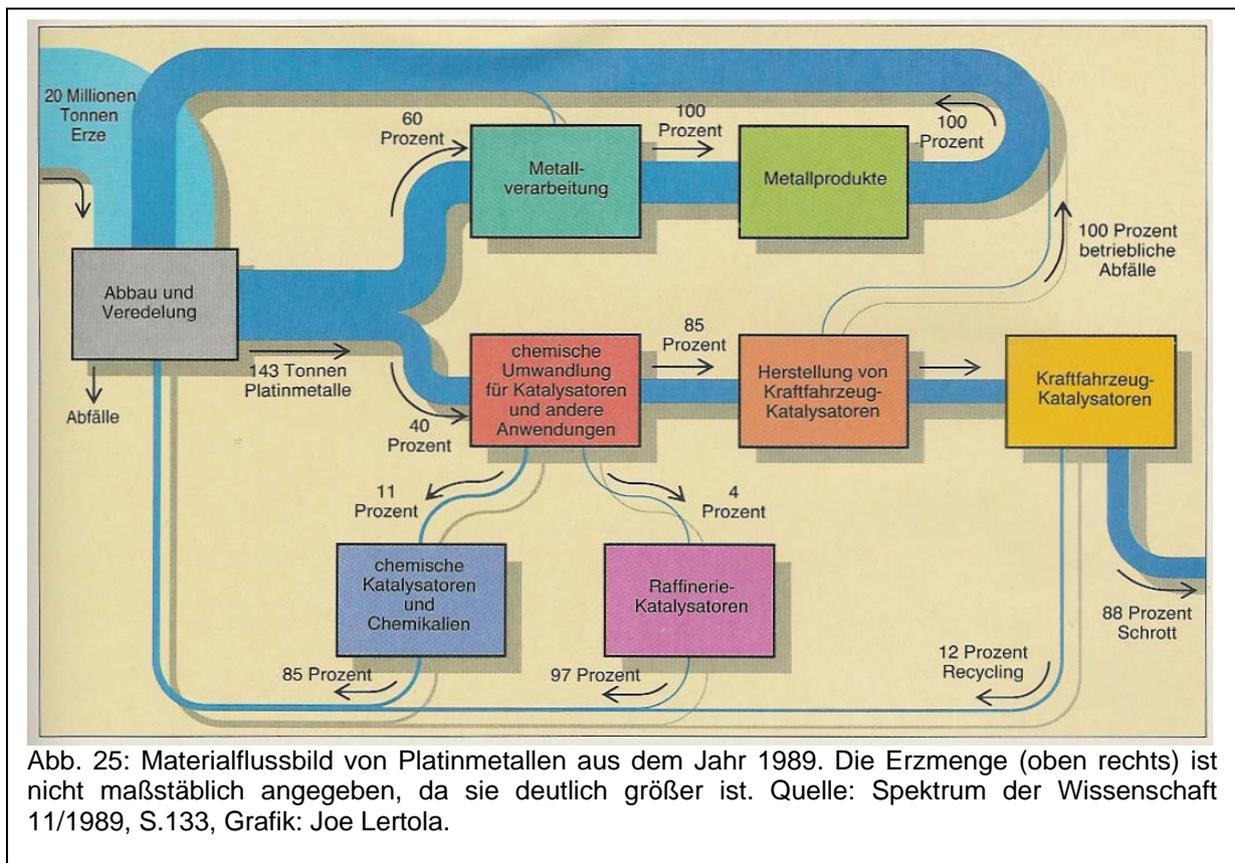


Abb. 25: Materialflussbild von Platinmetallen aus dem Jahr 1989. Die Erzmengung (oben rechts) ist nicht maßstäblich angegeben, da sie deutlich größer ist. Quelle: Spektrum der Wissenschaft 11/1989, S.133, Grafik: Joe Lertola.

Es stellt sich die Frage, ob für solche Fälle eine andere Skalierung gewählt werden kann. Man könnte eine stark nichtlineare Skala (Flussmenge ist proportional zu n-ten Potenz der Pfeilbreite) wählen - eine logarithmische Skala schließt sich aus, da Nullpunkt und kleine Mengen sich mit Pfeilbreiten nicht geeignet darstellen lassen.

Aber mit einer nichtlinearen Darstellung geht ein wesentliches Merkmal der Sankey-Diagramme verloren: Die intuitive Erfassung der Größenverhältnisse und ggf. die Überprüfung einer Bilanzerhaltung. Die Pfeilbreiten können im Geiste nicht mehr addiert werden. Auch sind nach verschiedenen Flussobjekten unterteilte Flusspfeile, wie in Abb. 24 angedeutet, nicht mehr möglich, da sie die Additivität voraussetzen. Es bietet sich deshalb eher an, bei einer streng proportionalen Skala zu bleiben und

„Ausreißer“ bei den Werten durch eine obere Schranke grafisch zu kennzeichnen, den Wert eindeutig zu beziffern und damit anzudeuten, dass in diesem Fall die „visuelle Bilanzerhaltung“ außer Kraft gesetzt ist. So wurde das Problem quasi auch in Abb. 25 gelöst.

3.3 Sankey-Diagramme mit Wertströmen

Mit einem Sankey-Diagramm können die Energie- und Materialflüsse zwischen den Systemelementen eines komplexen Systems anschaulich dargestellt werden. Im bisherigen Beitrag erfolgte das alles in Mengeneinheiten, also in einem physikalischen Maßsystem. In ökonomischen Systemen ist mit den Energie- und Materialflüssen aber auch ein Wertstrom verbunden, die Flüsse stellen Werte dar, die zwischen den Systemelementen, z.B. Wirtschaftssektoren oder Unternehmen, übertragen werden. Gerade in der aktuellen Situation, wo Ressourcen einen steigenden ökonomischen Wert haben, ist eine Wertdarstellungen besonders verlockend.

Ein prominentes Beispiel einer solchen Wertdarstellung wurde vom Nobelpreisträger Wassily Leontief angeführt (Leontief 1985). Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge in einer Volkswirtschaft und der Austauschprozesse zwischen den verschiedenen Sektoren hat er die in Abb. 26 gewählte Darstellung benutzt. Berücksichtigt werden drei Sektoren mit jeweils einem Ausstoß: Die Landwirtschaft (grün) hat als Output landwirtschaftliche Erzeugnisse, gemessen in Pfund; die Industrie (blau) hat als Output Tuch, gemessen in Ellen Tuch; die privaten Haushalte (ocker) stellen die Arbeitskräfte zur Verfügung, gemessen in Arbeitsstunden, und ihnen gehört der Kapitalbestand des landwirtschaftlichen und industriellen Sektors.

Das Flussdiagramm zeigt einerseits an, welche Mengen an Gütern ausgetauscht werden, also z. B. produziert die Industrie 50 Ellen Tuch und braucht dazu 20 Pfund landwirtschaftliche Erzeugnisse, 6 Ellen seiner eigenen Produktion, 135 Arbeitsstunden sowie 100 Pfund Kapitalgüter aus der landwirtschaftlichen (hellgrün) und 50 Ellen Kapitalgüter aus der industriellen Produktion (hellblau). Wird von einer Kapitalsertragsrate von 10 Prozent und einem Stundenlohn von 1 Dollar ausgegangen wird, dann ergeben sich aus dem Leontief'schen Modellansatz die Flusszahlen in dem Bild.

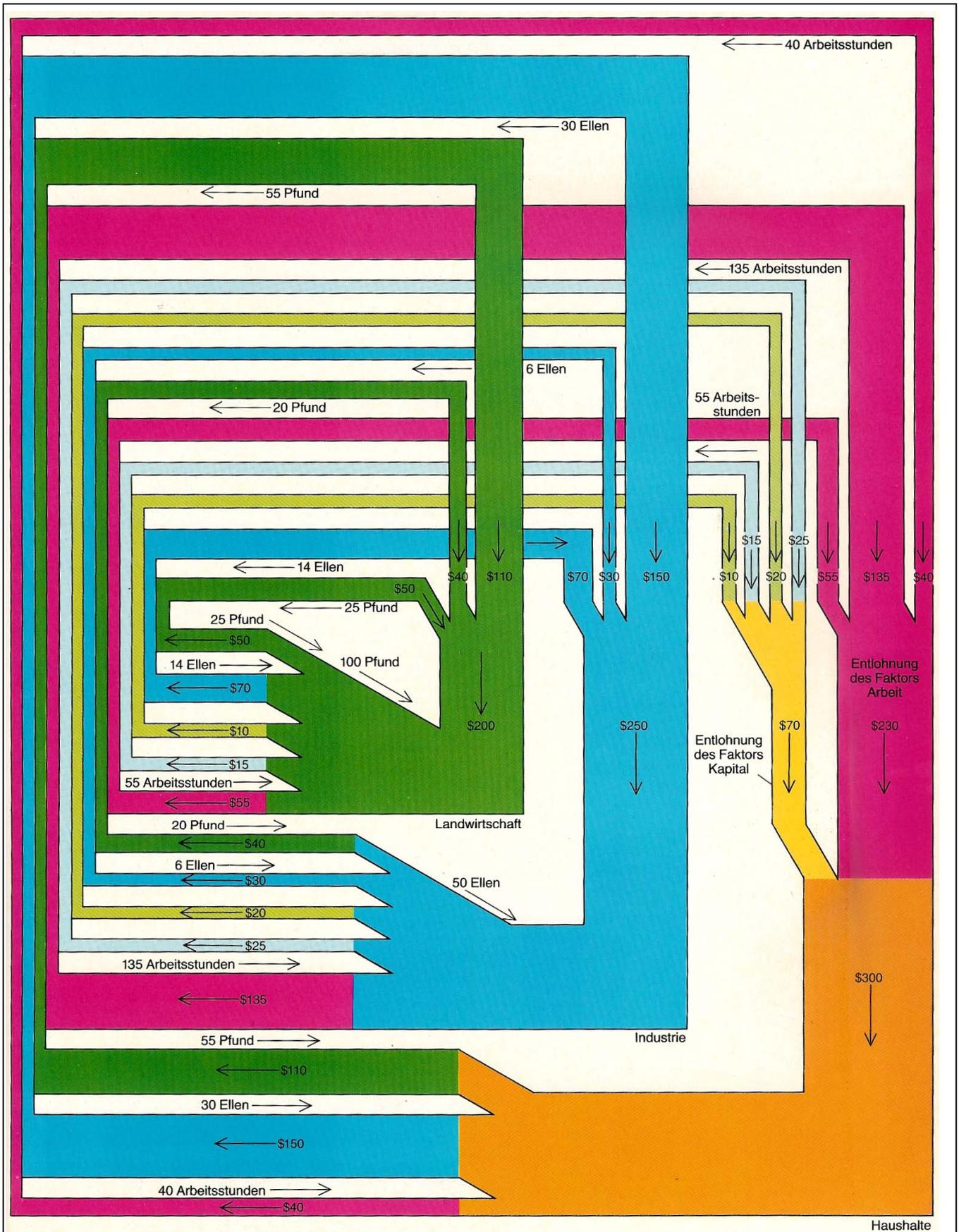


Abb. 26: Verflechtung einer vereinfachten Volkswirtschaft mit den Bereichen Landwirtschaft, Industrie und private Haushalte. Angegeben sind die Güterströme zwischen den Bereichen und (jeweils in Gegenrichtung) die damit verbundenen Geldströme. Quelle: Spektrum der Wissenschaft 8/1985, S.33, Grafik: Jerome Kuhl.

Zwei Dinge fallen hier auf:

- Der Geldstrom verläuft entgegen der Richtung des Güterstroms und stellt damit den Austauschprozess zwischen den Sektoren dar. Beim Übergang vom Güterstrom zum Geldstrom tritt also ein Richtungswechsel bei den Pfeilen auf.
- Es werden nur Flussgrößen, aber keine Bestandsgrößen dargestellt. So bleibt unklar, welche Bestände an Gütern in der Industrie oder in der Landwirtschaft noch existieren.

Das Bild ist aber in sich konsistent und dient vor allem der Veranschaulichung des 50 Jahre zuvor entwickelten Leontief'schen Modellansatzes, der ansonsten typischerweise mit linearen Gleichungssystemen und Matrizen formuliert wird. Der Zusammenhang zwischen den Mengenströmen und den Wertströmen besteht im Preis der Güter: $\text{Wert} = \text{Menge} \times \text{Preis}$.

Insofern ist auch eine Übertragung des Vorgehens auf andere nichtökonomische Bewertungen von Stoffströmen denkbar: So könnte man beispielsweise die Bewertung der ökologischen Wirkung von Stoffen verwenden: Neben den Mengen an Kohlendioxid, Methan oder Fluorchlorkohlenwasserstoffen kann man so die Treibhauswirksamkeit (gemessen in kg CO₂-Äquivalent) der Stoffe darstellen.

3.4 Sankey-Diagramme für die betriebliche Kostenstruktur

Die Anwendung wertbezogener Sankey-Diagramme im betrieblichen Kontext ist nur auf den ersten Blick trivial. Eine einfache Möglichkeit wäre, die Vorgehensweise von Leontief aus Abb. 26 auf die innerbetrieblichen Stoffströme zu übertragen: Die Produktionsprozesse erfordern einen Rohstoffeinsatz und liefern Produkte. Diese werden mit ihren Preisen bewertet, liefern also einen Ertrag, der als monetärer Strom – quasi im Austausch mit den Gütern – in entgegengesetzte Richtung zu den Rohstoffflüssen zurückgereicht wird.

In Abb. 27a sind die physischen Flüsse, also die Material- und Energieflüsse eines betrieblichen Systems dargestellt. Neben den Rohstoffen und (Zwischen-)Produkten fließen bei Prozess 1 noch beispielhaft Emissionen in die Luft, bei Prozess 2 und 3 entstehen Abfälle. Das Bild zeigt anschaulich, was fließt – folgt also dem Prinzip

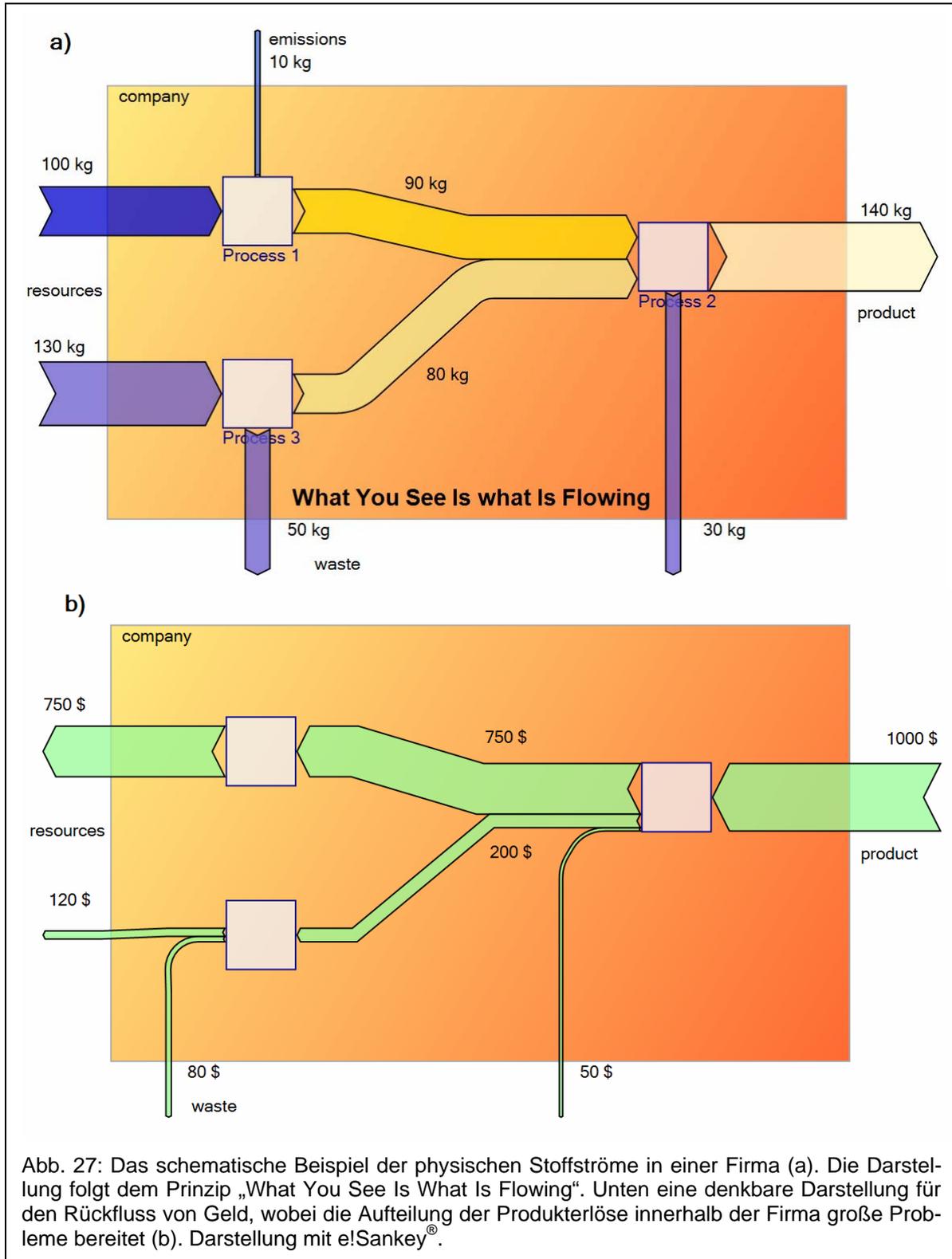


Abb. 27: Das schematische Beispiel der physischen Stoffströme in einer Firma (a). Die Darstellung folgt dem Prinzip „What You See Is What Is Flowing“. Unten eine denkbare Darstellung für den Rückfluss von Geld, wobei die Aufteilung der Produkterlöse innerhalb der Firma große Probleme bereitet (b). Darstellung mit e!Sankey®.

„What You See Is What Is Flowing = WYSIWIF“. Eine monetäre Bewertung der physischen Flüsse könnte zu dem Sankey-Diagramm in Abb. 27b führen und quasi den Geldstrom im Austausch für die Produkte, Rohstoffe usw. anzeigen. Bei den Abfällen muss allerdings Geld aufgewendet werden, um den Abfall zu entsorgen; deshalb zeigt hier der Materialstrom in die gleiche Richtung wie der Geldstrom. Ansonsten

sind Materialstrom und Geldstrom entgegengesetzt, was der Intuition eines Austausches von Gütern und Geld entspricht. Die Emissionen sind in diesem Fall „kostenlos“.

Aber diese Darstellung ist im betrieblichen Kontext irreführend. Sie ist nämlich nur möglich, wenn die Preise der physischen Ströme bekannt sind. Dies kann in der Regel nur für den Einkauf von Rohstoffen oder den Verkauf von Produkten angegeben werden, also an den betrieblichen Grenzen des betrachteten Systems, aber nicht innerhalb des Systems selbst. Für die intern auftretenden Zwischenprodukten und Leistungsbereitstellung liegen Preise selten vor oder sind mehr oder weniger willkürlich gewählt, da sie nicht dem Preisbildungsmechanismus eines Marktes entspringen.

Außerdem fehlen in der Darstellung entscheidende Posten, weshalb die Bilanz an den Knoten nicht „aufgeht“: Neben den materiellen Einsatzfaktoren und Produkten müssen nämlich auch die Faktoren Kapital, Arbeit, Lizenzgebühren, Gewinnmargen usw. bei der monetären Bewertung berücksichtigt werden. Diese ergeben sich aber nicht zwangsläufig aus dem physischen Mengengerüst der Flüsse, sondern kommen hinzu und sind eher den Produktionsprozessen und dazugehörigen Bezugsgrößen zugeordnet.

Ein besserer Ansatz für die grafische Darstellung, der in der Praxis auch bereits gewählt wurde, ist dagegen die Verfolgung der Kosten innerhalb eines Unternehmens (Möller 2000, S. 169 ff.). Dies kann z. B. Ergebnis einer Kosten- und Leistungsrechnung sein. In Abb. 28 sind die Kosten der physischen Ströme dargestellt – sie zeigen an, was die physischen Ströme jeweils wert sind und wie eine Wertschöpfung von Produktionsschritt zu Produktionsschritt bis hin zum Endprodukt erfolgt. Die Darstellung folgt also dem Prinzip „What You See Is What It Costs = WYSIWIC“.

Gegenüber der Darstellung in Abb. 27b, die von Erlösen ausgeht, können die Kosten im Unternehmen verhältnismäßig einfach ermittelt und längs der Wertschöpfungskette auch weitergereicht werden. Die produzierte Menge eines (Zwischen-)Produkts – also die Leistungserstellung des jeweiligen Prozesses – muss dann die Kosten der dafür erforderlichen Rohstoffe tragen. Mit der stoffstrombezogenen Kosten- und Leistungsrechnung, wie sie Möller (2000) verwendet hat, können insbesondere auch un-

echte Gemeinkosten, z.B. der Verzehr an Hilfs- und Betriebsstoffen oder Energie, der jeweiligen Produktion zugeordnet werden und damit Kostentransparenz schaffen.

Dieses Zurechnungsverfahren lässt sich auf der physischen Ebene durchführen, womit nicht nur eine ökonomische, sondern auch eine ökologische Analyse möglich wird, die kausale Zusammenhänge im Unternehmen untersucht. So kann also z.B. die Frage geklärt werden, welche Stoffströme tatsächlich mit der Produktion eines

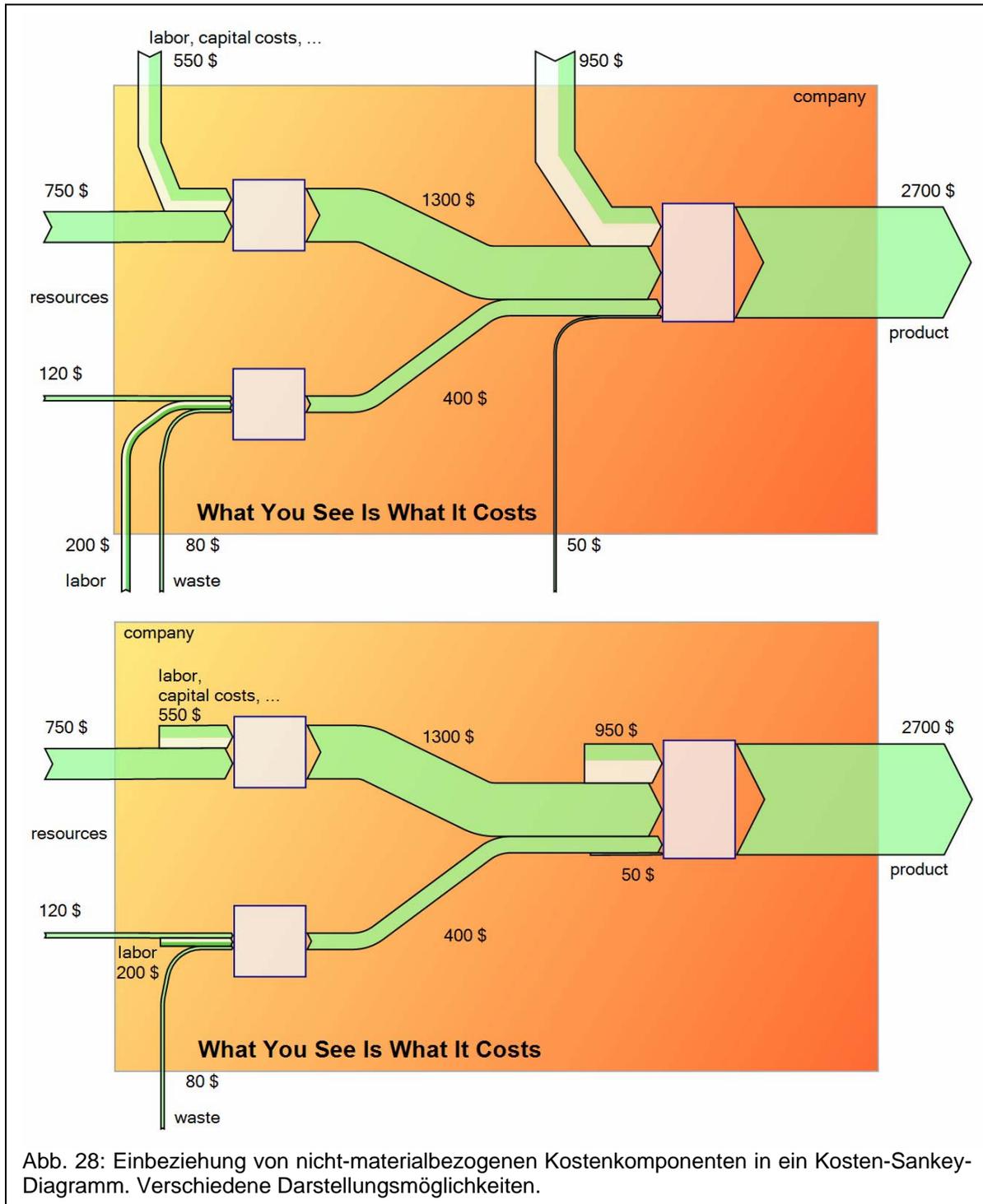


Abb. 28: Einbeziehung von nicht-materialbezogenen Kostenkomponenten in ein Kosten-Sankey-Diagramm. Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten.

Produktes in einem Unternehmen verbunden sind, wenn man auch alle Hilfs- und Nebenprozesse usw. einbezieht. Daraus kann man nicht nur die Kosten, sondern z.B. auch die Treibhauswirksamkeit, also eine ökologische Bewertung eines Produktes ableiten, wenn entsprechende Bewertungen für die Einsatzfaktoren vorliegen.

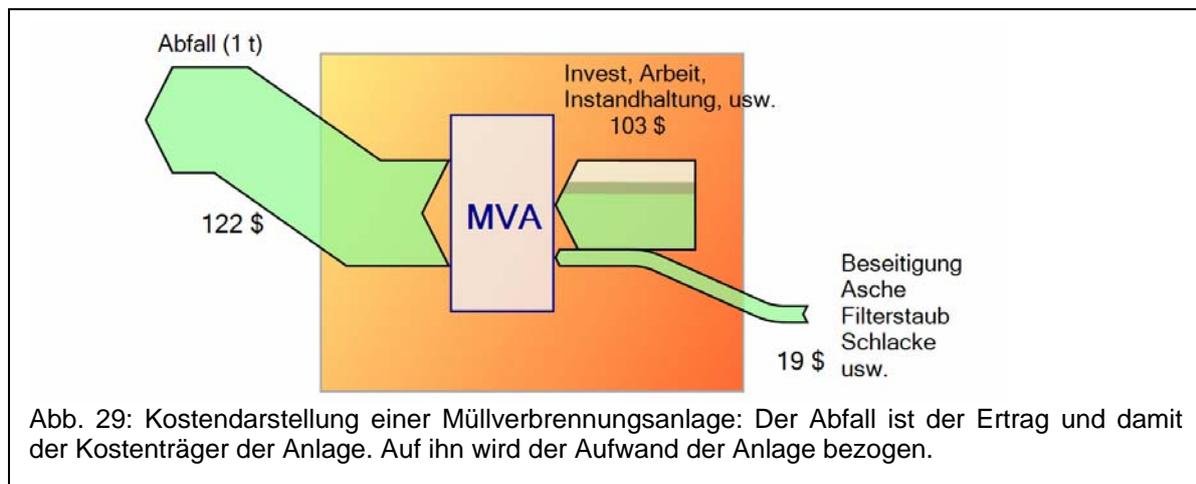
Allerdings gehen neben den flussbezogenen Kostenbestandteilen durch die Rohstoffe usw. wieder Kostenbestandteile ein, die eher den Bearbeitungsprozessen zugeordnet werden müssen, wie z.B. Arbeitskosten, Kapitalkosten, Lizenzgebühren, usw. Diese könnten als monetäre Inputs in den Prozess angezeigt werden (28a), sie haben allerdings kein materielles Pendant, weshalb sich diese Darstellungsform kaum für eine Stoffstromanalyse eignet. Eine Alternative wäre die grafische Anbindung der Kosten an den Prozess, bei dem sie entstehen, etwa durch einen entsprechenden Balken (28b). Die Spitze zum Prozess hin soll andeuten, dass Kosten für diesen Prozess anfallen. Das Ziel der Sankey-Darstellung wäre in diesem Fall, wieder eine visuelle Bilanzierung pro Prozess zu erreichen.

Von Bedeutung ist dabei die Richtung der Pfeile: Sie deuten den Wertschöpfungsprozess an, also quasi in welche Richtung die Kosten weitergereicht werden. Nur so kann erreicht werden, dass die Summe der auf einen Prozess hinführenden Pfeile und die Summe der von einem Prozess wegführenden Pfeile den gleichen Wert ergeben. Im normalen Fall des Verbrauchs an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, selbst beim Einsatz von Arbeit und Kapital, ist das kein Problem. Die physische Flussrichtung zeigt in die gleiche Richtung wie der Wertstrom, in Richtung der Endprodukte. Wenn allerdings ein Prozess Abfälle produziert, die teuer entsorgt werden müssen, dann weisen die physische Flussrichtung und der Wertstrom in eine unterschiedliche Richtung. Der Abfall verlässt zwar den Prozess und das Unternehmen, aber die Kosten zu seiner Entsorgung muss von dem Produkt des Prozesses getragen werden.

Das Problem kann leicht geklärt werden, wenn die Materialströme nach Aufwand und Ertrag unterschieden werden: Der Wertstrom eines Aufwandes führt immer zu einem Prozess hin, der Wertstrom eines Ertrages von ihm weg. Hier wird die Idee genutzt, statt eines Input-Output-Graphen, wie er typischerweise den Sankey-Diagrammen zugrunde liegt, einen so genannten Aufwands- und Ertragsgraphen zu verwenden (Schmidt, 2005, S. 512). Das heißt, die Flüsse werden nicht nach Input oder Output

sortiert, sondern nach der Frage, was ein gewünschter Ertrag eines Prozesses oder Unternehmens ist, und was einen Aufwand darstellt (Tab. 1).

Der Aufwandsfrage unterliegt dabei implizit die Bewertung des Stoffes, ob es sich dabei um ein Gut oder ein Übel – egal ob im ökonomischen oder ökologischen Sinne – handelt. Diese Systematik hilft auch für den Fall, dass die gewöhnliche Flusslogik im Unternehmen durchbrochen wird: So wird etwa in einer Müllverbrennungsanlage der Ertrag nicht von der Menge eines produzierten Produktes bestimmt, sondern vom Input an Müll (Abb. 29). Der Output an zu entsorgender Asche oder an Filterstäuben stellt dagegen einen Aufwand dar, der mit Kosten verbunden ist.



Tab. 1: Systematisierung von Materialströmen als Input und Output bzw. als Aufwand und Ertrag.

Input	Output	Aufwand	Ertrag
Rohstoffe	Produkte	Rohstoffe	Produkte
Hilfsstoffe		Hilfsstoffe	
Energie (Verbrauch)	Energie (Produktion)	Energie (Verbrauch)	Energie (Produktion)
	Abfälle	Abfälle	
	Emissionen	Emissionen	
Abfälle (zur Vernichtung)			Abfälle (zur Vernichtung)

3.5 Sankey-Diagramme ohne Vollkostenrechnung

Die Stärke der Sankey-Darstellung, die visuelle Bilanzhaltung, ist in der betrieblichen Kostendarstellung auch gleichzeitig ihre Schwäche. Denn sie macht nur Sinn beim Konzept der Vollkostenrechnung. In diesem Fall werden alle Kosten auf das

Produkt übergewälzt. Damit wird aber so getan, als wäre die Produktmenge die richtige Bezugs- oder Einflussgröße für die Kosten. Dies ist jedoch nicht immer richtig. So werden bestimmte Kostenbestandteile zwar reduziert, wenn man nur noch die Hälfte der Produktmenge produziert, z.B. durch die reduzierte Menge an eingesetzten Rohstoffen. Beispielsweise werden aber Arbeitskräfte pro Zeiteinheit bezahlt und nicht pro Produktionsmenge, d.h. ihre Kosten laufen weiter, auch wenn weniger oder nichts produziert wird.

Strebel (2003, S. 157f.) hat auf dieses Problem im Zusammenhang mit der Stoffflussrechnung von Wagner u. Strobel (1999) hingewiesen und die Vorstellung kritisiert, *„als folgten die Kostenströmen den Materialströmen, so dass eine Parallelität von Stoffströmen und Kostenströmen existiert“*. Und weiter: *„Als Bezugsobjekte („Kostenträger“) erscheinen dann auch Stoff- und Energieströme wie Gefahrstoffe, Reststoffe, Verpackungsmaterialien oder Energiearten.“* Er zitiert Riebel (1994, S. 75), der eine Zurechnung der Kosten nach dem Verursacherprinzip oder auch nach dem Finalprinzip (einer Zweck-Mittel-Relation) ablehnt und stattdessen die Anwendung des Identitätsprinzips fordert: Kosten und Leistungen sind Folge von Entscheidungen im Unternehmen und werden geeigneten Entscheidungsobjekten zugeordnet. Diese Forderung erfüllt z. B. die Teilkostenrechnung oder die Rechnung mit Einzelkosten und Deckungsbeiträgen.

Unter dieser Voraussetzung sollte man mit einem Sankey-Diagramm nur die direkten variablen Kostenanteile (und evtl. die nichtechten Gemeinkosten) darstellen, die mit einer Leistung eines Prozesses, also z. B. des (Zwischen-)Produktes, verbunden sind. Das wäre die grafische Umsetzung einer Art Teilkostenrechnung. Allerdings gehen damit mehrere Vorteile der Sankey-Darstellung verloren: Die grafische Bilanz-erhaltung wird nicht mehr genutzt und in der Abbildung sind die Gesamtkosten nicht mehr erkennbar – im Gegenteil: durch Vernachlässigung fixer Kosten im Unternehmen wird die Darstellung sogar missverständlich und leistet Fehlentscheidungen Vorschub.

Eine Möglichkeit wäre deshalb, die fixen Kosten, die in der Regel an Prozesse oder Unternehmensbereiche gebunden sind, als Balken darzustellen (Abb. 30a). In der Teilkostenrechnung werden sie dann nicht der Ausbringungsmenge an Leistungen

oder Produkten zugerechnet, sondern stellen einen eigenen Kostenblock dar, der auch für das gesamte Unternehmen aggregiert werden kann, wenn dieses als Black-Box betrachtet wird (Abb. 30b).

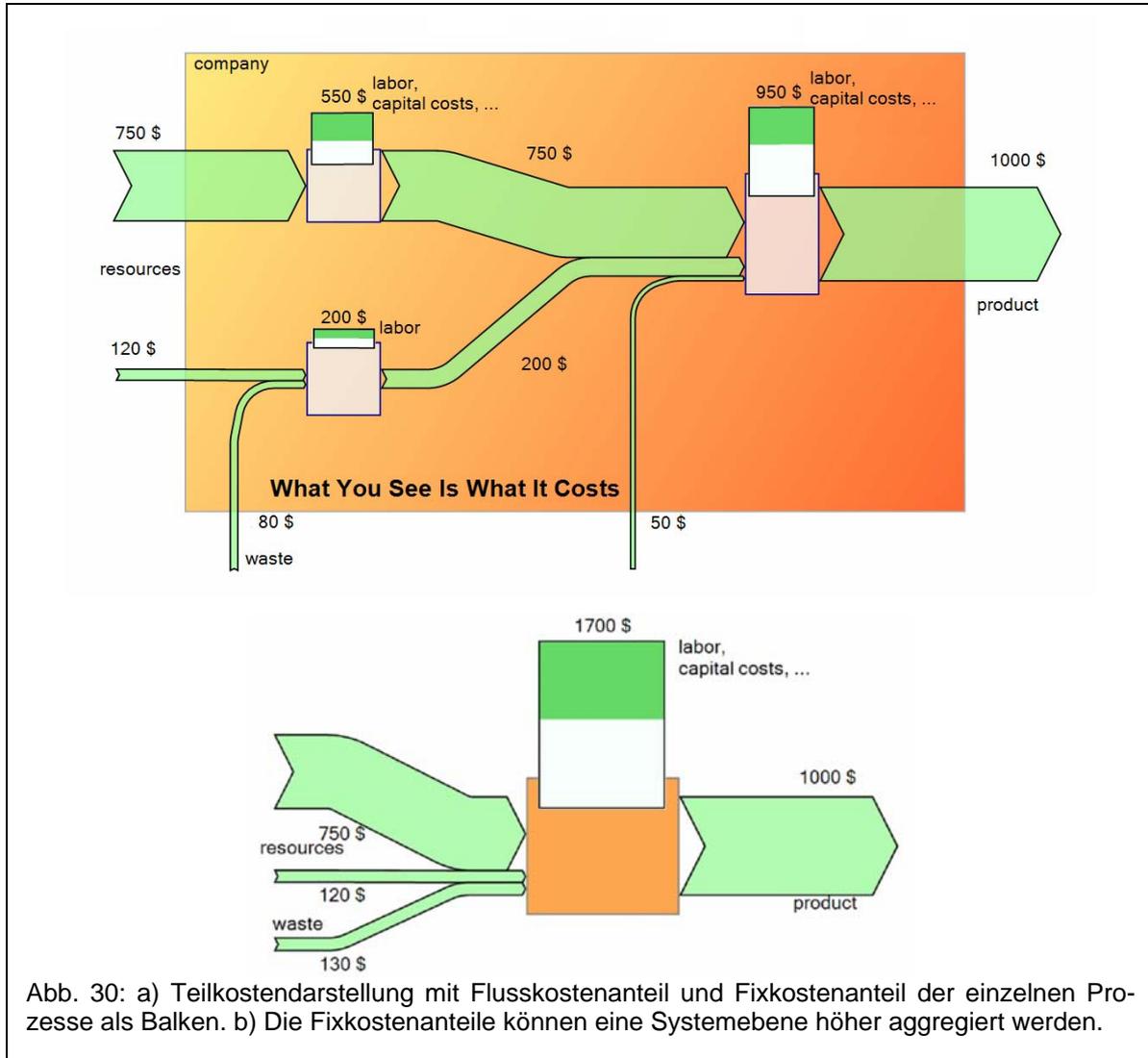


Abb. 30: a) Teilkostendarstellung mit Flusskostenanteil und Fixkostenanteil der einzelnen Prozesse als Balken. b) Die Fixkostenanteile können eine Systemebene höher aggregiert werden.

Eine ähnliche Darstellung könnte übrigens auch für die Kuppelproduktion, also der technisch miteinander verbundenen Produktion mehrerer Produkte, genutzt werden. Will man eine mehr oder weniger willkürliche Aufschlüsselung der – auch proportionalen – Kosten auf die einzelnen Produkte vermeiden, so stellt man die proportionalen Kosten gemeinsam für die Produktbündel bzw. für die betreffenden Produktionseinheiten dar. Die Balken an den Prozessen bzw. Unternehmensbereichen in Abb. 30a könnten dann noch um einen proportionalen Anteil ergänzt werden.

Man erkennt also aus der Darstellung in Abb. 30, welche Kosten sich proportional zur Produktmenge verhalten und welche Kosten – trotz evtl. veränderter Produktmenge –

bestehen bleiben. Eine Aussage über die Auslastung der Arbeitskräfte, Produktionsanlagen usw., die zu den fixen Kostenbestandteilen beitragen, hat man damit freilich noch nicht. Genauso wenig erkennt man aus der Darstellung (auch nicht aus den proportionalen Kosten), ob das technische System „effizient“ arbeitet.

Das konnte aber auch Sankey aus seiner ursprünglichen Darstellung einer Dampfmaschine nicht ablesen; erst durch den Vergleich mit einem idealisierten Prozess, dem Clausius-Rankine-Zyklus, wurde eine Aussage zur Effizienz möglich. Eine modellhafte Darstellung wie das Sankey-Diagramm darf eben nicht mit dem Realsystem verwechselt werden, und es darf nicht angenommen werden, hier würden tatsächliche – technische oder ökonomische – Kausalitäten abgebildet werden. Das Sankey-Diagramm dient mit seiner Anschaulichkeit lediglich als Hilfsmittel der Interpretation und Analyse, ersetzt diese aber nicht.

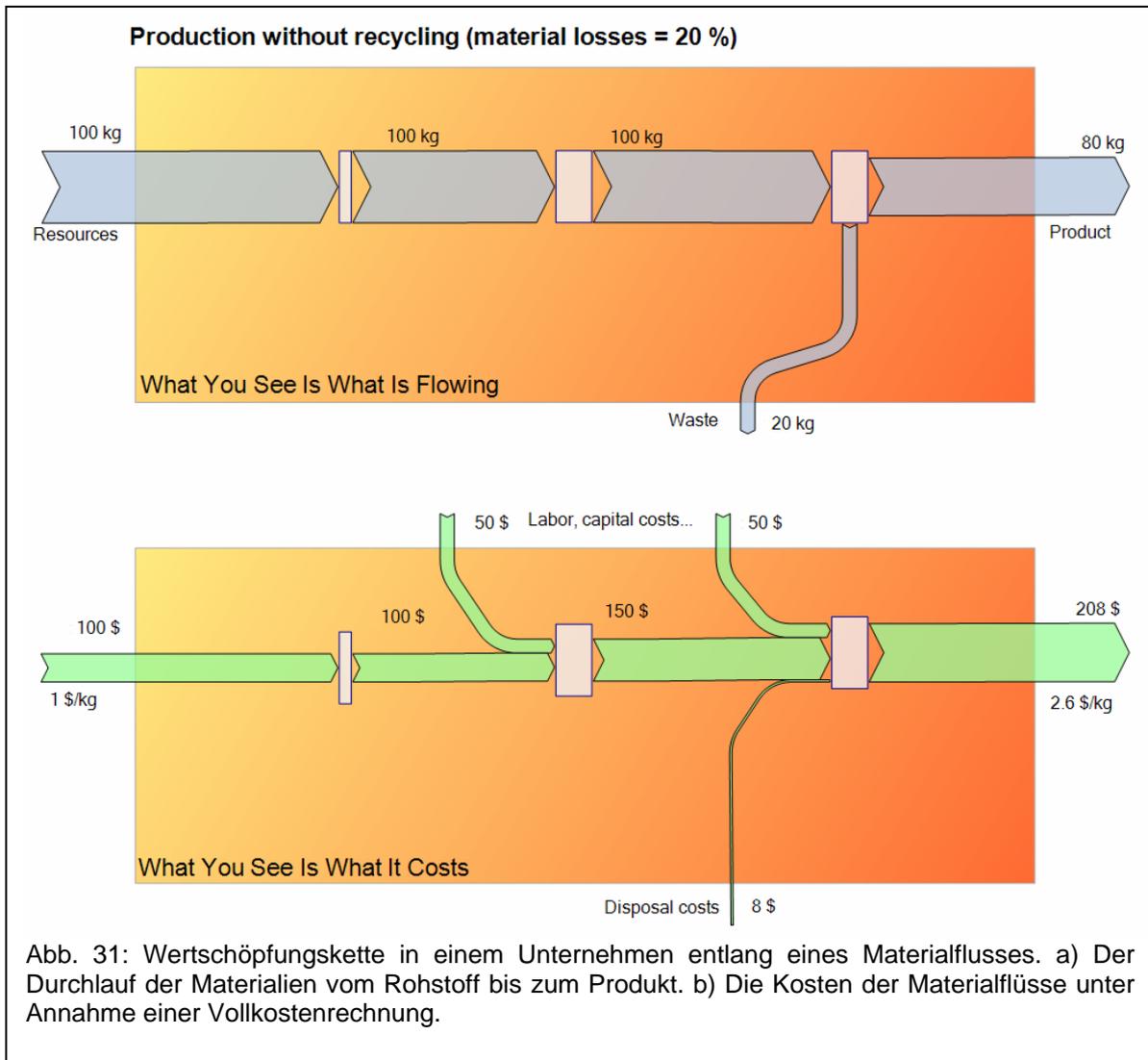
3.6 Anwendungsbeispiel: Innerbetriebliches Recycling

Ein typisches Beispiel für eine innerbetriebliche Anwendung ist in Abb. 31 dargestellt. Es zeigt ein suboptimales System mit Materialverlust; aber auch der weit verbreitete Lösungsansatz mit innerbetrieblichem Recycling liefert nicht zwangsläufig die beste der möglichen Lösung. Wie die Erfahrungen in verschiedenen Studien in Deutschland zeigt, treten solche Situationen in der Praxis immer wieder auf, z.B. in der Kunststoff verarbeitenden Industrie, in der Papierproduktion oder in der Metallverarbeitung.

Der Einfachheit halber wird nur ein Rohstoff verarbeitet, wie aus dem Massenflussdiagramm ersichtlich ist (Abb.31a). Unter Einsatz von Arbeit – andere Einsatzfaktoren wie Energie, Hilfsstoffe, Kapital usw. werden vernachlässigt – wird ein Produkt hergestellt. Immerhin 80 % des eingesetzten Rohstoffes landen im Produkt; allerdings entstehen 20 % Abfall, z.B. weil bestimmte Qualitätsanforderungen nicht erfüllt sind. Dieser Abfall wird entsorgt.

In Abb. 31b sind die Kosten dargestellt, wobei in diesem Beispiel von einem Vollkostenansatz ausgegangen wird: Der Hauptbeitrag zu den Kosten liefert der Rohstoff. Mit dem Einsatz von Arbeit in den verschiedenen Bearbeitungsstufen steigt der Wert

des jeweiligen Zwischenproduktes, man erkennt also die Wertschöpfung entlang der Bearbeitungskette. Die Entsorgung des Abfalls verursacht zusätzliche Kosten, die im Sinne einer Vollkostenrechnung dem Produkt angelastet werden. Das Produkt kostet damit umgerechnet 2,6 \$ pro kg.



In Abb. 32a ist das realisiert worden, was – wenn es technisch möglich ist – sehr häufig in den Unternehmen heutzutage umgesetzt wird: Recycling. Eine erste Möglichkeit wäre, den Abfall als Wertstoff extern zu verkaufen und damit die im Unternehmen entstandenen Kosten durch zusätzliche Erlöse zu verringern. Tatsächlich werden für viele Reststoffe, die früher teuer entsorgt wurden, heute hohe Preise gezahlt. Doch der Preis für den Reststoff ist niemals so hoch, wie der Rohstoff, den man ursprünglich eingekauft hat. Eine bessere Variante wäre deshalb das innerbetriebliche Recycling, wenn es aus technischen und werkstofflichen Gründen möglich

und aus Kostengründen vertretbar ist. Diese Situation trifft für viele Produktionsbetriebe tatsächlich zu.

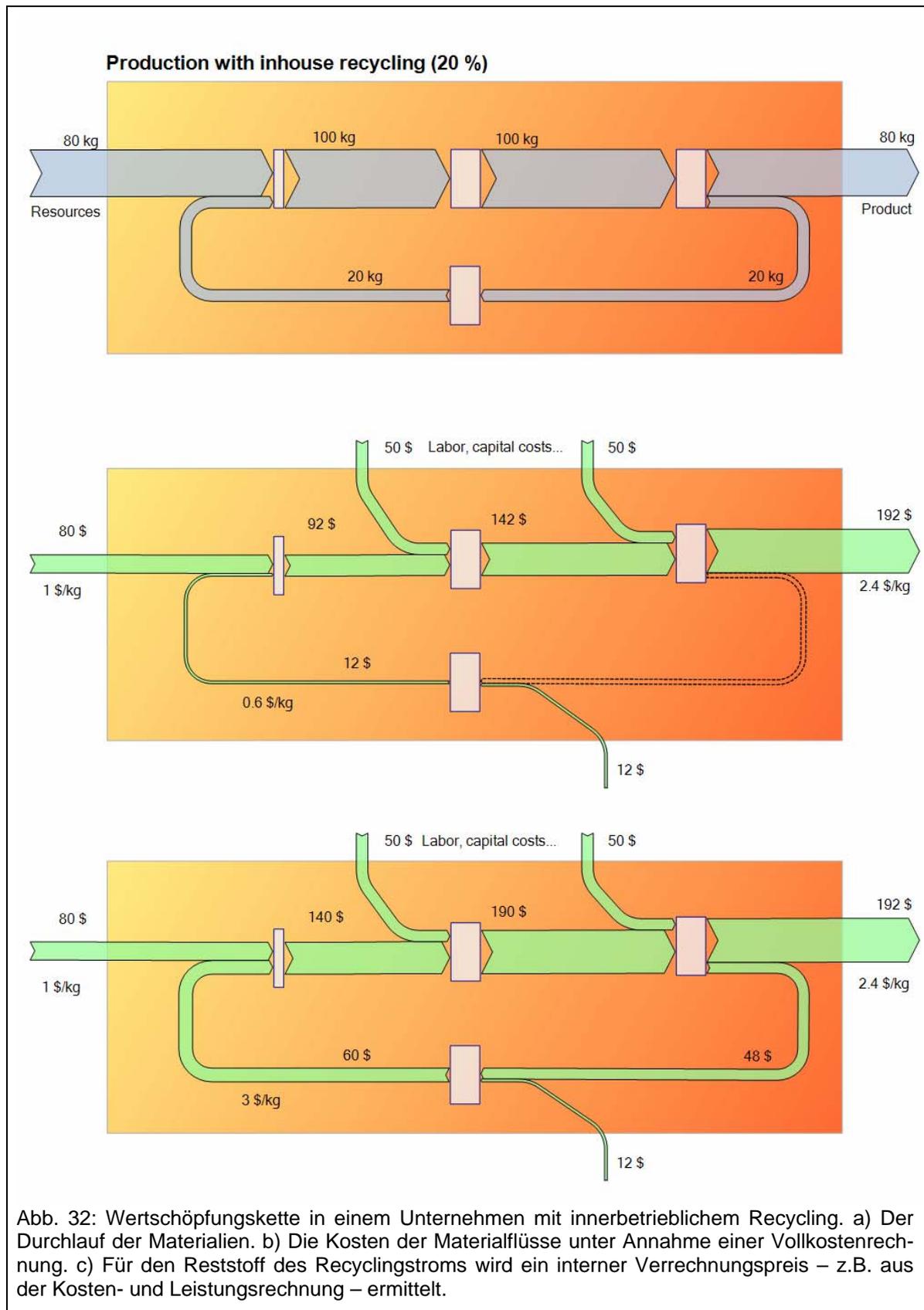


Abb. 32: Wertschöpfungskette in einem Unternehmen mit innerbetrieblichem Recycling. a) Der Durchlauf der Materialien. b) Die Kosten der Materialflüsse unter Annahme einer Vollkostenrechnung. c) Für den Reststoff des Recyclingstroms wird ein interner Verrechnungspreis – z.B. aus der Kosten- und Leistungsrechnung – ermittelt.

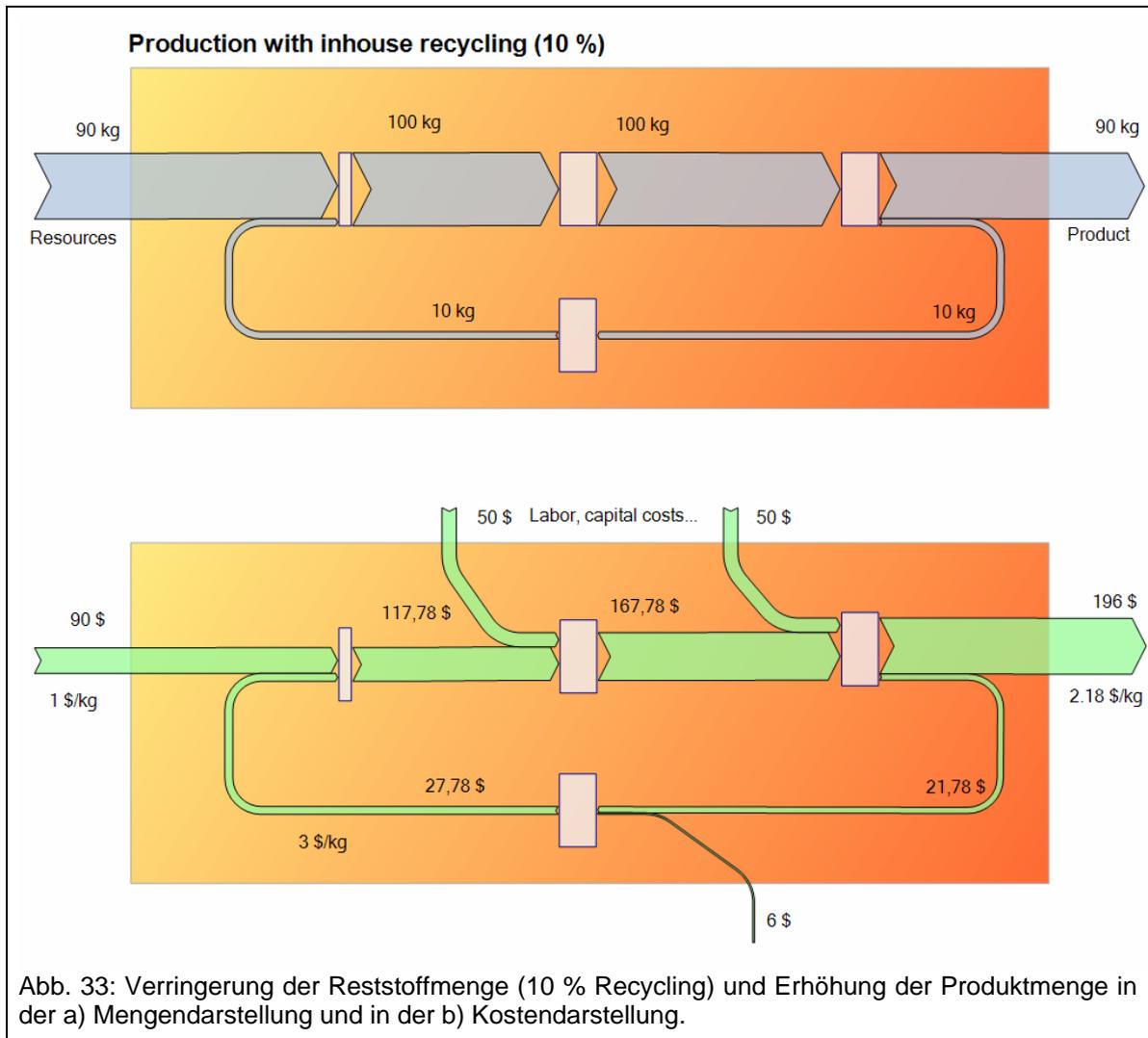
Der Reststoff wird dann quasi im Kreis gefahren und als Sekundärrohstoff der Produktionskette am Anfang wieder zugeführt. Ggf. muss der Reststoff noch geeignet aufbereitet werden. Er ersetzt nun aber den teuren Rohstoff. Damit werden nicht nur die angenommenen 0,4 \$/kg Entsorgungskosten gespart, sondern im Umlauf pro kg eingesparten Rohstoff ein weiterer Dollar - allerdings abzüglich der Aufbereitungskosten des Sekundärrohstoffs, die hier mit 0,6 \$/kg angesetzt wurden (Abb. 32b). In der Summe sinken die Kosten der Produktion auf 2,4 \$ pro kg Produkt, das sind fast 8 % weniger Kosten. Für viele Unternehmen sind diese wenigen Prozent oft schon entscheidend über Erfolg oder Misserfolg.

In Abb. 32c ist eine alternative Darstellung gewählt worden. Hier wurde so getan, als sei der Reststoff am Ende der Kette, der nicht als Produkt vermarktet wird, auch ein Zwischenprodukt mit einem Verrechnungspreis. Er „trägt“ die Rohstoffkosten, die er allerdings bei einem erneuten Durchlauf durch das System wieder vollständig ersetzt. Allerdings hat er durch die geleistete Arbeit eine zusätzliche Wertschöpfung erhalten, die beim Recycling vergebens war – diese Wertschöpfung wird beim Recycling des Wertstoffes quasi weggeschmissen und muss erneut aufgebracht werden, um ein Produkt herzustellen.

An diesem Beispiel ist der Verrechnungspreis des Reststoffes bemerkenswert: Er beträgt aufgrund der erfolgten Wertschöpfung im Unternehmen 3 \$/kg und liegt damit deutlich über dem Einkaufspreis des Rohstoffes, es handelt sich quasi um einen umsonst veredelten Rohstoff.

Was folgt aus diesen Zahlen? Die Antwort kann natürlich nicht lauten, statt des Recyclings den Reststoff wegzuschmeißen. Aber es stellt sich die Frage, ob es nicht eine bessere Möglichkeit gibt, Kosten zu sparen. Diese Antwort wird nicht von der Sankey-Darstellung mitgeliefert; sie hängt vom technischen System ab. Das Ziel muss es sein, möglichst wenig von der innerbetrieblichen Wertschöpfung zu vergeuden. Das kann erreicht werden, indem man z. B. den Recyclingkreislauf frühzeitig zu schließen versucht, vielleicht bereits nach der ersten Bearbeitungsstation. Das deutet auf die Selbstverständlichkeit hin, dass man so früh wie möglich Qualitätskontrollen durchführen sollte und fehlerhafte Teile gleich ausschleust. Oder man versucht, die Menge des Reststoffes zu reduzieren. Gelingt es beispielsweise, die Menge von 20

% Ausschuss auf 10 % zu reduzieren, so erhöht sich zwar wieder der Einsatz an Primärrohstoff, aber dafür nimmt die Ausbringungsmenge des Produktes zu (Abb. 33). Die spezifischen Kosten liegen dann nur noch bei 2,18 \$/kg, das sind 16 % weniger als ursprünglich ohne Recycling bzw. 9 % weniger gegenüber einem Recycling von 20 % Ausschuss.



Obwohl es sich bei diesen Betrachtungen um einfache Sachverhalte der effizienten Produktion und der Kostenrechnung handelt, werden sie von vielen Betrieben in der Praxis nicht beachtet. Rationalisierungsmaßnahmen setzen dann oft an weniger wichtigen Aspekten an. Mit den kostenbezogenen Sankey-Diagrammen können die Aspekte jedoch relativ schnell den Entscheidungsträgern verdeutlicht werden. Sie lenken den Fokus auf bestimmte, bisher vernachlässigte Zusammenhänge, ersetzen aber natürlich keine etablierte Kostenrechnung.

An dieser Stelle muss noch darauf hingewiesen werden, dass die ökonomische Bewertung der Stoffströme nur eine Möglichkeit unter vielen darstellt. Werden die Stoffströme einem anderen Bewertungsschema – z.B. einer ökologischen Bewertung – unterworfen, so können die Sankey-Diagramme auch diese darstellen, sofern es sich um kardinale und lineare Maßsysteme handelt. Eine Möglichkeit wäre z.B. die Darstellung der Treibhauswirksamkeit einer Produktion. In diesem Fall lautet die Frage nicht mehr, welche Kosten mit den Stoffströmen verbunden sind, sondern welchen Beitrag zum Treibhauseffekt in kg CO₂-Äquivalent geleistet wird. Statt der Kosten werden die CO₂-Rucksäcke eines eingekauften Vorproduktes oder Rohstoffes weitergereicht und zu den direkten CO₂-Emissionen des Unternehmens gezählt. Sie werden schließlich dem oder den Endprodukten angerechnet, wobei hier die gleichen Fragestellungen wie bei der Kostenrechnung auftauchen können: Welche CO₂-Emissionen verhalten sich proportional zu der Ausbringungsmenge eines Produktes, welche sind fix oder wie sinnvoll ist eine Zurechnung der Emissionen zu Kuppelprodukten.

4 Schlussfolgerung

Das eher beiläufig veröffentlichte Diagramm des Cpt. Riall Sankey diente vor über 100 Jahren der Veranschaulichung von Ineffizienzen bei Dampfmaschinen. Es hat sich seitdem immer wieder als probates Mittel erwiesen, um Ineffizienzen in ganz unterschiedlichen Produktionssystemen deutlich zu machen und entsprechende Analysen zu unterstützen. Als Zielgruppe sind dabei selten die Ingenieure und Fachexperten angesprochen, was wahrscheinlich auch der Grund dafür ist, dass man sich mit den scheinbar trivialen Sankey-Diagrammen in der Vergangenheit nie systematisch beschäftigt hat. Stattdessen ist die Zielgruppe meistens ein erweiterter Kreis von Menschen, die mit den Details der Systeme nicht vertraut sind und denen trotzdem die entscheidenden Zusammenhänge vermittelt werden sollen. Dazu zählen insbesondere die Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik.

Gerade weil Sankey-Diagramme eine mitunter große Bedeutung für Entscheidungsprozesse haben können, ist es sinnvoll, sich der Besonderheiten dieser speziellen Darstellung bewusst zu sein. Denn mit der Übertragung von technischen und wissenschaftlichen Sachverhalten in Diagramme fließen implizit Annahmen ein, die den

Betrachter bewusst oder unbewusst beeinflussen. Ein wichtiger Punkt ist z.B. die Frage der Bilanzierung oder der Darstellung von addierbaren Größen. Wird von diesen intuitiv angenommenen Regeln abgewichen, so sollte dies stets dazu gesagt werden, sonst können Fehlinterpretationen die Folge sein.

Beachtet man diese Besonderheiten, so können Sankey-Diagramme auch heute noch ein mächtiges Hilfsmittel sein, nicht nur im technischen Bereich, sondern – wie aufgezeigt wurde – auch im ökonomischen Bereich. Denn die Produktionsstrukturen und die technischen und wirtschaftlichen Verflechtungen werden immer komplexer und müssen übersichtlich und in ihrer ökonomischen und ökologischen Bedeutung treffend abgebildet werden. Genau hierin liegt die Stärke des Sankey-Diagramms: Es bedient sich der visuellen Darstellung von Verflechtungen in Systemen und ihrer „Kopplungsstärken“ und lenkt damit im wahrsten Sinne des Wortes den Blick auf das Wesentliche – trotz der Totalerfassung der Komplexität, d.h. aller Verflechtungen. Es kann als Ausgangspunkt für die angemessene Vereinfachung und Komplexitätsreduktion von Systemen dienen, z.B. durch Weglassen mengenmäßig vernachlässigbarer Verflechtungen oder durch die hierarchische Gliederung der Stoff- und Energieflüsse von Systemen, bei denen etwa ein Unternehmen im Extremfall nur noch als Black-Box betrachtet wird. Sankey-Diagramme können damit sowohl für Top-Down-Analysen als auch für Bottom-Up-Analysen unterstützend genutzt werden.

Ein interessantes Anwendungsfeld kann beispielsweise die Verfolgung von Stoff- und Energieflüssen in Unternehmen sein, bei denen jene Aspekte berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf die Produktivität oder Effizienz des Gesamtsystems haben. Gerade der Wechsel zwischen Gesamtsystem und Detailausschnitt sowie zwischen der Mengen- und der Wertebene liefert hier einen raschen und einsichtigen Erkenntnisgewinn. So könnte man die Sankey-Diagramme in ähnlichen Analysen nutzen, wie sie im Value Stream Mapping erfolgreich in Betrieben eingesetzt werden (Rother u. Shook 1998) und daraus eine Art „Material Stream Mapping“ mit einem weiten Einsatzfeld in der produzierenden Wirtschaft machen.

Quellen

- Anonymus (1926): Obituaries. JIEE Vol.64. p. 1210
- Anonymus (1926): Orbitury. Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Vol. 221, pp. 271-274
- Baccini, H., Bader, H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg
- Bansen, H. (1936): Metallurgische Aufgaben und Möglichkeiten zur Anpassung an die Rohstofflage. Stahl und Eisen. Vol. 56. Nr. 1, 1-10
- Bansen, H. (1937): Die Rohstofflage und Manganfrage in der Roheisenwirtschaft. Stahl und Eisen Vol. 57, Nr. 40, 1109-1114
- Cardwell, D. (1993): Steam Engine Theory in the 19th Century; from Duty to Thermal Efficiency; from Parkes to Sankey. In: Transactions of the Newcomen Society. Vol. 65, London. pp. 117-128
- Cardwell, D. (1995): Wheels, Clocks, and Rockets. A History of Technology. New York.
- Christensen, S.G. (1990): Lamb`s Questions and Answers on the Marine Diesel Engine. Oxford.
- Goerens, P. (1935): Grundsätzliche Fragen der Rohstoffbewirtschaftung. Beiheft „Technik ist Dienst am Volke“. Z. VDI, S. 11-20
- Güldner, H. (1913): Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgas-Anlagen. 3. Aufl. Berlin
- Heinrich, F. (1937): Die Aufarbeitung von Putzwolle in Hüttenwerken. Stahl und Eisen Vol. 57, Nr. 38. 1048-1051
- Houdremont, E. (1938): Einige Aufgaben der Metallurgie, ihre nationale und internationale Bedeutung. Stahl und Eisen Vol. 58, Nr. 44, 1185-1199
- Kölbel, H., Schulze, J. (1960): Projektierung und Vorkalkulation in der chemischen Industrie. Berlin/ Göttingen/ Heidelberg
- Leontief, W. (1985): The Choice of Technology. Scientific American, Vol. 252, No. 6, S. 25-33
- Matejka, E. (1937): Planmäßige Stoffwirtschaft auf Eisenhüttenwerken. Stahl und Eisen Vol. 57, Nr. 13, S. 341-348
- Minister of Fuel and Power (1944): The efficient use of fuel. A text-book on fuels and their efficient utilisation for the use of students and technical men in industry. Published by his Majesty`s Stationery Office. London
- Möller, A., Rolf, A. (1995): Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen. In: Schmidt, M. u. Schorb, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin/Heidelberg pp.33-58
- Möller, A. (2000): Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Bochum
- Pople, S. (2001): AS & A Level Physics through diagrams. Oxford.

- Reichardt, P. (1937): Rohstofflage, Roheisen- und Stahl-Sortenfrage. Stahl und Eisen Vol. 57, Nr. 40. S. 1104-1109.
- Riebel, P. (1994): Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung. 7. Aufl. Wiesbaden
- Riedler, A. (1911): Wissenschaftliche Automobil-Wertung. Berichte I-V ds Laboratoriums für Kraftfahrzeuge an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin. Berlin/München
- Riedler, A. (1913): Das Maschinen-Zeichnen. Begründung und Veranschaulichung der sachlich notwendigen zeichnerischen Darstellung und ihres Zusammenhanges mit der praktischen Ausführung. 2. Aufl. Berlin
- Rother, M., Shook, J. (1998): Learning to See – Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda. Cambridge
- Rummel, K. (1936): Der Einfluß betriebswirtschaftlicher Gedankengänge auf die Stoffwirtschaft. Stahl und Eisen Vol. 56, Nr. 8, S. 221-228
- Sankey, H. R. (1896): The Thermal Efficiency of Steam-Engines. M.P.I.C.E. Vol. 125, pp. 182-242
- Sankey, H. R. (1898): Introductory Note on the Thermal Efficiency of Steam-Engines. Report of the Committee appointed on the 31st March, 1896, to Consider and Report to the Council upon the Subject of the Definition of a Standard or Standards of Thermal Efficiency for Steam-Engines: with an Introductory Note. Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Vol. 134, 1898 Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Vol. 134. p. 278 – 283. incl. Plate 5.
- Sankey, H. R. (1995): The Maps of the Ordnance Survey: a mid-Victorian view. Originally published in 1888 in Engineering, a weekly illustrated journal. Charles Close Society London
- Schmidt, H. (1936): Grundsätzliche Fragen zur Rohstoffbewirtschaftung. Eisen und Stahl Vol. 56, Nr. 1, S. 14-15.
- Schmidt, M., Keil, R. (2002): Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kostentransparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung betrieblicher Stoffströme. Beiträge der Hochschule Pforzheim Nr. 103
- Schmidt, M. (2005): A production-theory-based framework for analysing recycling systems in the e-waste sector. Environmental Impact Assessment Review 25, S. 505-524
- Schneider, D. (1999): Geschichte der Betriebswirtschaftslehre. In: Lingenfelder, M. (Hrsg.): 100 Jahre Betriebswirtschaftslehre in Deutschland 1898-1998. München. S. 1- 29
- Schnitzer, H. (1991): Grundlagen der Stoff- und Energiebilanzierung. Braunschweig
- Schott, E. (1933): Wärmewirtschaft in der Zementindustrie. Die Wärme 45. S. 736-741
- Schott, E. (1954): Arbeiten über Zement und Zementherstellung. Portland-Zementwerke Heidelberg-Mannheim
- Springorum, F. (1936): Technical Developments in German Iron and Steel Production during the last fifteen Years. Stahl und Eisen, Vol. 56, Nr. 38, 1042-1063

- Strebel, H. (2003): Kritische Würdigung der Umweltkosten- und Stoffflusskostenrechnung. In: Kramer, M. u. Eifler, P. (Hrsg.): Umwelt- und kostenorientierte Unternehmensführung. Wiesbaden S.155-166
- Tafel, W. (1924): Wärme und Wärmewirtschaft der Kraft- und Feuerungsanlagen in der Industrie. München/Berlin
- Trier, W. (1992): Entwicklung der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) und der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft (DGG). Teil 1. Von 1920/22 bis 1985. Glastechn. Ber. 65, 4, S.112-127
- Vdl – Verein deutscher Ingenieure (1908): Rundschau. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure S. 2016 – 2019
- Wagner, B., Strobel, M. (1999): Kostenmanagement mit Flusskostenrechnung. In: Freimann, J. (Hrsg.): Werkzeuge erfolgreichen Umweltmanagements – ein Kompendium für die Unternehmenspraxis, Wiesbaden. S. 49-70
- Warczewski, Z. (1937): Stoff- und Lagerwirtschaft auf Eisenhüttenwerken. Hutnik Vol. 9, S. 26-31. (auf Polnisch)
- Wärmestelle Düsseldorf (1925): Anhaltzahlen für den Energieverbrauch in Eisenhüttenwerken. Verein Deutscher Eisenhüttenleute 2. Aufl. Düsseldorf
- Wärmestelle Düsseldorf (1931): Anhaltzahlen für den Energieverbrauch in Eisenhüttenwerken. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. 3. Aufl. Düsseldorf
- Wärmestelle Düsseldorf (1957): Anhaltzahlen für die Wärmewirtschaft in Eisenhüttenwerken. Herausgegeben von der Energie- und Betriebswirtschaftsstelle des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute. 5. Aufl. Düsseldorf

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

- | | |
|--|---|
| <p>52. Werner Pepels Aug. 1990
Integrierte Kommunikation</p> <p>53. Martin Dettinger-Klemm Aug. 1990
Grenzen der Wissenschaftsfreiheit. Überlegungen zum Thema: Freiheit und Verantwortung des Wissenschaftlers</p> <p>54. Werner Pepels Sept. 1990
Mediaplanung – Über den Einsatz von Werbegeldern in Medien</p> <p>55. Dieter Pflaum Sept. 1990
Werbeausbildung und Werbemöglichkeiten in der DDR</p> <p>56. Rudi Kurz (Hrsg.) Nov. 1990
Ökologische Unternehmensführung – Herausforderung und Chance</p> <p>57. Werner Pepels Jan. 1991
Verkaufsförderung – Versuch einer Systematisierung</p> <p>58. Rupert Huth, Ulrich Wagner (Hrsg.) Aug. 1991
Volks- und betriebswirtschaftliche Abhandlungen. Prof. Dr. Dr. h.c. Tibor Karpati (Universität Osijek in Kroatien) zum siebzigsten Geburtstag. Mit einem Vorwort von R. Huth und Beiträgen von H.-J. Hof, H. Löffler, D. Pflaum, B. Runzheimer und U. Wagner</p> <p>59. Hartmut Eisenmann Okt. 1991
Dokumentation über die Tätigkeit einer Industrie- und Handelskammer – Dargestellt am Beispiel der IHK Nordschwarzwald</p> <p>60. Ursula Hoffmann-Lange Dez. 1991
Eliten und Demokratie: Unvereinbarkeit oder notwendiges Spannungsverhältnis?</p> <p>61. Werner Pepels Dez. 1991
Elemente der Verkaufsgesprächsführung</p> <p>62. Wolfgang Berger Dez. 1991
Qualifikationen und Kompetenzen eines Europa-managers</p> <p>63. Günter Staub Jan. 1992
Der Begriff „Made in Germany“ – Seine Beurteilungskriterien</p> <p>64. Martin W. Knöll, Hieronymus M. Lorenz Mai 1992
Gegenstandsbereich und Instrumente der Organisationsdiagnose im Rahmen von Organisationsentwicklungs (OE)-Maßnahmen</p> <p>65. Werner Lachmann Juni 1992
Ethikversagen – Marktversagen</p> <p>66. Paul Banfield Juni 1993
Observations On The Use Of Science As A Source Of Legitimation In Personnel Management</p> <p>67. Bernd Noll Aug. 1993
Gemeinwohl und Eigennutz. Wirtschaftliches Handeln in Verantwortung für die Zukunft – Anmerkungen zur gleichnamigen Denkschrift der Evangelischen Kirche in Deutschland aus dem Jahre 1991</p> <p>68. Siegfried Kreutzer, Regina Moczadlo Aug. 1993
Die Entdeckung der Wirklichkeit – Integrierte Projektstudien in der Hochschulausbildung</p> | <p>69. Sybil Gräfin Schönfeldt Aug. 1993
Von Menschen und Manieren. Über den Wandel des sozialen Verhaltens in unserer Zeit. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1992/93</p> <p>70. Hartmut Löffler Dez. 1993
Geld- und währungspolitische Grundsatzüberlegungen für ein Land auf dem Weg zur Marktwirtschaft – Das Beispiel Kroatien</p> <p>71. Hans-Georg Köglmayr, Kurt H. Porkert Nov. 1994
Festlegen und ausführen von Geschäftsprozessen mit Hilfe von SAP-Software</p> <p>72. Alexa Mohl Febr. 1995
NLP-Methode zwischen Zauberei und Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1994/95</p> <p>73. Bernd Noll Mai 1995
Marktwirtschaft und Gerechtigkeit: Anmerkungen zu einer langen Debatte</p> <p>74. Rudi Kurz, Rolf-Werner Weber Nov. 1995
Ökobilanz der Hochschule Pforzheim. 2. geänderte Auflage, Jan. 1996</p> <p>75. Hans Lenk Mai 1996
Fairneß in Sport und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1995/96</p> <p>76. Barbara Burkhardt-Reich, Hans-Joachim Hof, Bernd Noll Juni 1996
Herausforderungen an die Sozialstaatlichkeit der Bundesrepublik</p> <p>77. Helmut Wienert März 1997
Perspektiven der Weltstahlindustrie und einige Konsequenzen für den Anlagenbau</p> <p>78. Norbert Jost Mai 1997
Innovative Ingenieur-Werkstoffe</p> <p>79. Rudi Kurz, Christoph Hubig, Ortwin Renn, Hans Diefenbacher Sept. 1997
Ansprüche in der Gegenwart zu Lasten der Lebenschancen zukünftiger Generationen</p> <p>80. Björn Engholm Okt. 1997
Ökonomie und Ästhetik. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97. 2. geänderte Auflage, Jan. 1998</p> <p>81. Lutz Goertz Sept. 1998
Multimedia quo vadis? – Wirkungen, Chancen, Gefahren. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97</p> <p>82. Eckhard Keßler Nov. 1998
Der Humanismus und die Entstehung der modernen Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97</p> <p>83. Heinrich Hornef Febr. 1998
Aufbau Ost – Eine Herausforderung für Politik und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1997/98</p> |
|--|---|

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

- | | |
|---|---|
| <p>84. Helmut Wienert Juli 1998
50 Jahre Soziale Marktwirtschaft – Auslaufmodell oder Zukunftskonzept? Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 1998</p> | <p>Peter Kern, Wilhelm Bauer, Rolf Ilg; Heiko Dreyer; Johannes Wößner und Rainer Menge</p> |
| <p>85. Bernd Noll Sept. 1998
Die Gesetzliche Rentenversicherung in der Krise</p> | <p>100. Urban Bacher, Mikolaj Specht Dez. 2001
Optionen – Grundlagen, Funktionsweisen und deren professioneller Einsatz im Bankgeschäft</p> |
| <p>86. Hartmut Löffler Jan. 1999
Geldpolitische Konzeptionen - Alternativen für die Europäische Zentralbank und für die Kroatische Nationalbank</p> | <p>101. Constanze Oberle Okt. 2001
Chancen, Risiken und Grenzen des M-Commerce</p> |
| <p>87. Erich Hoppmann Juni 1999
Globalisierung. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 1999</p> | <p>102. Ulrich Wagner Jan. 2002
Beschäftigungshemmende Reformstaus und wie man sie auflösen könnte
Jürgen Volkert
Flexibilisierung durch Kombi-Einkommen? Die Perspektive der Neuen Politischen Ökonomie</p> |
| <p>88. Helmut Wienert (Hrsg.) Dez. 1999
Wettbewerbspolitische und strukturpolitische Konsequenzen der Globalisierung. Mit Beiträgen von Hartmut Löffler und Bernd Noll</p> | <p>103. Mario Schmidt, René Keil März 2002
Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kostentransparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung betrieblicher Stoffströme</p> |
| <p>89. Ansgar Häfner u.a. (Hrsg.) Jan. 2000
Konsequenzen der Globalisierung für das internationale Marketing. Mit Beiträgen von Dieter Pflaum und Klaus-Peter Reuthal</p> | <p>104. Kurt Porkert Mai 2002
Web-Services – mehr als eine neue Illusion?</p> |
| <p>90. Ulrich Wagner Febr. 2000
Reform des Tarifvertragsrechts und Änderung der Verhaltensweisen der Tarifpartner als Voraussetzungen für eine wirksame Bekämpfung der Arbeitslosigkeit</p> | <p>105. Helmut Wienert Juni 2002
Der internationale Warenhandel im Spiegel von Handelsmatrizen</p> |
| <p>91. Helmut Wienert April 2000
Probleme des sektoralen und regionalen Wandels am Beispiel des Ruhrgebiets</p> | <p>106. Robert Wessolly, Helmut Wienert Aug. 2002
Die argentinische Währungskrise</p> |
| <p>92. Barbara Burkhardt-Reich Nov. 2000
Der Blick über den Tellerrand – Zur Konzeption und Durchführung eines „Studium Generale“ an Fachhochschulen</p> | <p>107. Roland Wahl (Hrsg.) Sept. 2002
Technik-Forum 2001: Weiterentwicklungen an Umformwerkzeugen und Walzdrähten. Mit Beiträgen von Roland Wahl, Thomas Dolny u.a., Heiko Pinkawa, Rainer Menge und Helmut Wienert</p> |
| <p>93. Helmut Wienert Dez. 2000
Konjunktur in Deutschland - Zur Einschätzung der Lage durch den Sachverständigenrat im Jahresgutachten 2000/2001</p> | <p>108. Thomas Gulden April 2003
Risikoberichterstattung in den Geschäftsberichten der deutschen Automobilindustrie</p> |
| <p>94. Jürgen Wertheimer Febr. 2001
Geklonte Dummheit: Der infantile Menschenpark. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 2000/01</p> | <p>109. Günter Altner Mai 2003
Lasset uns Menschen machen – Der biotechnische Fortschritt zwischen Manipulation und Therapie. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003</p> |
| <p>95. Konrad Zerr März 2001
Erscheinungsformen des Online-Research – Klassifikation und kritische Betrachtung</p> | <p>110. Norbert Jost (Hrsg.) Juni 2003
Technik-Forum 2002: Innovative Verfahren zur Materialoptimierung. Mit Beiträgen von Norbert Jost, Sascha Kunz, Rainer Menge/Ursula Christian und Berthold Leibinger</p> |
| <p>96. Daniela Kirchner April 2001
Theorie und praktische Umsetzung eines Risikomanagementsystems nach KontraG am Beispiel einer mittelständischen Versicherung</p> | <p>111. Christoph Wüterich Februar 2004
Professionalisierung und Doping im Sport. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003</p> |
| <p>97. Bernd Noll Mai 2001
Die EU-Kommission als Hüterin des Wettbewerbs und Kontrolleur von sektoralen und regionalen Beihilfen</p> | <p>112. Sabine Schmidt Mai 2004
Korruption in Unternehmen – Typologie und Prävention</p> |
| <p>Peter Frankenfeld
EU Regionalpolitik und Konsequenzen der Osterweiterung</p> | <p>113. Helmut Wienert August 2004
Lohn, Zins, Preise und Beschäftigung – Eine empirische Analyse gesamtwirtschaftlicher Zusammenhänge in Deutschland</p> |
| <p>98. Hans Joachim Grupp Juni 2001
Prozessurale Probleme bei Beschlussmängelstreitigkeiten in Personengesellschaften</p> | <p>114. Roland Wahl (Hrsg.) Sept. 2004
Technik-Forum 2003: Materialentwicklung für die Kaltumformtechnik. Mit Beiträgen von Andreas Baum, Ursula Christian, Steffen Nowotny, Norbert Jost, Rainer Menge und Hans-Eberhard Koch</p> |
| <p>99. Norbert Jost (Hrsg.) Juli 2001
Technik Forum 2000: Prozessinnovationen bei der Herstellung kaltgewalzter Drähte. Mit Beiträgen von</p> | <p>115. Dirk Wenzel Nov. 2004
The European Legislation on the New Media: An Appropriate Framework for the Information Economy?</p> |

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

116. **Frank Morelli, Alexander Mekska, Stefan Mühlberger** Dez. 2004
Produkt- und prozessorientiertes Controlling als Instrument eines erfolgreichen Informationstechnologie-Managements
117. **Stephan Thesmann, Martin Frick, Dominik Konrad** Dez. 2004
E-Learning an der Hochschule Pforzheim
118. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2005
Technik-Forum 2004: Innovative Werkstoffaspekte und Laserbehandlungstechnologien für Werkzeuge der Umformtechnik
119. **Rainer Gildeggen** Juni 2005
Internationale Produkthaftung
120. **Helmut Wienert** Oktober 2005
Qualifikationsspezifische Einkommensunterschiede in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Universitäts- und Fachhochschulabsolventen
121. **Andreas Beisswenger, Bernd Noll** Nov. 2005
Ethik in der Unternehmensberatung – ein verminntes Gelände?
122. **Helmut Wienert** Juli 2006
Wie lohnend ist Lernen? Ertragsraten und Kapitalendwerte von unterschiedlichen Bildungswegen
123. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2006
Technik-Forum 2005: Umformwerkzeuge - Anforderungen und neue Anwendungen. Mit Beiträgen von Edmund Böhm, Eckhard Meiners, Andreas Baum, Ursula Christian und Jörg Menno Harms
124. **Mario Schmidt** Dez. 2006
Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge
