

**VOM THERMODYNAMISCHEN KREISPROZEß ZUM RECYCLINGGERECHTEN
KONSTRUIEREN: KREISLAUFMETAPHERN UND LEITBILDER DER
RESSOURCENSCHONUNG IN DER GESCHICHTE DER KONSTRUKTION**

Hans Dieter Hellige

Erschienen in: Wilfried Müller (Hrsg.) Der ökologische Umbau der Industrie. Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Umweltforschung, Münster, Hamburg 1995, S. 73-109

ÜBERBLICK

Die jetzt vieldiskutierten Ansätze für das recyclinggerechte Konstruieren und Wirtschaften sind weder eine Erfindung der jüngsten Zeit noch Ergebnis eines kontinuierlichen, kumulativen Lernprozesses. Die Anfänge von Ressourcenschonungs-Leitbildern in der Allgemeinen Technologie und in der Konstruktionslehre gehen bereits auf die Mitte des vorigen Jahrhunderts zurück. Der folgende Beitrag schildert die im wesentlichen engpaß- und krisen-gesteuerten Wellen der Aufmerksamkeit der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz für energetische, materialschonende und ökologische Gestaltungskriterien. Da die Geschichte des Konstruierens trotz einer Reihe von Studien in den letzten Jahren noch wenig aufgearbeitet ist, dienen vor allem Konstruktionslehren sowie allgemein-technologische und konstruktionsmethodische Aufsätze in Fachzeitschriften von Ingenieuren und Konstrukteuren als Zugang zur Problematik.¹

¹ Eine wesentlich veränderte Version dieses Beitrags, die, bei gleichem Argumentationsgang, sich auf die universalhistorische Perspektive konzentriert und die Geschichte bis in die 20er Jahre stärker herausarbeitet, erschien unter dem Titel: Wirtschafts-, Energie- und Stoffkreisläufe in säkularer Perspektive: Von der thermodynamischen Entzauberung der Welt zur recyclingorientierten Wachstumsgesellschaft, in: J. Osterhammel, G. Hübinger, E. Pelzer (Hrsg.), Universalgeschichte und Nationalgeschichten, Freiburg 1994, S. 291-315.

1. DIE ENTDECKUNG DER ENDLICHKEIT VON ENERGIE- UND STOFFKREISLÄUFEN DURCH DIE THERMODYNAMIK

Ressourcenschonung und ökologische Aspekte sind erst sehr spät bewußte Kriterien der Allgemeinen Technologie und der Konstruktionslehre geworden. Seit Beginn einer elaborierten Konstruktionslehre um 1850 stand fast ausschließlich die Produktgenerierung bis zur Fertigung im Mittelpunkt. Das Ziel war allein die kontrollierte Gewinnung von Wirkprinzipien und die Sicherstellung der Funktionalität des technischen Konstrukts. Der Fertigungsprozeß und alle späteren Phasen des Produktlebenszyklus waren noch kein Gegenstand prinzipieller konstruktionswissenschaftlicher Reflexion. Zwar gab es im Laufe der industriellen Entwicklung eine Fülle von einzelnen technischen Lösungen für eine Weiterverwendung von zuvor besonders umweltschädlichen Abfallprodukten wie beispielsweise von chemischen Reststoffen, Teer und Metallschrott. Doch erfolgten diese Verbesserungen in der Regel erst nachträglich im Gefolge schwerer Mißstände und Engpässe. Generell war das Bewußtsein für ökologische Zusammenhänge und für die Endlichkeit von Energie- und Materialressourcen in der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz noch schwach entwickelt. Die industrielle Produktivkraftentwicklung schien ja gerade die Begrenztheit der agrarwirtschaftlichen bzw. vorindustriellen Ressourcenbasis für immer überwunden und damit die Niedergangsprophetien des Malthusianismus widerlegt zu haben.

In der Ökonomie fand diese Denkweise ihren Niederschlag in der Vorstellung eines säkularen Wirtschaftswachstums, das aus immer wiederkehrenden, sich selbst regulierenden Umläufen von Güter- und Geldströmen entsteht. Die bereits 1758 von Francois Quesnai im "Tableau économique" nach dem Vorbild des Harveyschen Blutkreislaufes in die Nationalökonomie eingeführte Kreislaufmetapher wurde das Sinnbild dieser Erwartungen in die Permanenz, die Selbstregulierungsfähigkeit und das sich dadurch immer wiederherstellende Gleichgewicht des volkswirtschaftlichen Prozesses. Teils bewußt, teil unbewußt wurde auch in der Folgezeit die ökonomische Theorie nach dem Muster reversibler Prozesse der Newtonschen Mechanik modelliert.

Seit dem 1. Viertel des 19. Jahrhunderts tauchte das Kreislaufmodell auch in der Physik auf und suggerierte hier ebenfalls die Vorstellung permanenter Verfügbarkeit und Wiederholbarkeit mechanischer und energetischer Prozesse. Doch führte die durch Sadi Carnots 1824 erschienenes Hauptwerk ausgelöste theoretische Erörterung von Idealmodellen von Kraft-Wärme-Umwandlungen hier zu der Erkenntnis, daß reversible Kreisprozesse definitiv Grenzfälle sind, wohingegen alle realen, mit Wärmeleitung, Strahlung und Reibung verbundenen Vorgänge irreversibler Natur sind, und die Rückkehr in den ursprünglichen Zustand jeweils nur

durch eine Energiekompensation aus der Umgebung möglich ist. (Helmholtz, Vorlesungen, S. 250 ff.) Im Zusammenhang mit der Formulierung der ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik um 1850 wurde dann das scheinbare Paradoxon herausgearbeitet, daß aufgrund des ersten, des "Erhaltungssatzes" die Energie des Universums zwar konstant bleibt, daß jedoch aufgrund des zweiten, des sogenannten Entropiesatzes, der Bestand arbeitsfähiger Ressourcen ständig abnimmt (Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft).

Bei Natur- und Ingenieurwissenschaftlern wurde, wie Rudolf Clausius feststellte, vor allem der "Erhaltungssatz" rezipiert und als "gewichtige Bestätigung" der Ansicht gewertet, "nach welcher der ganze Zustand des Weltalls unveränderlich und im ewigen Kreislaufe begriffen sein soll". Dagegen werde der Entropiesatz "zuweilen ganz mit Stillschweigen übergangen". Clausius versuchte deshalb, durch möglichst verständliche Formulierungen das Bewußtsein dafür zu wecken, "daß ein Naturgesetz aufgefunden ist, welches mit Sicherheit schließen läßt, daß in der Welt nicht alles Kreislauf ist, sondern daß sie ihren Zustand fort und fort in einem gewissen Sinne ändert und so einem Grenzzustande zustrebt" (Clausius, Über den zweiten Hauptsatz, S.17). Doch er hatte damit nur geringen Erfolg, die weitreichende Bedeutung der Hauptsätze der Thermodynamik für den Bestand und die langfristige Verfügbarkeit von Energieressourcen wurde von Ingenieuren meist verkannt oder verdrängt. Die energie- und rohstoffpolitischen Folgerungen, die Franz Grashof und Clausius selbst aus dem Theoriegebäude der Thermodynamik zogen, blieben eher die Ausnahme. Der langjährige VDI-Direktor Franz Grashof hatte 1877 den verschwenderischen Kohlenraubbau gerügt und einen schonenden Umgang mit den Energieressourcen vor allem durch "Gleichgewichts- und Kreislauftechniken" gefordert, die die auf der Welt insgesamt konstante Arbeitsmenge nur immer wieder nutzbringend umschichten" sollten.² Damit erhielt die Kreislaufmetapher bei ihm eine neue Bedeutung: anstelle der Permanenz und des Überflusses ewiger Kreisprozesse drückte sie nun die Notwendigkeit des Haushaltens mit den endlichen Naturvorräten aus. Der Kreislauf wurde zum kritischen Gegenmodell gegenüber exponentiellen Wachstumserwartungen und zum technikethischen Imperativ gegen die Verschleuderung der Natur, die nun ihrerseits als ein "Haushalt" erscheint, in dem Güterknappheit herrscht.

Auch Clausius kritisierte in der Rektoratsrede von 1885 aus der Sicht der "mechanischen Wärmetheorie" den sorglosen Umgang mit der Kohleenergie: "Diese verbrauchen wir nun, und verhalten uns dabei ganz wie lachende Erben, welche eine reiche Hinterlassenschaft verzehren. Es wird aus der Erde heraufgeschafft, so viel sich durch Menschenkraft und technische Hilfsmittel nur irgend heraufschaffen läßt, und das wird verbraucht, als ob es uner-

² F. Grashof, Über die Wandlungen des Arbeitsvermögens im Haushalt der Natur und der Gewerbe, Berlin 1877, zit. nach Dienel, Herrschaft über die Natur? S.96.

schöpftlich wäre." (Clausius, Über die Energievorräte der Natur, S. 329). Er warnte vor der leichtfertigen Hoffnung, man werde schon "neue Mittel zur Wärmeerzeugung" erfunden haben, bevor die Steinkohlenlager erschöpft seien, so daß man sich darüber keine Sorge zu machen brauche", und forderte stattdessen, den Energiebedarf künftig so weit wie möglich mit regenerativen Energiequellen zu decken, insbesondere mit elektrisch übertragener Wasserkraft. So führte die physikalische Theoriebildung auf dem Gebiet der Thermodynamik zu einer energetischen "Entzauberung der Welt". Die Illusion ewiger reversibler Kreisläufe in Natur, Technik und Wirtschaft wurde zerstört und durch die Historizität eines endlichen entropischen Strom von Energie und Materie abgelöst. Die Entropie wurde zum Maß der nicht mehr verfügbaren Ressourcen, aus ihr ergab sich die Verpflichtung, alle "Arbeitsvorräte, welche in der Welt existieren", als flüchtig und vergänglich zu betrachten und entsprechend zu behandeln (Helmholtz, Vorlesungen, S. 251).³

2. DIE ANFÄNGE VON RESSOURCENSCHONUNGS-PROGRAMMEN IN DER "ENERGETISCHEN BEWEGUNG" BIS ZUM ERSTEN WELTKRIEG

Die Rufe von ressourcenbewußten Physikern und Ingenieuren verhallten jedoch, wie es die späteren Klagen der Wärmewirtschaftler über den verschwenderischen Umgang mit den Energieträgern bezeugen, weitgehend ungehört. Die Erschließung immer neuer Rohstoffvorkommen und Kraftquellen im Inland und vor allem in den Kolonien ließ die energiebewußten Thermodynamiker als "hypochondrische Rechner" erscheinen (M. M. v. Weber, S.451-474). Obwohl die örtlichen und die stofflichen Verlagerungsstrategien, also die Aneignung von Energie- und Materialressourcen aus immer entfernteren Regionen bzw. die Substitution der zur Neige gehenden Stoffe durch neue, den Entropie-vermehrenden Charakter der Naturausbeutung bestätigten, wurden sie immer wieder als dessen Widerlegung gewertet. Erst seit dem Ende des 19. Jahrhunderts kam es mit dem Entstehen der "energetischen Bewegung" zu einer breiteren Rezeption ressourcenschonender Ansätze in der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz. Initiiert wurde diese Bewegung vor allem von dem Chemophysiker und Multitalent Wilhelm Ostwald. Dieser verknüpfte die von der Physik herkommenden Appelle zur Ressourcenschonung im Energiebereich mit holistischen Strömungen in der Biologie, insbesondere mit Ernst Haeckels monistischer Lehre.

³ Vgl. allgemein hierzu Martinez-Alier, Ökologische Ökonomie, S. 50 f.; ders., Schlüpmann, Ecological Economics, S.73-88.

Ostwalds eigene monistischen Anschauungen sahen das gemeinsame "Fundamentalphänomen alles Geschehens in der Welt" in "Dissipations-Gesetzen der Energie" und damit in der Notwendigkeit, durch eine Verbesserung des Wirkungsgrades mit dem allseits "eng bemessenen Energievorrat" zu haushalten (Ostwald, Der energetische Imperativ, S. 258-281). Das von ihm erkannte natürliche Grundprinzip "der Verbesserung des Nutzeffektes" wollte er auch zum verbindlichen Maßstab für das ethische und wirtschaftliche Handeln erheben. Wissenschaft, Technik und Wirtschaft sollten sich bewußt dem gleichen Grundgedanken der energiebasierten "Denk- und Lebensökonomie" unterwerfen wie auch die "Staatsmaschine mit tunlichst geringer Reibung" unnötige Energievergeudung zu vermeiden habe: "Der ökonomische Koeffizient der Energietransformation ist so wirklich der allgemeine Maßstab menschlicher Angelegenheiten." (Ostwald, Die Energie, S. 165 f.). Ostwald gelangte so zu einem normativem Leitbild einer "dauerhaften Wirtschaft", eines Vorläufers der "Sustainable economy". Kurz nach 1900 brachte er sein energieökologisches Weltbild in Anlehnung an Kants Kategorischen Imperativ auf die Kurzformel des "Energetischen Imperativs": "Vergeude keine Energie, sondern nutze sie!" (Ostwald, Der energetische Imperativ, S.13). Aus der bloßen Infragestellung des gesellschaftlichen Umgangs mit den Naturressourcen durch die Thermodynamiker war so eine energiezentrische Technikethik mit einem hohen Verbindlichkeitsgrad und der Tendenz zu einer technokratischen Totalkonstruktion der Welt entstanden.

Die von Ostwald initiierte "Energetische Bewegung", die anfangs nur von einem kleinen Kreis monistischer Ingenieure und Naturwissenschaftler getragen wurde, fand nach dem "Kohlennot-Alarm" von 1900, einer hochkonjunkturbedingten massiven Kohlenknappheit, erstmals eine größere Resonanz (Radkau, S. 285-299). Das Wirkungsgraddenken verbreitete sich schlagartig in der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz, es entstanden die energiereformerischen Bewegungen der "Wärmewirtschaftler" und die Kraft-Wärme-Kopplung, die durch eine lokale Prozeßintegration den Nutzwert der verwendeten Energieträger deutlich erhöhte. Bereits 1908 schrieb Ludwig Brinkmann in seiner Monographie über den Ingenieur: "Das Charakteristikum des Ingenieurs ist die energetische Weltauffassung". (Brinkmann, S. 16). Dabei wurde nun auch der Arbeitsprozeß in die energetischen Rationalisierungs- und Sparstrategien mit einbezogen. Aus dem Monismus, der Energetik und dem Taylorismus entstand vor dem Ersten Weltkrieg eine progressiv-technokratische Ingenieurbewegung, die sich z.T. auch kritisch gegen das Management und "die Kaufleute" in den Unternehmungsleitungen richtete und latent antikapitalistisch war. Ziel dieser Bewegung war der Kampf gegen jegliche Vergeudung von Energie-, Material- und Arbeitsressourcen in der Gesamtwirtschaft.

Auf der Grundlage des "Energetischen Imperativs" entwarf Walter Ostwald, ein Technikjournalist im Dienste der Ideen seines Vaters, im Jahre 1913 die Grundstruktur einer "Ökonomik

der Technik", die bereits viele Prinzipien ökologischer Technikgestaltung in nuce enthielt (Walter Ostwald, S.126-132). Die "Zeitliche Ökonomik" sollte sich um die angemessene Lebensdauer und die kürzeste Herstellungszeit der Produkte kümmern. Die "Räumliche Ökonomik" zielte auf eine Reduzierung des erforderlichen Raumbedarfes wie die "Gewichtsökonomik" den Transportaufwand kalkulieren und einschränken sollte. Die "Energieökonomik" war auf die Optimierung aller materiellen Austauschprozesse im engeren Sinne ausgerichtet. Hierbei wird ausdrücklich die "Verwertung der stofflichen und energetischen Abfallprodukte" aufgeführt und namentlich die Verhüttung von alten Abfallhalden, die Konservenbüchsen-Entzinnung, die Abwärmeverwertung, die Teerindustrie und die Gichtgasmotoren genannt. Dabei war Walter Ostwald der enge Zusammenhang von wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Zielsetzungen der energetischen Ökonomik voll bewußt: "Energievergeudung zeigt sich nämlich meist unsozial auch in dem Sinne, daß die vergeudete Energie, die Abfallstoffe sich gemeingefährlich unnützlich machen (Ablaugen chemischer Fabriken töten die Fische; Halden der Kohlenbergwerke brennen und verpesten die Gegend; Rauchabgase verderben die Luft; Müll erzeugt Epidemien usw. usw.)." (ebda., S.127 f.). Schließlich sollte die "Menschenökonomik" nach Taylors Vorbild die überflüssigen Anstrengungen bei der Arbeit verringern und die Massenprodukte verbilligen. Da eine Beschränkung auf nützliche Produkte und den notwendigen Bedarf als selbstverständlich galt, geriet die die Vergeudung steigernde Wirkung der Massenproduktion noch nicht in den Blick. Überhaupt schien in der "Ökonomik der Technik" auf der Basis der energetischen Weltanschauung privatwirtschaftliches Gewinnstreben und umwelt- und ressourcenschonende Zielsetzungen voll miteinander vereinbar zu sein.

3. INGENIEURBEWEGUNGEN FÜR EINE RESSOURCEN-SPARENDE TECHNIK IM ERSTEN WELTKRIEG UND IN DEN NACHKRIEGSJAHREN

Derartige, mit großer Emphase vorgetragene Plädoyers für eine soziale und ökologische "Weltgestaltung" nach energetischen Grundsätzen, die in der Hochkonjunktur vor dem Ersten Weltkrieg nur innerhalb der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz auf Widerhall stießen, beschäftigten unter dem Einfluß gemischtwirtschaftlicher Tendenzen in der Kriegswirtschaft und der durch sie ausgelösten Bestrebungen für eine gemeinwirtschaftliche Umstrukturierung des Wirtschaftslebens plötzlich die allgemeine Politik. In Deutschland wurde die Energetik vor allem durch die beiden Initiatoren der deutschen Kriegsrohstoffversorgung in die politische Debatte eingeführt, durch Walther Rathenau, damals 'Juniorchef' der AEG, und den Leiter des Versuchslabors im AEG-Metallwerk Wichard von Moellendorff. Sie veranlaßten bei Kriegsbeginn 1914 das Kriegsministerium zu einer Beschlagnahme, Erfassung und zentralen

Bewirtschaftung aller kriegswichtigen Rohstoffe. Als Leiter bzw. Referent der Kriegsrohstoffabteilung wirkten beide auch daraufhin, so weit wie möglich importierte Metalle und Rohstoffe durch einheimische Ersatzstoffe zu substituieren, und dies auf Dauer. Noch während des Weltkrieges plädierte Rathenau dafür, die Rohstoffabteilung auch im Frieden "als Kern eines wirtschaftlichen Generalstabes" beizubehalten und über Schutzzölle auch künftig eine Politik des "Rohstoffschutzes" zu betreiben (Rathenau, Deutschlands Rohstoffversorgung, S.54 ff., 74 f.). Über ein nationales Rohstoffautarkie-Programm hinaus setzten sich Rathenau und v. Moellendorff für eine generelle Verbrauchssenkung bei Rohstoffen und Energieträgern ein, und zwar sowohl durch ein Programm der Durchrationalisierung der gesamten Wirtschaft unter energetischen Kriterien als auch durch eine Eindämmung der "ungezügelter Wirtschaft" und des Luxuskonsums zugunsten einer bedarfsorientierten Produktion langlebiger Produkte. Beide erweiterten so das technikreformerische Wirkungsgraddenken um allgemeine gesellschaftspolitische Zielsetzungen, denn: "Heute ist jeder Verlust, jede Verschwendung Sache der Gemeinschaft." (Rathenau, Die Neue Wirtschaft, S. 211).⁴ Auch der Ingenieur und konservative Gemeinwirtschaftler v. Moellendorff wollte das "ungeordnete Wechselspiel von privatem Angebot und privater Nachfrage", die eine "unmittelbare Gefahr für das rohstoffarme Deutschland" darstellten, mit einer "planmäßigen Gemeinwirtschaft" eindämmen, die planwirtschaftliche Regulierungsmethoden mit dem wirtschaftlichen Selbstverwaltungsprinzip kombinierten (Moellendorff, Deutsche Gemeinwirtschaft, S. 22). Doch alle Versuche Rathenaus und von Moellendorffs, über kriegswirtschaftliche Regulierungsmechanismen und Sozialisierungsgesetze energetisch-tayloristisch-technokratische Zielsetzungen durchzusetzen, schlugen letztlich fehl.

Diese sozial-, kultur- und technikkritische Bewegung von Teilen der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz, die bereits um 1900 begann, aber erst unter den Bedingungen der Kriegswirtschaft und der zugespitzten sozialen Situation während des Ersten Weltkrieges eine größere Resonanz erzielte, schlug sich nun auch in den offiziellen Verlautbarungen der Ingenieurverbände, in den Ingenieurwissenschaften und in der Konstruktionslehre nieder. Der VDI zog aus der Erfahrung des kriegswirtschaftlichen Rohstoffmangels der vom Weltmarkt abgeschnittenen Mittelmächte die Folgerung, daß der "technischen Wissenschaft" künftig die Aufgabe zufiele, den Verbrauch auswärtiger Rohstoffe zu reduzieren, Ersatzstoffe zu schaffen und den Wirkungsgrad der Maschinenarbeit, des Transportwesens, der Krafterzeugung und

⁴ Vgl. auch H.D.Hellige, Walther Rathenau: Ein Kritiker der Moderne als Organisator des Kapitalismus. Entgegnung auf T.P.Hughes' systemhistorische Rathenau-Interpretation, in: T. Buddensieg, Th.P.Hughes, J.Kocka (Hrsg.), Ein Mann vieler Eigenschaften. Walther Rathenau und die Kultur der Moderne, Berlin 1990, S. 32-54.

Wärmeversorgung deutlich zu verbessern. In den auf der Hauptversammlung von 1917 verkündeten "Richtlinien für die Zukunftsaufgaben der deutschen Ingenieure", machte es der Vorsitzende des VDI den Ingenieuren zur Pflicht, "Naturschätze nur in sparsamer, wirtschaftlich vertretbarer Weise zu verwerten und jeden Raubbau zu Ungunsten unser Nachkommen zu vermeiden." (Rieppel, S. 3). In der Zeitschrift des VDI und in Fachzeitschriften für Konstrukteure wurden jetzt auch erstmals ausdrücklich Forderungen für ein "wirtschaftliches Konstruieren" aufgestellt: Der Konstrukteur sollte mit einem Mindestmaß an Fertigungsaufwand und Werkstoffverbrauch die höchste Wirkung erzielen.

In Deutschland wie auch in den USA mündete die energetische Bewegung am Beginn bzw. in der Mitte der 20er Jahre schließlich in rein tayloristische bzw. fordistische Rationalisierungsstrategien. Denn der soziale Anspruch, der die eigentliche Triebfeder für die Kritik am unzureichenden Ressourcen-Management im Betrieb und in der Volkswirtschaft bildete, war zugleich die Grenze des energetischen Engagements der Ingenieure. Als sie in der Konfrontation mit den Unternehmern unterlagen, die Nachkriegskonjunktur einsetzte und die Ansätze kriegswirtschaftlichen Planung wieder verschwanden, verzichteten sie auf energetische Wirtschaftsreformen und begnügten sich schnell mit der Rolle des Fertigungsrationalisierers im Betrieb. Der "Energetische Imperativ" erwies sich letztlich als "eine bloße Maxime für Zeiten der Not", die man bei einem ausreichenden, ja überreichlichen Angebot an Rohstoffen und Energieträgern schnell wieder aufgab (Radkau, S.288). Mit der Rückbildung der "Energetik" von einer allgemeinen Ingenieurbewegung zu einer Randgruppenerscheinung in der "Engineering Community" ging die Auflösung der ursprünglichen Einheit des Programms einher. Die einst gegenüber der Arbeitseffizienz als gleichrangig oder gar als vorrangig angesehenen Ziele der höchsten Energie- und Rohstoffeffizienz wurden in eine marginale Position abgedrängt. Statt der ursprünglich bei der Ressourceneinsparung auch intendierten *absoluten* Sparstrategien auf *gesamtwirtschaftlicher* Ebene konnten nur *relative betriebswirtschaftliche* Sparstrategien durchgesetzt werden. Das Resultat war eine Art Dialektik der energetischen Aufklärung: sparsamster Arbeits- Energie- und Materialeinsatz machte die Produkte so billig, daß ihre Massenausbreitung erleichtert wurde. Ebenso schufen die Wirkungsgradsteigerungen im Energiebereich durch immer größere Umwandlungsaggregate erst die Anreize für eine generelle Anhebung des Energieverbrauchs-niveaus. Die Ingenieurbewegung für einen sparsamen Umgang mit Naturressourcen forcierte so am Ende die Skalenökonomie in der Güterherstellung und Energieversorgung, wodurch gerade schnellebige Produkte und Vergeudungswirtschaft begünstigt wurden, also das Gegenteil von der ursprünglich intendierten Bedarfsproduktion zur Ressourcenschonung eintrat.

Während sich die Konstruktionslehre schwer tat, energetische Kriterien in ihren Kanon übergeordneter Konstruktionsprinzipien aufzunehmen, reagierte sie relativ schnell auf die Rationalisierungswelle im Anschluß an Weltkrieg und Inflation. Der Fertigungsprozeß wurde nun erstmals systematisch in die Konstruktionsregeln und -richtlinien einbezogen. Ab 1922/23 häuften sich in den Fachzeitschriften für Konstrukteure Artikel über "Werkstattgerechtes Konstruieren", "Fertigungsgerechtes Konstruieren" bzw. "Konstruieren für die wirtschaftlichste Fertigung".⁵ Die Lohnkosten verdrängten Ressourcenaspekte als wichtigste nicht-technische Zielgröße, selbst in den Vortragsreihen über "Verlustquellen in der Industrie", die Arbeitseinsparung Deutscher Betriebsingenieure (ADB) seit 1926 nach dem Vorbild der amerikanischen "Waste-in-Industry-Kampagne" durchführte, stand die "werkstattgerechte Formgebung" im Mittelpunkt.⁶ Mit Blick auf eine weitestgehende maschinelle Fertigung sollte die Konstruktion bzw. die Produktgestalt so weit wie möglich vereinfacht, genormt bzw. standardisiert werden. Als sich in der zweiten Hälfte der 20er Jahre die kostenintensive Montage als ein problematischer Engpaßfaktor herausstellte, entwickelte die Konstruktionslehre den Grundsatz des "Montagegerechten Konstruierens". Damit erfaßte die Konstruktionslehre nun auch die Endphase der Fertigung. Diese Linie wurde in der Rüstungskonjunktur und der Kriegswirtschaft im Zweiten Weltkrieg mit dem Prinzip des "automatisierungsgerechten Konstruierens" fortgeführt. Vorrangiges Ziel war nun die Massenfertigung, die Großserien-Orientierung und eine dafür nochmals gesteigerte Vereinfachung der Produktgestalt.⁷

⁵ Die Initiative für "fertigungsgerechtes Konstruieren" ging von den Betriebsingenieuren und deren Vereinigung (ADB) aus. Vgl. u.a. R. Bruck, Formgebung bei Konstruktionsteilen mit Rücksicht auf wirtschaftlichste Fertigung, in: Maschinenbau 1 (1922) 1, S. 1-6; F. Modersohn, Verbürgt werkstattgerechtes Konstruieren den Erfolg?, in: ebda., 9 (1930) 5, S. 164-166.

⁶ Siehe Kothe, Waste in Industry. Ein amerikanischer Bericht in deutscher Beleuchtung, in: Maschinenbau 5 (1926) 20, S.934-938; Gießmann, Konstrukteur und Betrieb, in: Z-VDI 72 (1928) 17, S. 549-555.

⁷ Vgl. u.a. W. Fehse, Arbeitersparnis durch konstruktive Maßnahmen in der Reihenfertigung, in: Maschinenbau 18 (1939) 5/6, S. 111-114; O. Dyckhoff, Probleme der Massenfertigung, in Z-VDI 86 (1942) 39/40, S. 587 ff.; R. Lambertz, Arbeitseinsparung durch Fertigungsverfahrenvereinfachung im Maschinenbau, in: Maschinenbau, 24 (1942) 7, S. 277-280.

4. DAS "WERKSTOFFSPARENDE KONSTRUIEREN" ALS BESTANDTEIL DER NATIONALEN AUTARKIEPOLITIK IM DRITTEN REICH

Neben der vor allem auf Lohnkosten-Senkung bedachten, an Taylorismus und Fordismus angelehnten Konstruktionslehre der Zwischenkriegszeit gab es aber auch eine Ressourcenbezogene Sonderentwicklung im Dritten Reich: das "Werkstoffsparende Konstruieren". Die Erfahrungen mit der gravierenden Rohstoffabhängigkeit im Ersten Weltkrieg, die von vornherein anvisierte Aufrüstung und Kriegsplanung sowie Devisenmangel infolge der Weltwirtschaftskrise führten bereits im März 1934 zur Sparstoffverordnung, nach der alle Rohstoffe mit begrenzter Verfügbarkeit vermieden oder reduziert werden mußten (Ludwig, S. 436-441). Die wichtigsten Zeitschriften für Konstrukteure wie "VDI-Zeitschrift", "Maschinenbau-Der Betrieb" und "Elektrotechnische Zeitschrift" griffen das Thema "Werkstoffersparnis im Betrieb" sofort auf. Die zum VDI gehörende ADB startete im August 1934 eine Kampagne für den "Kampf gegen Rohstoffverschwendung im Betrieb": bessere Werkzeugmaschinen, neue, vor allem nicht-spanende Arbeitsverfahren und Schulung der Belegschaften sollten den Werkstoffbedarf und die Ausschußverluste reduzieren. Ebenso sollte ein verbesserter "Erfahrungsaustausch zwischen Fertigung und Gestaltung" eine "sparsame Werkstoffwirtschaft" fördern (Werkstoffersparnis im Betrieb, S. 405). Auch die von Anton Erkens geleitete "Gruppe Konstruktion" des VDI behandelte seit 1935 die "Auswirkungen der Rohstofffragen auf die Gestaltung" regelmäßig in ihren Konstrukteurskursen (Erkens, S. 666).

Die Sparstoffwirtschaft und die bewußte Berücksichtigung von Altstoffen wurden bald ein zentrales Element der in der zweiten Hälfte der 30er Jahre entstehenden wissenschaftlichen Konstruktionsmethodik.⁸ Ihre beiden maßgeblichen Begründer, Fritz Kesselring und Hugo Wögerbauer, versuchten die Rationalisierung des Konstruktionsprozesses auf dem Wege seiner Verwissenschaftlichung unmittelbar mit einer Rationalisierung der Materialökonomie zu verbinden. Kesselring beteiligte sich zwar nicht direkt an den Sparstoff-Kampagnen, er machte aber den minimalen Stoffeinsatz zum Angelpunkt seiner Methode der technisch-ökonomischen Konstruktions-Bewertung. So lautete in seiner "Gestaltungslehre" das zentrale "Gestaltungsgesetz": "Aufgabe ist, mit einem Minimum an Menschen aus einer gewissen Werkstoffmenge, die in diesem Umfange fortlaufend zur Verfügung steht, ein Maximum an 'starken', vom Markt aufnahmefähigen Erzeugnissen zu erzielen.<...> Die konstruktive Entwicklung ist so zu lenken, daß die Materialkosten ein Minimum werden." (Kesselring, Die 'starke' Konstruktion, S.322, 327). Kesselring hielt auch in seiner 1954 erschienenen "Techni-

⁸ Vgl. zum folgenden: Hellige, Leitbilder S. 12-35 und ders., Hierarchische Ablaufsteuerung, S. 149 ff.

schen Kompositionslehre" an dieser Definition des zentralen Gestaltungszieles fest, die noch immer den engen Bezug zur Rohstoffknappheit und dem Arbeitskräftemangel der NS-Rüstungskonjunktur erahnen ließ (Technische Kompositionslehre, S. 246 ff., 259 ff.). Der materialorientierte Ansatz Kesselrings fand schließlich sogar Eingang in die VDI-Richtlinie 2225 "Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren" von 1964 bzw. 1977.

Hugo Wögerbauer, der Autor einer für die Geschichte der Konstruktionswissenschaft besonders wichtigen "Technik des Konstruierens" (1942/43) war noch viel direkter in die Politik der "Rohstofffreiheit" des Dritten Reiches verwickelt als Kesselring. Er war selber als Sparstoffkommissar dem Reichsministerium für Rüstung und Munition unterstellt und entwickelte in einer Reihe von Aufsätzen und Vorträgen im Rahmen von VDI-Kursen die Prinzipien und Methoden des Werkstoffsparenden Konstruierens (Werkstoffsparen in Konstruktion und Fertigung). Darin verknüpfte er wohl als erster Richtlinien und Empfehlungen des ressourcenschonenden Konstruierens mit einer Systematik der "Arbeitsstufen der technischen Stoff-erzeugung und -verarbeitung" und gelangte dadurch zu einem Modell eines geschlossenen Rohstoff- und Produktzyklus (s. Abb., Werkstoffsparen. Die technischen Zusammenhänge, S.321). Auf jeder der Stoffverarbeitungsstufen prüfte er die Möglichkeiten einer Einsparung von knappen Werkstoffen durch. Bereits der Entwicklungsingenieur könne durch "sorgfältige Prüfung und Ausnutzung der Werkstoffe bis an ihre Leistungsgrenzen" den Werkstoffverbrauch mechanischer Elemente wesentlich beeinflussen, oft mehr als später der Konstruktionsingenieur. Hierzu entwarf Wögerbauer eine Systematik der Werkstoffeigenschaften und der Einflußgrößen auf die Werkstoffwahl (Wögerbauer, Sparstoffe im Feingerätebau; ders., Leitgedanken). Durch möglichst kleine Dimensionierung und Leichtbau sowie durch geeignete Formgebungsverfahren konnte weiter eingespart werden. Bei der Herstellung sollten Ingenieure, Werkmeister und Arbeiter vordringlich auf "Wiederverwertung des Abfalls und Ausschusses" achten (Wögerbauer, Werkstoffsparen ist nationale Pflicht). Absoluten Vorrang hatte allerdings die Vermeidung von Produktionsabfall. Im Ansatz findet sich bei ihm bereits die Prioritätenskala: Vermeidung, Verringerung und Verwertung. Auch das Recycling-Prinzip ist schon angedeutet, allerdings nur im Sinne der Notwendigkeit einer "Wiederverwertung" und noch ohne Rückbezug auf die konstruktive Gestaltung.

Schließlich wird auch die elementare Bedeutung einer angemessen langen Produktlebensdauer gesehen, allerdings kommt Wögerbauer unter dem kriegswirtschaftlichen Zwang der maximalen Verwendung von Reichsstoffanteilen zu einer Unterordnung der Dimensionierung der Produktlebensdauer unter die Sparstoff-Reduzierung: "Hohe Gebrauchsdauer setzt hohen Werkstoffaufwand - kleine Spannungen, wertvolle Werkstoffe - voraus. Solcher Aufwand ist nur zulässig, wo wirklich die höchste Betriebssicherheit gewährleistet werden muß. In allen

anderen Fällen darf eine bereits angespannte Werkstoffversorgungslage nicht durch übertriebene Forderungen nach etwaiger jahrzehntelanger Gebrauchsdauer belastet werden." (Wögerbauer, Werkstoffsparen. Die technischen Zusammenhänge, 323). So blieb im Unterschied zur energetischen Bewegung und zum Engineering Progressivism um den Ersten Weltkrieg das Konstruktionsprinzip des Werkstoffsparens auf allen Stoffverarbeitungsstufen letztlich immer auf die nationale Autarkiepolitik fixiert. Die "Rohstofffreiheit" des Reiches und nicht allgemeine technikethische Grundsätze oder universale Rationalisierungskonzepte bildeten das Ziel von Wögerbauers Appellen für eine "Denk-Umstellung" der Konstrukteure. Andererseits verstand er seine "Werkstoffsparlehre" nicht, wie ein Großteil der Ingenieure, als eine Übergangsregelung, sondern als eine langfristige Strategie, und er verwies dabei ausdrücklich auf die Endlichkeit der nationalen Bodenschätze und den hohen Devisenaufwand für Rohstoffimporte. Für die "Werkstoffumstellung" und die Ablösung älterer, werkstoffvergeudender Konstruktionen hielt er Marktmechanismen nicht für ausreichend, sondern setzte auf die überbetriebliche Gemeinschaftsarbeit unter der Aufsicht einer "übergeordneten neutralen Stelle".⁹

So waren auch in der Werkstoffspar-Bewegung die Grenzen zwischen betriebs- und volkswirtschaftlichen Optimierungsstrategien oft fließend. Auch im Dritten Reich entwickelten sich wie im Ersten Weltkrieg im Zusammenhang mit Strategien zur Ressourcenschonung technokratische Tendenzen, diesmal im Bündnis mit dem faschistischen Staat, von dem sich viele Ingenieure und Konstrukteure die Durchsetzung rationeller Sparstrategien und eine Überwindung der kapitalistischen Vergeudungswirtschaft erhofften. Freilich vergeblich, denn nicht einmal in der durchregulierten Kriegswirtschaft waren ihre Ziele voll realisierbar. Die besondere Situation der Rohstoffknappheit erzwang vielmehr eine fatale Mischung aus Spar- und Vergeudungsstrategien: Qualität und Lebensdauer der Produkte wurden sehr oft bewußt reduziert, nur um kriegswichtige Rohstoffe einzusparen. Die historisch besondere Ursache der Ressourcen-Orientierung der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz im Dritten Reich war so zugleich ihre Grenze, die weiterreichende Ansätze nicht zuließ. Das rohstoffsparende Kon-

⁹ Wögerbauer, Sparstoffe im Feingerätebau, S.156 ("Durch sinnvolles Werkstoffsparen sind unserer Volkswirtschaft noch bedeutende Zugänge - Zugänge relativ als Nichtverbrauch gesehen - an Sparstoffen möglich. Aber die Aufgabe des Werkstoffsparens darf nicht leichtfertig behandelt und darf vor allem nicht als vorübergehende Notmaßnahme betrachtet werden. Das Sparen ist keine Aufgabe für Verwaltungsbeamte oder Kaufleute und findet mit der Organisation der Bedarfscheine noch lange nicht das Ende. Es ist eine schwierige technische Aufgabe von höchster Verantwortung für den Ausführenden. Sie verlangt den vollen Einsatz der besten deutschen Ingenieure."); ders., Werkstoffsparen auch in Zukunft, in: Rundschau Deutscher Technik, 26.9.1940; ders., Werkstoffumstellung im Maschinen- und Apparatebau.

struieren und die Ansätze für eine recyclingorientierte Produktion und Konstruktion verschwanden dann nach dem Zweiten Weltkrieg auch schnell wieder von der Bildfläche. Lediglich in der DDR und in den Staaten des COMECON wurde zur Deviseneinsparung der Rohstoffbedarf weiterhin zu einem beachtlichen Teil durch Sekundärrohstoffe gedeckt und von den Konstrukteuren die Berücksichtigung des Recycling als "Embargo-Qualifikation" gefordert. Zu einer *systematischen* Entwicklung entsprechender Konstruktionsmethoden scheint es dabei jedoch nicht gekommen zu sein.¹⁰

In den westlichen Industrieländern wurde infolge des über den Markt wiederhergestellten Rohstoffreichtums und der Arbeitskräfteknappheit die Substitution von Arbeit durch Energie- bzw. Materialaufwand sowie das fertigungs- und montagegerechte Konstruieren sehr bald wieder zu den entscheidenden Gestaltungskriterien. Da zudem die Konstruktion selbst ein personeller Engpaßfaktor ersten Ranges war, rückte die Rationalisierung des Konstruktionsprozesses auf der Grundlage einer detaillierten Strukturierung und einer stringenten Ablaufplanung in das Zentrum der Konstruktionsforschung. Der Einzug von CAD in die Konstruktionsbüros verstärkte in den 60er und 70er Jahren noch die Ausrichtung auf das Leitbild des automatischen Konstruierens nach 'Fahrplan', während inhaltliche Aspekte wie Ressourcen-Orientierung geringere Beachtung fanden. Die Phase eines relativ unbedenklichen Umgangs mit den Rohstoffen endete erst mit der Debatte über die Probleme der Wachstumsgesellschaft seit den 60er Jahren und vor allem mit den beiden Ölpreiskrisen von 1973-75 und 1979-82.

¹⁰ Vgl. zu punktuellen Ansätzen und zur nachgeholten Rezeption westlicher Methoden des recyclinggerechten Konstruierens Garbe, Salomon, Recyclinggerechtes Konstruieren Salomon, Recyclinggerechte Konstruktion.

5. DIE WIEDERENTDECKUNG DER "GRENZEN DES WACHSTUMS" UND DAS RESSOURCEN-SPARENDE KONSTRUIEREN ZWISCHEN 1973 UND 1984

Anstöße für eine Neubeachtung von Ressourcen- und Umweltaspekten in der Konstruktionslehre kamen aus mehreren Richtungen. Da war zum einen die in den 60er Jahren kumulierende Kritik an der Wachstums- und Wegwerfgesellschaft, die auch die Technisch-wissenschaftliche Intelligenz teilweise erfaßte. Besonderen Eindruck machten hier die Studie der beiden Meadows für den Club of Rome über die "Grenzen des Wachstums" von 1972, die mit Hilfe von Computer-Simulationen die fatalen Folgen exponentieller Wachstumskurven beim Ressourcenverbrauch vor Augen führten.¹¹ Neben der ressourcen-ökonomischen Argumentation auf der Basis quantitativer Prognosemodelle erlebte auch die thermodynamische Kritik der Ressourcenvergeudung einen neuen Aufschwung. Es war vor allem der Schumpeter-Schüler Nicholas Georgescu-Roegen, Ökonom an der Vanderbilt-University, der den gesamten Wirtschaftsprozeß als entropischen Vorgang beschrieb und damit das implizite mechanistische Kreislaufmodell der nationalökonomischen Standardliteratur wie der marxistischen Reproduktionsschemata radikal in Frage stellte. Georgescu-Roegen bezog in seinem 1971 erschienenen Hauptwerk "The Entropy Law and the Economic Process" erstmals neben den energetischen Prozessen auch explizit die Stoffflüsse mit ein und weitete das Entropiegesetz auf die gesamte nutzbare Materie aus. Er kam so zu einem "Vierten Hauptsatz der Thermodynamik", wonach auch die Metalle und alle übrigen Rohstoffe in Form von Produkten und Abfällen immer mehr verstreut und nur unter zusätzlichem Energieaufwand wieder nutzbar zu machen seien (Georgescu-Roegen, Nachwort S.304 f). Die in ökonomischen Prozessen verstreute Materie könne nur noch mit unverhältnismäßig viel Energie eingesammelt und wieder nutzbar gemacht werden. Denn, so formuliert es sein Schüler Jeremy Rifkin in dem Buch "Entropie": "Recycling erfordert Aufwand an zusätzlicher Energie beim Einsammeln, Transport und der Verarbeitung gebrauchter Materialien, und das wiederum erhöht die Gesamtentropie in der Umwelt." (Entropie, S.47f.). Noch ehe die Idee einer geschlossenen Recyclingwirtschaft überhaupt voll entwickelt war, wurden hier bereits die Grenzen dieses Ansatzes aus physikalischer Perspektive aufgezeigt.¹²

¹¹ Meadows u.a., Die Grenzen des Wachstums; vgl. zur Rezeption der Studie bes. Traube, Müssen wir umschalten? S. 66-70.

¹² Vgl. hierzu die Beiträge von Georgescu-Roegen ("Was geschieht mit der Materie im Wirtschaftsprozeß?") und von Werner Stumm und Joan Davis ("Kann Recycling die Umweltschädigung vermindern? Die Kreisläufe können nicht geschlossen werden") auf der Recycling-Tagung des Duttweiler-Institutes, in: Brennpunkte 1974/2, S.17-28, 29-40.

Im Unterschied zum 19. Jahrhundert bildete aber nicht die thermodynamische Vergeudungskritik den Ausgangspunkt für Ressourcenschonungs-Konzepte in der Technisch-wissenschaftlichen Intelligenz. Es waren vielmehr die Wachstumsmodell-Studien von Meadows, Dennis Gabor und Jay Forrester, die zu zentralen Bezugspunkten für die in den 70er Jahren entstehenden Ansätze für eine ressourcensparende Technikgestaltung wurden.¹³ Der wirklich entscheidende Anstoß für diese Initiativen kam jedoch von den beiden Ölpreiskrisen von 1973-1975 und 1979-1982 und von dem dadurch in diesem Zeitraum stark angestiegenen Preisniveau für Energieträger und Rohstoffe. Örtliche Müllmißstände, vor allem in den USA, kamen als ein weiterer Grund hinzu. Diese führten zu erschreckenden Zukunftsszenarios über die wachsenden Entsorgungsprobleme der "Müllkippe Erde", die viele der jetzigen Schwierigkeiten mit dem Verpackungsmißbrauch, den Kunststoffabfällen und dem Sondermüll bereits um 1970 drastisch ausmalten (Reimer, Müllplanet Erde). Doch wurde damals der Entsorgungsengpaß noch einmal durch eine Verlagerung der Deponien in entferntere Gegenden und durch die breite Einführung der Müllverbrennung behoben, so daß sich die Debatte bald wieder auf die Frage der Verwendung von "Waste as a fuel" verschob.¹⁴ Mitte der 70er Jahre diskutierten die Engineering Communities der USA und Westeuropas vor allem das Thema Energie- und Rohstoffknappheit und erörterten damals eine ganze Palette von technisch-ökonomischen bzw. soziotechnischen Strategien zur Ressourcenschonung. Dazu gehörten besonders:

- die Verringerung der Baugrößen,
- die Verringerung des spezifischen Stoff-/Energieaufwandes,
- die Verlängerung der Produktlebensdauer statt künstlicher Obsoleszenz,
- die Wiederverwendung von Produkten (Re-use) und von Materialien (Recycling),
- der Verzicht auf modenbedingten schnellen Produktwechsel und die
- Reduzierung des Verbrauchs über gesellschaftliche Anreize oder Vorgaben.

Dieses anfangs recht breite Maßnahmenspektrum wurde in TA- und Policy-Studien sowie Energie- und Rohstoffszenarios mit den Schlagworten "Non-Waste-Technology", "Re-

¹³ Gabor, u.a., Das Ende der Verschwendung, S. 151-157; Forrester, Der teuflische Regelkreis.

¹⁴ Siehe dazu das erste Standardwerk über Materialrecycling: Pearce, Walter, Resource Conservation.

source/Energy-Conservation" und "Recycling" gebündelt, wobei sich das letztere sehr bald gegenüber den beiden anderen, anfangs dominierenden durchsetzte.

Der Recyclingbegriff stammt ursprünglich aus der chemischen Verfahrenstechnik, wo er bereits in den 20er Jahren vor allem in der US-Petrochemie die Rückkehr in die Reaktionskammer zum wiederholten Prozeßdurchlauf bezeichnete.¹⁵ Diese Bedeutung eines "return to a previous stage of a cyclic process" wurde seit dem Ende der 50er Jahre auch auf die Versorgungs- und Entsorgungstechnik ausgeweitet und bedeutete dann sehr bald "re-use of a waste material". Dabei steht bis in die 70er Jahre hinein die unmittelbare Wiederherstellung von Ausgangsstoffen bzw. die Wiederverwertung einzelner Stoffe im Vordergrund. Doch die Debatte über die "Grenzen des Wachstums" führte zu einer starken Ausweitung des Begriffes. Er löste sich von der verfahrenstechnischen Vorgeschichte und wurde nun mit dem Prinzip geschlossener Kreisläufe in allen Stoff- und Energieumwandlungsprozessen sowie mit Mehrfachnutzungs- und Ressourcenschonungs-Strategien überhaupt gleichgesetzt. Die Ausweitung und Ausbreitung des Recyclingbegriffes überschneidet sich mit einer Renaissance der Kreislaufmetapher in Naturwissenschaft, Technik und Gesellschaft. Energetische und stoffliche Prozesse werden an dem Vorbild biologisch-ökologischer Kreisläufe als "Modellen des Überlebens" ausgerichtet, das Kreislauf- und Recyclingprinzip wird zum Gegenbegriff zu allen linearen und exponentiellen Wachstumsprozessen.¹⁶ Selbst in der Konstruktionslehre wird es Ende der 70er Jahre definiert als die "begriffliche Zusammenfassung bekannter und in Entwicklung befindlicher Verfahren und Methoden, um viele bisher einseitig verlaufende, vom Menschen geschaffene technische Prozesse den Vorbildern aus der Natur anzugleichen, wo Lebenszyklen und Nahrungsketten sich stets in Kreisläufen schließen und sich damit ständig selbst erneuern".(Warnecke, Steinhilper, Instandsetzung, S. 751). Mit dieser großen Spannweite wird der Begriff seit der ersten Hälfte der 70er Jahre auch im deutschen Sprachraum übernommen, die allgemeine Verbreitung erfolgt jedoch erst in den 80er Jahren, als sich der Bedeutungsgehalt schon wieder auf Stoffkreisläufe im engeren Sinne eingrenzt und der Bezug zum "Energiercycling" und zur Energiedebatte überhaupt gelöst wird.

Die Konstruktionslehre und -forschung griff die Recycling- und Ressourcenschonungs-Thematik erst Mitte der 70er Jahre auf. Dabei standen zunächst produktspezifische Recycl-

¹⁵ Oxford English Dictionary, 2.Aufl. Oxford 1989, Vol. XIII, S. 388; Lueger Lexikon der Technik, Bd. 4, Lexikon des Bergbaues, hrsg. v. H. Grothe, Stuttgart 1962, (Recycling im Sinne von Gaskreislaufverfahren als einzige Eintragung im ganzen Lueger!).

¹⁶ Vgl. hierzu bes. Fester, Neuland des Denkens, S. 82 f., 257 ff., 352 ff.; Zellentin, Nonnenmacher, Abschied vom Leviathan, S.126 ff.

ingmethoden im Vordergrund, u.z. in aller erster Linie für Automobile, die wegen ihrer Anzahl und ihres hohen Wertstoffanteils ein lohnendes Objekt boten. Bald kamen andere industrielle Massengüter hinzu, vor allem Haushaltsgroßgeräte wie Kühlschränke und Waschmaschinen, während elektronische Geräte noch völlig ausgespart blieben. Seit 1976/77 wurden die ersten produktübergreifenden Methodenansätze für das "Recyclinggerechte Konstruieren" vorgestellt, meist in Form von Problemaufrissen oder Forschungsprogrammzeichnungen auf nationalen oder internationalen Tagungen. Auf einer großen UN-Expertenkonferenz entwickelte der niederländische Konstruktionswissenschaftler H. H van den Kroonenberg 1976 maßgebliche Felder und Gestaltungsgrundsätze der Non-Waste-Technology (The Role of Design Education). Dazu gehörten die gezielte Einsparung knapper Materialien und Energierohstoffe, Recycling- und Wiederverwendungsgerechtigkeit sowie die reparaturfreundliche Gestaltung und die Langlebigkeit der Produkte. Insgesamt forderte er vom Konstrukteur, den gesamten Produktlebenszyklus einschließlich seines ökonomischen und sozialen Umfeldes zu überblicken, damit er das ganze Spektrum von Problemlösungstypen, d.h. die kurzfristige Problemverlagerung (Postponing), die mittelfristigen Hegungsmaßnahmen (Curing) und langfristige Vermeidungs- und Vorbeugestrategien (Preventing) mit ihren jeweiligen Folgen erkennen könne. In van den Kroonenbergs sehr breit angelegtem Ansatz fehlten aber noch spezielle Instrumente für die Non-Waste-Konstruktion, er begnügte sich im wesentlichen mit einer bloßen Zuordnung des Materialzyklus zum systemtechnischen Phasenmodell des Konstruktionsprozesses.

Der VDI machte die Ressourcenproblematik im folgenden Jahr unter dem Titel "Optimale Rohstoffnutzung - eine Aufgabe für den Ingenieur" zum Thema des Deutschen Ingeniertages. Auf ihm erklärte der Darmstädter Professor für Maschinenelemente und Konstruktionslehre Gerhard Pahl die "material- und energiesparende sowie die recyclinggerechte Gestaltung" als eine Aufgabe für die gerade in der Disziplinwerdung begriffene, wissenschaftliche Konstruktionsmethodik. Diese könne die Ziele und Bedingungen besser klären und Lösungen für eine "optimale Rohstoffnutzung durch Einsparen, Langlebigmachen und Rückführen" situationsadäquat entwickeln. Für Gestaltungen, die diesen Kriterien entsprechen, führte er den Begriff "recyclinggerecht" ein, der in dem Katalog von Gestaltungsrichtlinien der im gleichen Jahr erschienenen ersten Auflage der "Konstruktionslehre" noch fehlte.¹⁷ Im Anschluß an diese Tagung entstanden an maßgeblichen Instituten für Produktionstechnik und Maschinenkonstruktion in Berlin, Aachen und Stuttgart eine Reihe von For-

¹⁷ Pahl, Material- und energiesparende sowie die recyclinggerechte Gestaltung, S. 1-7; ders., Beitz, Konstruktionslehre, 1. Aufl. 1977; 2. Aufl. 1986, S. 340-345; 3. Aufl. 1993, S. 415-432 (Der wesentlich erweiterte Abschnitt belegt den Bedeutungszuwachs !).

schungsarbeiten zum ressourcenschonenden Konstruieren, obwohl noch immer die Rationalisierung des Konstruierens mit Hilfe von Phasenmodellen, Konstruktionskatalogen und CAD den Hauptschwerpunkt der Konstruktionswissenschaft bildete.

Charakteristisch für diese Anfangsphase der recyclingorientierten Konstruktionsmethodik war eine breitangelegte ökologische und ressourcenökonomische Fundierung und nicht zuletzt die starke Beachtung der energetischen Dimension von Stoffkreisläufen. Die erste Gesamtdarstellung über das "Recyclinggerechte Konstruieren" von Rolf-Dieter Weege aus dem Jahre 1981 ist vielleicht typisch für die damalige Aufbruchsstimmung. Ausgangspunkt Weeges war die durch die Erdölkrise von 1973-75 vermittelte Erkenntnis, daß in der Konstruktion an die Stelle der bislang dominierenden "Pseudooptimierung", die meist nur auf Funktionserfüllung und niedrige Hersteller- und Benutzerkosten bedacht war, eine "ganzheitliche Produktoptimierung" treten müsse, die die Phase des Produktgebrauches und das Ende des Produktlebenszyklus mit erfaßt (Weege, S. 2 f.). Im Interesse einer Einsparung und der Substitution knapper Bodenschätze und Rohstoffe sollte der Konstrukteur den Rohstoffaufwand, die Gebrauchsdauer, das Recycling und die Deponierung mit einbeziehen und bei der Bewertung der Konstruktion neben dem einzelwirtschaftlichen immer auch den gesamtwirtschaftlichen Betrachtungsstandpunkt einnehmen, wozu insbesondere auch die Anwendung von social-cost-Ansätzen gehörte: "In der Konstruktionsforschung, die den Konstruktionsprozeß in den letzten Jahren systematisch durchdrungen hat, muß umgedacht werden. Es sind jetzt Verfahren erforderlich, die systematisch und umfassend Alternativtechnologien, -lösungskonzepte und -konstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Umweltzerstörung, der Energie- und Rohstoffverschwendung entstehen lassen." (ebda).

Während auch Weege auf methodischem Gebiet nur eine Einordnung der Rohstoffaspekte in das systemtechnische Phasenmodell des Konstruktionsprozesses vorzuweisen hatte, legten andere 1981/82 erschienene Arbeiten erste recycling-spezifische Analyse- und Konstruktionsmethoden vor. So Harald Meyer und Wolfgang Beitz eine begriffliche Systematik von Stoffflüssen und Recyclingvorgängen, die zu einem allgemeinen "Recycling-Modellsystem" für Stoffe integriert wurde.¹⁸ Sie schufen auch Bewertungstabellen und Matritzen für die Werkstoff-Verträglichkeitsbeurteilung sowie erste Ansätze für einen Kanon von Gestaltungsrichtlinien für das rohstoffsparende Konstruieren. Forderungen wie die nach einem Recycling auf dem höchstmöglichen Wertniveau, also Produktrecycling und andere die Produkt-

¹⁸ Beitz, Meyer, Untersuchungen zur recyclingfreundlichen Gestaltung, Teil 1: H. 7, S. 257-262; Teil 2: H.8, S.305-315; Meyer, Beitz, Konstruktionshilfen zur recyclingorientierten Produktgestaltung, S. 255-267; Meyer, Recyclingorientierte Produktgestaltung, S. 779-782.

lebensdauer verlängernde Maßnahmen, sowie die nach der Berücksichtigung der in den Umwandlungen eines Produktes oder Stoffes verbrauchten Energie belegen, daß für Meyer und Beitz das Recycling von *Altstoffen* allein zur Lösung künftiger Probleme nicht ausreicht: "Es muß vielmehr in ein Bündel von Maßnahmen eingebettet sein", die alle zusammen eine "Nutzungszeitverlängerung" für Produkte, Stoffe und Energien anstreben. Die damit anvisierten künstlichen Stoff- und Energiekreisläufe würden es jedoch trotz aller Bemühungen nicht schaffen, "Zyklen der Natur" nachzubilden, die sich dadurch auszeichnen, daß sie sich in Nahrungsketten immer wieder regenerierten.¹⁹

Auch Rolf Steinhilper und Hans-Jürgen Warnecke entwarfen Verfahren und Gestaltungsregeln für das "Intensivieren von Mehrfachnutzungszyklen" auf der Ebene des Produktabfalls, des Produktgebrauches und der Altstoffverwendung bzw. -verwertung, wobei die Aufarbeitungs- und Instandhaltungszyklen ganzer Produkte eine Priorität erhielten. Bei der ökonomischen Bewertung der Anwendung von Sekundärrohstoffen hielten beide vordergründige einzelwirtschaftliche Kalküle nicht für ausreichend, da langfristig die Unternehmen von einer Preisberuhigung an den Rohstoffmärkten profitieren würden: "Es wird hier notwendig, ein die gesamte Produktlebensdauer, mehrere Nutzungszyklen und verschiedene Recyclingverfahren überstreichendes Gesamtkostendenken zu entwickeln, in dem es für Hersteller und Anwender ein gemeinsames Minimum zu finden gilt." (Warnecke, Steinhilper, Instandsetzung, S. 753) Wie in früheren Ressourcenschonungs-Bewegungen von Ingenieuren führten auch hier konsequente Sparstrategien schnell zu einer Überschreitung des rein betriebswirtschaftlichen Denkens. Doch ist bisher keine neue energetische oder gemeinwirtschaftliche Bewegung erkennbar, vielmehr werden bei den meisten Ingenieuren, wie Pahl es schon 1977 forderte, die "angestrebten Ziele" ganz der "jeweils gegebenen wirtschaftlichen Situation" angepaßt: "Appelle in allgemeiner Form sind wenig nützlich, wenn eine material- und energiesparende sowie die recyclinggerechte Gestaltung nicht auch durch eine Ausführung verwirklicht werden kann, die der jeweiligen Kostenlage entspricht." (Pahl, S.1)

Als Resultat der konstruktionswirtschaftlichen Forschungsinitiativen am Ende der 70er und Anfang der 80er Jahre entstand 1982-84 auch der Entwurf zur VDI-Richtlinie 2243: "Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte", die alle Begriffsdefinitionen, Methodenansätze und Analyse- und Bewertungsinstrumente bündelte und systematisierte. Diese Richtlinie kam erstaunlicherweise bis heute nicht über das Entwurfsstadium hinaus. 1991 wurde die Fassung vom Dezember 1984 noch einmal überarbeitet und wartet noch immer auf

¹⁹ Beitz, Meyer, Untersuchungen, S. 257, basierend auf Jorden, Weege, Recycling beginnt in der Konstruktion, S. 381-387.

die endgültige Verabschiedung. Neben der üblichen Akzeptanzprobleme in der Industrie dürfte dafür vor allem der generelle Rückgang der Aufmerksamkeit für die Recycling-Thematik zwischen 1983 und 89 verantwortlich sein. Das durch eine gezielte Vorratsbildung und durch die Preisanstiegs-bedingte Neuerschließung von Rohstoffquellen wieder gesunkene Preisniveau bei Metallen und allen übrigen Rohstoffen nahm den Initiativen für ressourcensparendes Konstruieren den Wind aus den Segeln. Da auch bei Energieträgern dem Mangel ein Überfluß folgte, sank das Bewußtsein für die energetische Dimension von Stoffkreisläufen ebenfalls. Dem abgeflauten Interesse entsprach der Rückgang von Artikeln zur Ressourcen-Thematik in der Zeitschrift "Konstruktion". In den Jahren 1985-1989 erschien kein Artikel mehr zum Stichwort Recycling. Erst 1990 gab es wieder ein Schwerpunktheft hierzu. Auch in der VDI-Zeitschrift ist diese Pause seit der Mitte der 80er Jahre erkennbar. Erst zu Beginn der 90er Jahre erlebt das recyclinggerechte Konstruieren wieder eine größere Aufmerksamkeit. Ursache hierfür waren diesmal keine neuerlichen Preisausschläge bei Rohstoffen oder Energieträgern, sondern die inzwischen drastisch verschärfte Entsorgungs- und Deponierungsproblematik.

6 DIE ETABLIERUNG DES RECYCLINGGERECHTEN KONSTRUIERENS SEIT DEM ENDE DER 80ER JAHRE IM ZEICHEN DER VERSCHÄRFTEN DEPONIEPROBLEME

Die Abfallentsorgung bei Produktions- und Hausmüll entwickelte sich angesichts des knapper werdenden Deponieraums und des wachsenden Widerstands gegen Müllverbrennungsanlagen und die Genehmigung neuer Deponieflächen zu einem kritischen Engpaßfaktor in den hochindustrialisierten Ländern, der staatliche Interventionen zur Vermeidung und Verringerung des Reststoffaufkommens auslöste. Dadurch verschoben sich Stellenwert und Zielsetzungen des Recycling und des recyclinggerechten Konstruierens seit dem Ende der 80er Jahre deutlich. Aufgrund des Entsorgungsnotstandes wurde die Notwendigkeit einer vollen Einbeziehung der Gebrauchsphase und der Endphase technischer Produkte und Verfahren in den Verantwortungsbereich der Entwickler und Konstrukteure allgemein anerkannt, auch wenn es bei der praktischen Umsetzung noch immer Widerstände gibt. Recyclingorientierte Konstruktionsmethoden, die bisher im wesentlichen ein fernes Leitbild mit Appellcharakter darstellten, beginnen sich nun als Forschungs- und Ausbildungsgebiet an Technischen Hochschulen zu etablieren. Angesichts der steigenden, künftig den Produktpreis verteuernenden Entsorgungskosten fanden sie erstmals auch Einzug in die Praxis von Konstruktionsabteilungen vor allem größerer Unternehmen. Bei Autos, Haushaltsgroßgeräten und nun auch bei Fernsehern, Computern und anderen elektronischen Geräten wird die durchgängige recyclinggerechte Produktgestaltung auf der Basis einer geeigneten Werkstoffwahl, einer Minimierung der Werk-

stoffvielfalt, einer leicht lösbaren Verbindungstechnik und der weitgehenden Vermeidung von Integralbauweisen allmählich "Stand der Technik". Außer der Rückgewinnung der Ausgangsstoffe erhält nun auch die Wiederaufarbeitung von höherwertigen Serienprodukten, das Produktrecycling, eine größere Aufmerksamkeit, das in den USA unter den Bezeichnungen "Rebuilding" oder "Remanufacturing" schon seit längerem verbreitet ist (Steinhilper, Industrielle Demontage; ders., Der Horizont des Konstrukteurs). Der bisher vorwiegend handwerkliche Instandhaltungsbereich wird dadurch um einen industriellen Produktrecyclingssektor erweitert.

Insgesamt soll sich das Recycling von einer lediglich aufgesetzten End-of-pipe-Technologie, die vorwiegend in der Hand eines mittelständischen Entsorgungsgewerbes und der traditionellen Rohstoffwirtschaft liegt, zu einem regulären industriellen Aufarbeitungs-, Demontage- und Aufbereitungs-Sektor am Ende des Produktlebenszyklus entwickeln, der nach dem Vorbild der großindustriellen Fertigung strukturiert und betrieben wird. An die Stelle selektiver Ausschichtung soll zunehmend die vollständige maschinelle Demontage und eine möglichst sortenreine Stoffrückgewinnung treten. Mit Blick darauf wird die Demontagegerechtigkeit von Produkten nicht mehr an der einfachen manuellen Zerlegung gemessen, sondern analog zum montagegerechten Konstruieren ganz auf industrielle, möglichst automatisierte Demontagelinien zugeschnitten.²⁰ In Anlehnung an CAD/CAM und CIM-Ansätze wird neuerdings das Leitbild des "Computer Integrated Recycling (CIR)" als neue C-Technologie propagiert. Das so auf die Recyclings- und Entsorgungsphase ausgedehnte Produktmanagement soll sich zum "Life-Cycle-Management" erweitern (Steinhilper, Neue Branchenführer). Da die hierdurch entstandene Aufgabenkomplexität vom Entwickler und Konstrukteur mit der sequentiellen Vorgehensweise nach dem bisherigen Phasenmodell des methodischen Konstruierens nicht mehr zu bewältigen ist, wird das künftige recyclinggerechte Konstruieren als ein Teilproduktmodell des umfassenden rechnerinternen Produktmodells konzipiert und in den Ansatz des "Simultaneous Engineering" einbezogen (Beitz, Wende, S. 307 ff.). Darüber hinaus entstehen erste Konzepte für den Aufbau einer Entsorgungslogistik, die ebenfalls nach dem Muster der industriellen Logistik die Stoffflüsse optimieren und die Sekundär- und Tertiärrohstoffe wieder in die Herstellungsprozesse einschleusen soll (Barg, S. 64-74). Ziel dieser umfassenden Recyclingwirtschaft sind möglichst geschlossene Materialkreisläufe, die durch weitestgehende Mehrfachnutzung das Deponieaufkommen nachhaltig reduzieren.

²⁰ Vgl. Steinhilper, Produktrecycling im Maschinenbau; Eversheim, Hartmann, Linnhoff, Zukunftsperspektive Demontage, S. 83-86.

Wie der Deponierungsengpaß auf der einen Seite den Stellenwert und den Verbindlichkeitsgrad des recyclingorientierten Konstruierens erhöht und es in Richtung eines industriellen Entsorgungssektors gedrängt hat, so hat er auf der anderen Seite die Zielrichtung und die Schwerpunkte der Ressourcenorientierung bei Ingenieuren und Konstrukteuren deutlich verschoben. Die klare Priorität liegt nun, wie es auch die Neufassung der VDI-Richtlinie von 1991 darlegt, bei der Entsorgungsfunktion und der Vermeidung von "Deponielagerung", entweder durch Aufarbeitungsprozesse ganzer Produkte, durch die Altstoffverwertung oder durch die "thermische Nutzung". Die Einsparung von Rohstoffen (Werkstoffe, Energie) ist demgegenüber nur noch ein wichtiger Nebenaspekt, und konstruktive Maßnahmen zur Energierückgewinnung werden gar nicht mehr berücksichtigt (VDI-Richtlinie 2243, S. 2). Überhaupt ist in der Recycling-Debatte der letzten Jahre als Folge der vorrangigen Entsorgungsproblematik und des relativ niedrigen Energiepreinsniveaus eine Entkopplung des Materialverbrauchs- und -recyclings von dem Energieverbrauch bzw. der Energieeinsparung zu verzeichnen. Während die internationalen Kongresse zum Recycling in den 70er und der ersten Hälfte der 80er Jahre das "Material- und Energie-Recycling" noch gleichrangig behandelten, fehlt jetzt oft jeder Hinweis auf den hohen Energieaufwand für eine geschlossene Kreislaufwirtschaft.²¹

Ebenso gibt es im Vergleich zu den 70er und 80er Jahren kaum noch Forderungen, die auf eine Beseitigung der *Ursachen* des wachsenden Abfallberges zielen: Gestaltungsmaßnahmen zur generellen Verlängerung der Produktlebensdauer, Initiativen für eine Einschränkung von schnellen Produktwechselln bzw. von zu kleinen Innovationschritten und für eine Unterbindung von immer noch weitverbreiteten Obsoleszenzpraktiken spielen keine große Rolle mehr. Das "umweltgerechte Konstruieren" soll keine *Reduzierung* von Materialkreisläufen durch langlebige Produkte, sondern die ständige Wieder- oder Weiterverwendung der genutzten Produkte bzw. Stoffe garantieren: "Dabei muß die Lösung nicht zwangsläufig darin bestehen, die

Produkte so haltbar (und teuer) zu gestalten, daß sie nicht ersetzt werden müssen. Dies würde den technischen Fortschritt bremsen und wohl auch negative volks- und betriebswirtschaftliche Folgen haben. Statt dessen sollte angestrebt werden, daß ein Produkt nicht im Ursprungszustand weiter genutzt wird, sondern in recycelter Form mehrere schnelle und kostengünstige Nutzungskreisläufe durchläuft." (Witte, Stolze, S. 21). Ein solches permanentes Rezyklieren könnte demnach Vermeidungsstrategien, die nicht marktwirtschaftskonform sind, überflüssig machen. Es scheint auch die Lösung für eine Reihe von Problemen zu sein, die in der Gegen-

²¹ Vgl. Thomé-Kozmiensky, Recycling Berlin'79, Bd.1 über Energy Recycling, Bd. 2 über Material Recycling.

wart erheblich zu einem weiteren Anstieg des Deponiegutes und Shredderabfall-Aufkommens beigetragen haben:

- die aufgrund der Miniaturisierung und des Tradeoffs von Fertigungs- und Reparaturkosten vor allem im Elektro- und Elektronikbereich zu verzeichnende Zunahme nicht mehr reparierbarer Produkte,
- der Eintritt einst langlebiger Konsumgüter in den Modebereich (z.B. Möbel, Brillen) und
- der Übergang früher sehr lange genutzter Geräte der Kommunikations- und Bürotechnik (Telefone, Fernschreiber, Schreibmaschinen) zu den in der Mikroelektronik und Computertechnik üblichen, wesentlich kürzeren Produktlebenszyklen.

Die Recyclingwirtschaft wird auf diese Weise als Problemverlagerungs-Strategie einer ökologische Wachstumsgesellschaft konzipiert, die den Deponierungsengpaß beseitigt, die Rohstoffverfügbarkeit erhöht und so wieder eine Beschleunigung von Materialkreisläufen und Wirtschaftskreisläufen zuläßt. Das industrialisierte und logistisch durchorganisierte "Closed Loop Engineering" (Steinhilper, Neue Branchenführer) glaubt so, eine marktkonforme und doch ökologieverträgliche Kreislaufökonomie zu schaffen, die dem Ideal des "sustainable development" nahekommt. Während Ostwald seine "dauerhafte Wirtschaft" an die technisch aufschließbare Sonneneinstrahlung bandt und die ersten Vertreter der "sustainable society" bzw. des "sustainable development" von einer deutlichen Verlangsamung des Wachstums in Richtung einer "steady-state economy" ausgingen,²² glauben heutige Konzepte des recyclinggerechten Konstruierens meist auf wachstumshemmende Forderungen verzichten zu können.

Am Ende der bisherigen Entwicklung des ressourcensparenden Konstruierens steht damit erneut die Illusion der Möglichkeit *permanenter* geschlossener Wirtschafts- und Stoffkreisläufe. Zu Beginn war die Kreislaufmetapher der Ausdruck der naiven Erwartung in die Unerschöpflichkeit der Naturressourcen. Kritische Naturwissenschaftler und Ingenieure setzten dem Überfluß-Modell ewiger Kreisläufe das technikethische Gegenkonzept eines sparsamen Umgangs mit den Ressourcen nach dem Vorbild natürlicher Kreisläufe entgegen. Dieses ressourcenökonomische Leitbild erzielte jedoch nur in Phasen kriegswirtschaftlicher Mangelsituationen oder temporärer Rohstoffverteuerungen eine größere Resonanz. Für die Verfechter material- und energiesparender Gestaltungsansätze entstand dadurch ein kaum lösbares Dilemma. Mit weitergehenden, *absoluten* Sparstrategien, die nicht selten die Form technokra-

²² Dennis Clark Pirage (Ed.), *The Sustainable Society. Implications for Limited Growth*, New York, London 1977; R.Kerry Turner, *Sustainable Environmental Management. Principles and Practice*, London, Boulder, Col. 1988, S. 1-25.

tischer Gesellschaftsentwürfe annahmen, gerieten sie schnell in Konflikt mit dem herrschenden Wirtschaftssystem. Begnügten sie sich dagegen mit *relativen* Sparkonzepten und Problemverlagerungsstrategien, die mit dem industriellen Kapitalismus konform gingen, so beförderten sie mit den angestoßenen stofflich-energetischen Hegungsprozessen und den erzielten Wirkungsgradsteigerungen nach überwundenen Engpaßsituationen in der Regel auch noch die Marktausweitung und mit ihr den absoluten Ressourcenverbrauch.

Während in der Vergangenheit das Interesse der Konstrukteure an Ressourcenaspekten mit dem Ressourcenangebot und -mangel schwankte, so scheint in der Gegenwart die Deponie- und Immissionsproblematik dem Leitbild kreislauforientierter Technikgestaltung und Techniknutzung endgültig zum Durchbruch verholfen zu haben. Doch mit seiner zunehmenden Durchsetzung droht das Sparkonzept des Recycling erneut in das Überfluß-Modell ewiger Stoff- und Wirtschaftskreisläufe umzukippen. Dabei abstrahieren die Recyclingwirtschaft und das "Closed Loop Engineering" wie die Kreislaufmetapher überhaupt davon, daß nach jedem Stoffzyklus die Materialqualität abnimmt, daß es sich also meist nicht um *Recycling*, sondern um *Downcycling* handelt, das mit Verzögerung doch das Deponiegut vermehrt. Vor allem aber verdrängen die Vertreter des recyclingorientierten Wachstums, daß der zyklische Charakter der Stoffflüsse nur auf Kosten der Energieressourcen möglich ist, d.h. allein um den Preis der Entropieerhöhung im Gesamtsystem. Der Entropiesatz stellt somit noch immer die grundlegendste Infragestellung der Illusion ewiger Kreisläufe in Technik und Wirtschaft dar. Mit ihm können Ingenieure und Naturwissenschaftler, ohne gleich in technokratische Totalkonstruktionen der Welt verfallen zu müssen, deutlich machen, daß eine Beschleunigung der Stoffumläufe durch Recycling die Probleme in den Energiesektor verlagert, daß es mitthin zum Modell einer absolut rohstoff-sparenden und abfallarmen Kreislauf-Wirtschaft keine Alternative gibt, auch wenn sich selbst dann die Entropiezunahme nur verlangsamen läßt.

LITERATUR

- Barg, A.: Recyclinggerechte Produkt- und Produktionsplanung, in: VDI-Z 133 (1992) 11, S. 64-74
- Beitz, W. ; Meyer, H.: Untersuchungen zur recyclingfreundlichen Gestaltung von Haushaltsgroßgeräten, in: Konstruktion 33, (1981) Teil 1: H. 7, S. 257-262; Teil 2: H.8, S.305-315
- Beitz, W.; Wende, A.: Konzept für ein recyclingorientiertes Produktmodell, in: Recycling. Eine Herausforderung für den Konstrukteur. Tagung Bad Soden November 1991, in: VDI-Berichte 906, Düsseldorf 1991, S. 307-321
- Braess, H.-H.: Berücksichtigung von Recycling-Problemen bei der Konstruktion. Vortrag auf dem 1. Recycling-Congress, Heidelberg 1974
- Clausius, R.: Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, Braunschweig 1867
- Clausius, R.: Über die Energievorräte der Natur und ihre Verwertung zum Nutzen der Menschheit (Bonn 1885), neu hrsg. von Otto Krätz, in: Chemie: Experiment + Technologie, 3 (1977) 9, S. 225-330
- Dienel, H. L.: Herrschaft über die Natur? Naturvorstellungen deutscher Ingenieure 1871-1914, Stuttgart 1992
- Erkens, A.: Auswirkungen der Rohstofffragen auf die Gestaltung, in: Maschinenbau - Der Betrieb, 14 (1935), H.23/24
- Eversheim, W.; Hartmann, M.; Linnhoff, M.: Zukunftsperspektive Demontage. Ganzheitliche Produkt- und Anlagenplanung als Voraussetzung, in: VDI-Z 134 (1992) 6, S. 83-86
- Gabor, D. u.a.: Das Ende der Verschwendung. Zur materiellen Lage der Menschheit. Ein Tatsachenbericht an den Club of Rome, Stuttgart 1976
- Garbe, E.; Salomon, D.: Recyclinggerechtes Konstruieren. Erfordernis moderner Produktgestaltung, in: VDI-Z 131 (1989), 4, S. 79-83
- Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law and the Economic Process, Cambridge, Mass. 1971
- Grashof, F.: Über die Wandlungen des Arbeitsvermögens im Haushalt der Natur und der Gewerbe, Berlin 1877
- Hartmann, M.; Lehmann, F.: Demontage Teil 1: Grundlagen, in: VDI-Z 135 (1993), 1/2, S. 100-110
- Hellige, H. D.: Leitbilder und historisch-gesellschaftlicher Kontext der frühen wissenschaftlichen Konstruktionsmethodik, artec-Paper Nr. 8, Januar 1991
- Hellige, H. D.: Hierarchische Ablaufsteuerung oder kooperative Bewältigung von Problemzusammenhängen? Zur Geschichte von Modellen des Konstruktionsprozesses, in: W. Müller (Hrsg)
- Jorden, W.; Weege, R.-D.: Recycling beginnt in der Konstruktion, in: Konstruktion 31 (1979), 10, S. 381-387
- Jorden, W.: Konstruieren recyclinggerechter Produkte mit der neuen Richtlinie VDI 2243, in: Recycling. Eine Herausforderung für den Konstrukteur. Tagung Bad Soden November 1991, in: VDI-Berichte 906, Düsseldorf 1991, S. 23-41;
- van den Kroonenberg, H. H.: The Role of Design Education in Non-Waste Technology, in: Non-Waste Technology and Production, Proceedings of an International Seminar Paris Nov./Dez. 1976, United Nations 1978, S. 583-599
- Layton, E. D. jr.: The Revolt of the Engineers. Social Responsibility and the American Engineering Profession, Cleveland, London 1971

- Ludwig, K. H.: Der VDI als Gegenstand der Parteipolitik 1933-1945, in: Technik, Ingenieure und Gesellschaft. Geschichte des Vereins Deutscher Ingenieure 1856-1981, hrsg. von K.-H. Ludwig und W. König, Düsseldorf 1981, S. 436-414 (Beiträge zur "Rohstofffreiheit")
- Martinez-Alier, J.: Ökologische Ökonomie und Verteilungskonflikte aus historischem Blickwinkel, in Frank Beckenbach (Hrsg), Die ökologische Herausforderung für die ökonomische Theorie, Marburg 1992, S.45-62
- Meadows, D. u.a.: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Stuttgart 1972
- Meyer, H.: Recyclingorientierte Produktgestaltung, in: VDI-Z 125 (1983) 19, S. 779-782
- Meyer, H.; Beitz, W.: Konstruktionshilfen zur recyclingorientierten Produktgestaltung, in: VDI-Z 124 (1982) 7, S. 255-267
- Moellendorff, W. von : Das technische Motiv, in : Die Zukunft 85 (1913), S. 414-420
- Moellendorff, W. von : Deutsche Gemeinwirtschaft, Berlin 1916
- Moellendorff, W. von : Wirkungsgrad, in: Zeitschrift des VDI(Z-VDI) 64 (1920), S.853 ff.
- Optimale Rohstoffnutzung. Eine Aufgabe für den Ingenieur, Deutscher Ingenieurtag, Hamburg 1977, VDI-Berichte 277, Düsseldorf 1977
- Ostwald, W.: Der energetische Imperativ. 1. Reihe, Leipzig 1912, Aufsatzsammlung über monistische Bewegung
- Ostwald, W.: Die Energie, Leipzig 1908
- Pahl, G.: Material- und energiesparende sowie die recyclinggerechte Gestaltung durch methodisches Konstruieren, in: Optimale Rohstoffnutzung - eine Aufgabe für den Ingenieur, VDI-Berichte 277, Düsseldorf 1977, S. 1-7
- Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Handbuch für Studium und Praxis, Berlin, Heidelberg, New York 1977; 2.Auflage 1986, S.340-345; 3. Aufl. 1993, S. 415-432
- Pearce, D. W.; Walter, I.: Resource Conservation. Social and Economic Dimensions of Recycling, London, New York 1977
- Pfeiffer, W.; Schultheiß, B.; Staudt, E.: Recycling-Systemtechnischer Ansatz zur Berücksichtigung von Wiederverwendungskreisläufen in der langfristigen Unternehmensplanung, in: Günther Ropohl (Hrsg.), Systemtechnik. Grundlagen und Anwendung, München-Riem 1975
- Rathenau, W.: Deutschland Rohstoffversorgung (Dezember 1915), in: ders. Gesammelte Schriften, Bd. V, Berlin 1925
- Reimer, H.: Müllplanet Erde, Hamburg 1971
- Rifkin, J.: Entropie. Ein neues Weltbild, Hamburg 1982
- Salomon, D.: Recyclinggerechte Konstruktion. Ansätze zur Methodik und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, in: Konstruktion 42 (1990), S. 405-409
- Schenkel, W.: Recyclinggerechtes Produzieren - welche Bedingungen werden diese Entwicklung fördern, in: Recycling. Eine Herausforderung für den Konstrukteur. Tagung Bad Soden November 1991, in: VDI-Berichte 906, Düsseldorf 1991, S. 1-21
- Steinilper, R.: Industrielle Demontage von Serienprodukten. Praxis und Perspektiven, in: Recycling. Eine Herausforderung für den Konstrukteur. Tagung Bad Soden November 1991, in: VDI-Berichte 906, Düsseldorf 1991, S. 103, 125
- Steinilper, R.: Produktrecycling im Maschinenbau. Berlin, Heidelberg, New York 1988;
- Steinilper, R.: Der Horizont des Konstrukteurs bestimmt den Erfolg beim Recycling, in: Konstruktion 42 (1990), S. 396-404

- Stephan, G.: Ökologisch-orientierte Wirtschaftsforschung heute: Was kann ein entropie-theoretischer Ansatz leisten?, in: Frank Beckenbach (Hrsg), Die ökologische Herausforderung für die ökonomische Theorie, Marburg 1992, S.323-340
- Thomé-Kozmiensky: Recycling Berlin' 79, 2 Bde., Berlin 1979 (Bd.1 über Energy Recycling, Bd. 2 über Material Recycling).
- VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2243, Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte, Entwurf, Erstausgabe Dezember 1984, Überarbeitung Mai 1991
- Warnecke, H. J.; Steinhilper, R.: Instandsetzung, Aufarbeitung, Aufbereitung: Recyclingverfahren und Produktgestaltung, in: VDI-Z 124 (1982) 20, S. 751-758
- Waste in Industry: by the Committee on Elimination of Waste in Industry of the Federated American Engineering Societies, New York 1921, Reprint 1974
- Weege, R.-D.: Recyclinggerechtes Konstruieren, Düsseldorf 1981
- Witte, K. W., Stolze, S.: Produkte im Nutzungskreislauf. Die Konstruktion legt den Grundstein, in: VDI-Z 135 (1993) 1/2. S. 20-25
- Wögerbauer, H.: Werkstoffsparen. Die technischen Zusammenhänge, Widerstände und Fortschritte, in: Maschinenbau - Betrieb 19 (1940) 8, S. 321-324
- Wögerbauer, H.: Werkstoffsparen in Konstruktion und Fertigung, in: Werkstoffsparen, Heft 1, VDI Berlin 1940
- Wögerbauer, H.: Werkstoffumstellung bei Fernmeldegeräten. Grundsätzliche konstruktive Überlegungen zur Umstellung der rein mechanisch beanspruchten Bauteile, in: Elektrotechnische Zeitschrift 61 (1940) 49, S. 1104-1111
- Wögerbauer, H.: Sparstoffe im Feingerätebau, in: Feinmechanik und Präzision 48 (1940) 14, S. 151-156
- Wögerbauer, H.: Werkstoffsparen auch in Zukunft, in: Rundschau Deutscher Technik, 26.9.1940
- Wögerbauer, H.: Werkstoffumstellung im Maschinen- und Apparatebau. Zur VDI-Vortragsreihe in Berlin im Oktober 1940, in: Monatsblätter des Berliner Bezirksvereins Deutscher Ingenieure, Berlin 1940, 1.10., Nr. 10
- Wögerbauer, H.: Leitgedanken einer konstruktiven Systematik der Werkstoffe, in: Fernmeldetechnik, Werk- und Gerätebau 21 (1940) 2, S. 17-22
- Wögerbauer, H.: Werkstoffsparen ist nationale Pflicht, in: Völkischer Beobachter, Wiener Ausgabe, 17.10.1940, Zit nach Manuskript im Nachlaß
- Zellentin, G.; Nonnenmacher, G.: Abschied vom Leviathan. Ökologische Aufklärung über politische Alternativen, Hamburg 1979