Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie

H. Schaefer

Zusammenfassung

Vorschläge und Diskussionen über die Nutzung von Abwärme und vor allem von Kraftwerksabwärme haben heute eine besondere Bedeutung. Dabei werden aber - ganz abgesehen von den ökonomischen Fragen - die ausschließlich technischen Probleme oft falsch eingeschätzt und interpretiert. Das erklärt sich zum einen Teil schon aus der Unkenntnis der definitorischen Abgrenzung der Begriffe. Deshalb wird im folgenden ein Begriffs- und Definitionsschema angesprochen, das eine einheitliche systematische Betrachtung von energetischen Prozessen ermöglichen soll unter Einfluß der Gesichtspunkte, die für eine Nutzung von Abfallenergien notwendig sind.

Wegen der zahlreichen Wechselwirkungen und Verknüpfungen zwischen Energieumwandlung und -anwendung ist es zwingend notwendig, beide Bereiche gemeinsam in einer ganzheitlichen Schau zu betrachten. Das bietet sich ohnehin an, da in beiden Bereichen eine einheitliche Schematisierung der Energieströme möglich ist. Der eigentliche Unterschied besteht in den verschiedenen Zielen der technischen Prozesse, um derentwillen Energie eingesetzt wird. Technische Prozesse im Energiesektor haben das Ziel, Primärenergieträger zu gewinnen und aufzubereiten oder Sekundärenergieträger zu erzeugen bzw. Primärenergieträger in solche umzuwandeln. Die jeweilige Art und Sorte der von diesen Prozessen als gewünschtes Ergebnis gelieferten Energieträger ist Zielenergie im Sinne dieser Prozesse.

Naturgesetzliche Bedingungen für Energieumwandlungsprozesse

Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik oder das Gesetz von der Erhaltung der Energie wurde 1842 etwa gleichzeitig von dem Heilbronner Arzt Robert Mayer und dem englischen Bierbrauer und Physiker James Prescott Joule in der heute bekannten Form angegeben. Danach kann Energie niemals verloren gehen noch erzeugt werden, sondern lediglich in andere Formen umgewandelt werden.

Deshalb sind die im Alltag weithin gebräuchlichen Ausdrücke „Energieerzeugung", „Energieverbrauch" und „Energieverlust" mißverständlich. Wenn auch am allgemeinen Sprachgebrauch diesbezüglich nichts zu ändern sein wird, so sollte doch stärker bewußt werden, was mit Begriffen wie „Energieverbrauch" oder „Energieverlust" eigentlich gemeint ist, nämlich die bei allen natürlichen und technischen Umwandlungsprozessen durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik oder das Gesetz des Geschehens bedingte naturgesetzliche Abwertung von Energie und damit eine vollständige oder teilweise Einbuße ihrer Umwandlungsfähigkeit. Daraus erwächst die Triebkraft für alle natürlichen und technischen Prozesse, ohne die sie nicht ablaufen könnten.

Eine solche Abwertung von Energie kann unter keinen Umständen in sich, d.h. ohne weitere Energieumwandlungen und somit Energieabwertungen einer anderen Energie rückgängig gemacht werden, d.h. sie ist unumkehrbar oder irreversibel.

Jede erfolgte Umwandlung und damit verbundene Abwertung einer Energie verkleinert deren Fähigkeit zu weiterer Umwandlung. Der Zustand, der sich einstellt, wenn die Energie am Ende einer Umwandlungskette zu keiner weiteren Umwandlung mehr fähig ist, wird als Gleichgewichtszustand, im englischen Schrifttum viel zutreffender als „dead State" (lebloser Zustand) bezeichnet. Die umgewandelte Energie ist vollständig entwertet und als wertlose Abwärme z.B. der inneren Energie der Umgebung einverleibt. Als „Umgebung" wird dabei ein Teil unserer Umwelt mit so großen Ausmaßen angesehen, daß deren Temperatur und Druck durch die Entsorgung der Abwärme nicht verändert werden können. Umgebung in diesem Sinne sind Boden, Wasser und Luft. Je nach Standort, Jahreszeit usw. können dabei sehr unterschiedliche „Umgebungsbedingungen" vorliegen, so daß die Umwandlungsfähigkeit der Energie in technischen Prozessen auch immer davon abhängt, in welcher

„Umgebung" der Prozeß abläuft.

Energieumwandlung und Energiedienstleistung

Der Mensch als Nutzer einer Energie ist meist gar nicht an ihr selbst, sondern an dem mit ihr zu erzielenden Nutzeffekt interessiert. Dieser kann z.B. darin bestehen, einen Aufenthaltsraum angenehm zu konditionieren, d.h. in einem zu heizenden oder zu kühlenden Raum eine von der Außentemperatur verschiedene Raumtemperatur einzustellen und zu halten oder Personen bzw. Lasten von einem Ort zu einem anderen zu transportieren durch Zerspanen bzw. Verformen oder durch Erwärmen eine gewünschte Veränderung an bzw. in einem Werkstück hervorzurufen.

Für den Nutzer einer Energie ist die von ihm in Form von den Nutzenergien Wärme, Arbeit, Licht oder Nutzelektrizität umgesetzte Energie kein Zweck an sich, sondern Bestandteil einer „Energiedienstleistung". Diese kommt zustande

- durch den einmaligen Verbrauch von Energieträgern im Sinne der Entwertung der dabei eingesetzten Energien, und
- durch den vielfachen Gebrauch eines langlebigen Energiewandlers, dessen Herstellung, Installierung, Wartung und Entsorgung nach Ende der Nutzungsdauer Aufwand an Rohstoffen und Energie verursacht.

Wieviel Energie für eine bestimmte Energiedienstleistung benötigt wird, hängt von der Art der eingesetzten Energieträger und der Effizienz der energietechnischen Anlage ab, darüber hinaus aber noch von einer Vielzahl anderer, meist nichttechnischer Faktoren, wie z.B. menschliche Ansprüche und Verhaltensweisen.
Zum Teil haben die einen Energieumwandlungsprozeß beeinflussenden Größen substitutiven Charakter. So z.B. kann die zur Beheizung eines Raumes benötigte Heizenergie durch eine erhöhte Wärmedämmung, d.h. durch erhöhten Kapitaleinsatz, oder auch durch zeitweiliges oder ständiges Absenken der Raumtemperatur verringert werden. Wieviel Energie beispielsweise zur Beförderung von Personen erforderlich ist, hängt u.a. von der Wahl des Transportmittels und von der Reisegeschwindigkeit, aber auch von der Fahrweise ab.

Energieträger und deren Wertigkeit

Vorschläge und Diskussionen über die Nutzung von Abwärme und vor allem von Kraftwerksabwärme haben heute eine besondere Bedeutung. Dabei werden aber - ganz abgesehen von den ökonomischen Fragen - die ausschließlich technischen Probleme oft falsch eingeschätzt und interpretiert. Das erklärt sich zu einem Teil schon aus der Unkenntnis der definitorischen Abgrenzung der Begriffe. Deshalb wird im folgenden ein Begriffs- und Definitionsschema angesprochen, das eine einheitliche systematische Betrachtung von energetischen Prozessen ermöglichen soll unter Einschluß der Gesichtspunkte, die für eine Nutzung von Abfallenergien wichtig sind.

Wegen der zahlreichen Wechselwirkungen und Verknüpfungen zwischen Energieumwandlung und -anwendung ist es zwingend notwendig, beide Bereiche gemeinsam in einer ganzheitlichen Schau zu betrachten. Das bietet sich ohnehin an, da in beiden Bereichen eine einheitliche Schematisierung der Energieströme möglich ist. Der eigentliche Unterschied besteht in den verschiedenen Zielen der technischen Prozesse, um deretwillen Energie eingesetzt wird. Technische Prozesse im Energiesektor haben das Ziel, Primärenergieträger zu gewinnen und aufzubereiten oder Sekundärenergieträger zu erzeugen bzw. Primärenergieträger in solche umzuwandeln. Die jeweilige Art und Sorte der von diesen Prozessen als gewünschtes Ergebnis gelieferten Energieträger ist Zielenergie im Sinne dieser Prozesse. Demgegenüber werden beim Endenergieeinsatz primäre und/oder sekundäre Energieträger zur Erzeugung von Nutzenergie (Licht, Wärme, Kraft, Nutzelektrizität, Schall) eingesetzt. Das Ziel der energietechnischen Prozesse im Bereich des Endenergieeinsatzes ist die Fertigung von Stoffen und Gütern, das Erstellen von Dienstleistungen und das Erfüllen von Komfortbedürfnissen.

In allen Fällen handelt es sich bei den einzelnen Prozessen um Systeme mit definierbarem Bilanzraum, über dessen Grenzen Energie ein- und austritt und in denen Energiekreisläufe auftreten können.

Die einzelnen Begriffe werden im folgenden definiert und erläutert:

- *Zielenergie* ist der gewünschte Energieausstoß aus technischen Prozessen zur Gewinnung oder Erzeugung von Primär- oder Sekundärenergieträgern oder zur Nutzenergieerzeugung.

- *Eingesetzte Energie* umfaßt alle für einen betrachteten energetischen Prozeß notwendigen Endenergien.
- *Zugeführte Energie* ist die Gesamtheit der in ein System eintretenden Energie. Sie kann außer eingesetzter Energie auch Rückwärme, Abwärme und Umweltwärme enthalten.
- *Umwärme* ist jeglicher innerhalb des betrachteten Systems rückgeführter Wärmestrom. Dadurch vermindert sich bei gegebenem Bedarf für den Zielprozeß der erforderliche Umfang der zugeführten Energie.
- *Rückwärme* ist die aus Abwärmenutzung bzw. der Nutzung von Umweltwärme resultierende Energie, die einem Anwender bzw. Erzeuger zugeführt wird.
- *Abwärme* umfaßt alle das System verlassenden fühlbaren und latenten Wärmeströme einschließlich der Verluste, aber mit Ausnahme der erzeugten Zielenergie. Sofern und soweit Abwärme nicht durch Wärmerückgewinnung genutzt wird, geht sie an die Umgebung ab und ist dann Fortwärme.
- *Fortwärme* enthält alle an die Umgebung freigesetzten fühlbaren und latenten Wärmemengen aus anthropogenen Prozessen, die mit Energieumsatz verbunden sind. Die Fortwärme wird an die Umwelt abgegeben. Sie wird damit Bestandteil der Umweltwärme und kann dann als Fortwärme nicht mehr identifiziert werden.
- *Umweltenergie* umfaßt neben der Umweltwärme auch alle anderen Formen ständig verfügbarer Energien aus natürlichen Quellen (z.B. mechanische Energie, Strahlungsenergie usw.). Für die Umweltwärme ist in der Regel das Temperaturniveau der Umwelt der Bezugspunkt zur quantitativen Bestimmung.

Wir - die Verbraucher, unsere Gesellschaft - sind ingesamt Ursache der Fort- **und** Abwärme; denn letztlich geht aller anthropogener Energieumsatz in Fortwärme über. Selbst diejenige Energie, die sich bei der Stofferzeugung in chemische Bindungsenergie wandelt, wird beim Verbrauch bzw. Umsetzen der Stoffe, wenn auch unter Umständen mit großer zeitlicher Phasenverzögerung, wieder frei. Die im Hochofen unter Einsatz von Hochtemperaturwärme bewirkte Reduktion von Eisenoxid zu Roheisen wird beim Verrosten des Eisens wieder rückgängig gemacht. Dabei wird die chemische Bindungsenergie wieder als Wärme frei, die dann allerdings bei einem Temperaturniveau anfällt, das nur geringfügig über der Umgebungstemperatur liegt.

Gleichgültig, welche Anwendungstechnik man betrachtet, immer wird mit relativ hochwertiger Energie - also relativ hohem Exergieanteil - Nutzenergiebedarf gedeckt und dabei der gesamte Energieeinsatz auf relativ niederem Temperaturniveau, also auch mit relativ niederem Exergiegehalt, freigesetzt. So setzt sich z.B., wie *Tafel 1* zeigt, die hochwertige Energie in Form flüssiger Treibstoffe beim PKW im Stadtverkehr zu etwa 90% im Motor und den Kraftübertragungsgliedern in Wärme um. Nur etwa 10% werden als mechanische Energie an der Wirkstelle zwischen Rad und Straße wirksam und auch sie werden letztlich dabei in Wärme umgesetzt.

Tafel 1: Energiebilanz eines Kfz im Stadtverkehr

Eingesetzte Energie des Kraftstoffs	100%
Fühlbare und latente Energie im Abgas	40%
Energieabgabe des Kühlers	35%
Direkte strahlende und konvektive Wärmeabgabe	5%
Fahrenergie	10%

Eine besondere Stellung nimmt die Raumheizung ein. Bei ihr wird im strengen Sinne gar kein Nutzwärmebedarf gedeckt, sondern nur diejenige Wärmemenge dem Raum bzw. dem Gebäude wieder zugeführt, die entsprechend der Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur durch Transmissions- und Lüftungswärmeverluste an die Umgebung abgeführt wird.

Fortwärme wird schließlich also alles, was im vegetativen und technischen Bereich vom Menschen an Energie ein- und umgesetzt wird. Die Energieinhalte all dieser Abwärme werden in einheitlichen Maßen gemessen, jedoch können gleiche Energiemengen in ihrer Wertigkeit sehr verschieden sein. Die fühlbare Wärme im Rauchgas eines Dampfkessels im Kraftwerk kann man - und dies geschieht schon seit eh und je - vorzüglich zur Vorwärmung von Speisewasser und Verbrennungsluft nutzen, während die Abwärme einer Kondensationsturbine nur noch einen sehr geringen Exergiegehalt hat und bei Temperaturen anfällt, die eine Anwendung im Haushalt, Gewerbe und in der Industrie ausschließt

Über die Abwärmemengen, ihre Temperaturen und ihre Nutzungsmöglichkeiten bestehen in der Öffentlichkeit und auch bei vielen politischen Entscheidungsträgern

sehr unklare und zum Teil auch falsche Vorstellungen. Es soll daher im folgenden versucht werden, einige Hinweise auf die Wege und Möglichkeiten der Energierückgewinnung und auf die Fort- und Abwärmebilanz der Bundesrepublik Deutschland zu geben.

Maßnahmen, um Energie rationeller und sparsamer zu verwenden, lassen sich von den energietechnischen Wirkungsmechanismen in folgende Grundtypen unterscheiden:

- *Vermeiden unnötigen Verbrauchs:*
  Unnötiger Verbrauch entsteht durch Leerlauf von Maschinen und Anlagen, durch Überheizen von Räumen, Zapfen zu großer oder zu heißer Warmwassermengen usw. Er tritt also generell dann auf, wenn die Nutzenergieerzeugung keine zusätzliche Produktivität, Dienstleistung oder Komfortsteigerung erbringt. Hier ist mit technischen Mitteln wenig, mit Aufklärung des Einzelnen über grundlegende physikalische Verhältnisse dagegen recht viel zu erreichen.
- *Senken des spezifischen Nutzenergiebedarfs:*
  Eigentliche Ursache allen energietechnischen Handelns ist der Bedarf an den Nutzenergien Wärme, Licht, Kraft und Nutzelektrizität. Er tritt auf bei dem Wunsch, Räume zu temperieren oder zu beleuchten, Stoffe zu gewinnen, zu wandeln und zu formen, Güter zu erzeugen oder zu transportieren. Vor allem technische Maßnahmen können den Nutzenergiebedarf für bestimmte Zwecke noch reduzieren. Die Wahl energetisch optimaler Technologien, z.B. Trocknen mit mechanischer anstelle thermischer Energie, was den Energiebedarf je Kilogramm entzogenen Wassers auf ein Hundertstel verringert. Verdampfen unter Vakuum oder Kochen unter Druck, spanlos statt spanend Umformen, Kleben statt Schweißen, unter Druck anstelle thermischen Sterilisierens, günstige lichttechnische Gestaltung von Räumen sind weitere Beispiele in dieser Hinsicht. Auch die Werkstoffwahl kann den Energieaufwand sehr stark beeinflussen. Der Wechsel von einer Stahl- zu einer Aluminium-Karosserie bei einem Mittelklasse- Pkw erhöht wohl den kumulierten Energieaufwand für die Herstellung um etwa 28%, aber bei ganzheitlicher energetischer Wertung von Herstellung, Nutzung und Entsorgung zeigt sich, daß der gesamte kumulierte Energieaufwand nach 80.000 km Laufleistung wegen der von der Masse abhängigen Anteile der Fahrenergie günstiger wird.

Verbessern der energetischen Wirkungs- und Nutzungsgrade

Durch konstruktive Verbesserung von Maschinen und Anlagen, vor allem aber durch Einbezug moderner Mittel der Steuer- und Regelungstechnik, läßt sich der Nutzungsgrad der eingesetzten Endenergie verbessern. Auch der spezifische Energieverbrauch kann so in vielen Fällen noch erheblich gesenkt werden. Z.B. ergeben sich bei Antrieben für Lüfter und Pumpen, sofern variable Durchflußmengen gebraucht werden, durch eine Drehzahlstellung gegenüber der Drosselregelung Energieersparnisse, die bis zu 80% betragen können. Allerdings nehmen derartige Maschinen bei Nennbetrieb und Nenndrehzahl infolge des eigenen Bedarfs der Steller zwischen 5 und 8% mehr Leistung auf.

Sehr entscheidend für ein Verbessern der Nutzungsgrade ist die energetisch richtige Betriebsweise und der zweckmäßige Einsatz der vorhandenen Energietechniken. Bei allen energietechnischen Vorgängen ist ein oft erheblicher Teil des Energieaufwandes nicht von der Belastung abhängig, sondern wird nur durch die Größe und Art der Anlage oder Maschine bestimmt. Daher sinkt der spezifische Verbrauch mit steigender Belastung. Möglichst hohes Auslasten der Geräte und Anlagenkapazität sowie das Vermeiden von Leerbetriebs- und Pausenzeiten können den Nutzungsgrad entscheidend verbessern.

Wichtig ist auch, die installierten Geräteleistungen an den tatsächlichen Bedarf anzupassen. Dies gilt vor allem auch für Antriebe, bei denen Überdimensionierung nicht nur zu unnötig hohen Investitionskosten, sondern auch zu erhöhtem Energieaufwand führt.

Ein Beispiel für eine Steigerung der Nutzungsgrade bei der Energiewandlung ist die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme.

Energierückgewinnung

Bei der Energierückgewinnung handelt es sich in aller Regel um die Nutzung von Abwärme, die im Prinzip auf dreierlei Art möglich ist:

- Wärmerückgewinnung ohne gezielte Zufuhr von Exergie,
- Aufwertung von Abwärme niederer Temperatur in nutzbare Rückwärme durch

gezielte Zufuhr von Exergie,

Wandlung von Abwärme niederer Temperatur in Heizwärme durch Änderung des Zielprozesses.

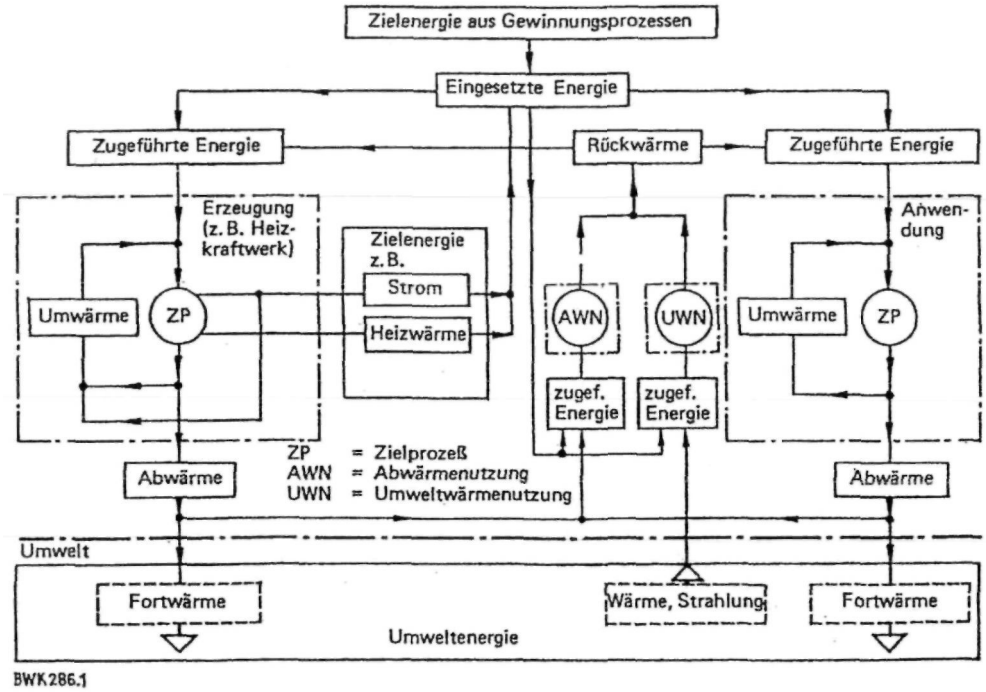


Bild 1: Begriffsschema zur Abwärmenutzung

BWK286.1
Bild 1: Begriffsschema zur Abwärmenutzung

Aus *Bild 1* ist der Aufbau der *Begriffssystematik* zu ersehen. Im linken Teil ist ein Heizkraftwerk mit den Zielenergien Strom und Heizwärme, im rechten Bildteil ein Prozeß aus dem Bereich des Endenergieverbrauchs dargestellt.

1) *Wärmerückgewinnung* (WRG) durch Wärmeübertragung ohne gezielte direkte Zufuhr von Exergie, jedoch in der Regel unter Einsatz von Hilfsenergie und der in ihr enthaltenen Exergie. Das Ergebnis der Wärmerückgewinnung ist zur Verfügung stehende Rückwärme, deren Exergie - und damit deren Temperaturniveau - im allgemeinen unter dem der Abwärme liegt.

2) *Abwärmeaufwertung* (AAW) von Abwärme mit niederer Temperatur in nutzba-

re Rückwärme durch gezielte Zufuhr von Exergie zum Zweck der Temperaturerhöhung, z B. durch den Einsatz von Wärmepumpen oder Brüdenverdichtern. Die aus der Abwärmeaufwertung gewonnene Rückwärme ist dann exergiereicher als die Abwärme.

3) *Abwärmewandlung* (AWW) wird durch Änderung oder Modifikation eines Zielprozesses im Erzeugungsbereich erreicht. Das Resultat ist eine Erhöhung der ausgebrachten Zielenergien unter gleichzeitiger Verringerung des Abwärmeanfalles. Am Beispiel des Vergleiches Kondensationskraftwerk - Heizkraftwerk soll dies diskutiert werden. Das Temperaturniveau der Kondensatorabwärme eines herkömmlichen Kondensationskraftwerkes reicht normalerweise für ihre Verwendung als Heizwärme nicht aus („Limnotherm" und „Agrotherm" gestatten die Anwendung von Kondensatorwärme bei üblicher Auslegung; diese Anwendungen substituieren jedoch keine anderen Energieträger).
Ändert man jedoch den Zielprozeß des Kraftwerks in der Weise, daß in Form einer Kuppelproduktion Strom und Heizwärme erzeugt werden, so enthält diese Heizwärme einen Anteil, der beim Zielprozeß der reinen Kondensations-Stromerzeugung als Abwärme anfallen und in Fortwärme übergehen würde. Im Sinne eines Vergleiches mit der ungekoppelten Kondensations-Stromerzeugung stellt somit die Kraft-Wärme-Kopplung eine Abwärmenutzung bei der Stromerzeugung dar. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß dabei der eigentliche Zielprozeß des Erzeugers ein anderer ist, was sich u.a. in Stromeinbuße bzw. zusätzlichem Brennstoffaufwand sowie in anlagentechnischen Änderungen äußert.

Jegliche Abwärmenutzung muß basieren auf einer detaillierten Analyse und sorgfältigen energetischen Überprüfung des Energieflusses und der Lastgänge derjenigen Prozesse, die Abwärme produzieren, sowie jener potentiellen Verbraucher, die die Abwärme verwerten sollen und können.

Die *Grenzen*, die *einer praktischen Abwärnienutzung* gesetzt sind, ergeben sich aus:

- dem *Temperaturniveau und der Art des Abwärmeanfalls.*
  Abwärme muß an einen oder wenige diskrete Stoffströme gebunden sein. Je höher das Temperaturniveau der Abwärme ist, umso einfacher und kostengünstiger läßt sie sich für eine weitere Nutzung zurückgewinnen.

In *Bild 2* ist die Abschätzung des Abwärmeanfalls bei der industriellen Prozeßwärme in der BRD dargestellt. Dabei wurde aufgeteilt nach diffuser und punktueller Abgabe der Abwärme und den Temperaturbereichen, in denen die Abwärme anfällt. Man sieht, daß für eine Abwärmeverwendung das maximal technische Potential bei 45% des gesamten Endenergieeinsatzes für industrielle Prozeßwärme liegt.

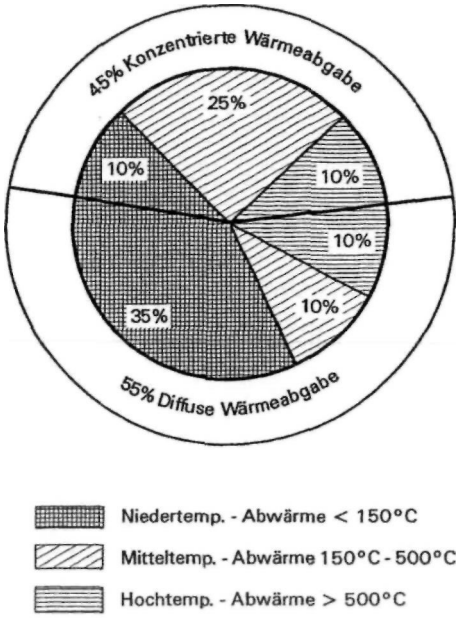


Bild 2: Struktur der industriellen Abwärme in

t ^ g ^ Mitteltemp.-Abwärme 150°C-50O°C

| | Hochtemp. - Abwärme > 500°C

Bild 2: Struktur der industriellen Abwärme in der BRD

dem *Zeitgang und der -datier des Abwärmeanfalls* und eines entsprechenden Wärmebedarfs:

Der Idealfall einer Übereinstimmung beider Leistungsgänge ist selten, sofern es sich nicht um Rückwärme aus derselben Anlage handelt. Folglich müssen oft Wärmespeicher eingesetzt werden, um die Zeitverschiebungen zwischen Wärmeangebot und -bedarf zu überbrücken.

Die jährliche Vollaststundenzahl von Wärmeanfall und -bedarf muß ausreichend

hoch sein, um den Aufwand für die entsprechende Anlagentechnik zu rechtfertigen.

- der *Komplexität der Anlagen.*
  Eine Abwärmenutzung kann dazu führen, daß die Anlagen und Systeme schwerer durchschaubar und betreibbar werden und spezielle Qualifikationen des Personals verlangen. Das ist einer der Gründe, wenn zwei- oder gar dreifache Zwischenüberhitzung in Dampfkraftwerken sich nicht durchsetzen kann.
- den *Umweltaspekten:*
  Abwärmenutzende Techniken können u. U. Umweltbelastungen auslösen, wie z.B. durch steigenden NOx-Gehalt im Verbrennungsabgas bei Luftvorwärmung infolge höherer Verbrennungstemperaturen.
  Die Abwärmenutzung aus Abwässern von Haushalten hat negative Wirkung auf Quantität und Qualität der biologischen Abwasserbehandlung.

Im Hinblick auf eine Abwärmenutzung gelten folgende *Prioritäten:*

1) der Abwärmeanfall sollte durch konstruktive und betriebstechnische Mittel bei der energetischen Gestaltung und Führung der Prozesse soweit minimiert werden, wie technisch und wirtschaftlich möglich; denn Abwärme vermeiden ist besser als jede Wärmerückgewinnung,
2) anfallende Abwärme einer bestimmten Anlage sollte, wenn immer es geht, in der gleichen Anlage wieder eingesetzt werden,
3) anfallende Abwärme industrieller Anlagen sollte möglichst im gleichen Betrieb wieder eingesetzt werden und
4) nur wenn die ersten drei Maßnahmen ausgeschöpft sind, sollte eine externe Verwendung industrieller Abwärme ins Auge gefaßt werden.

Unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten kommt also der Wärmerückgewinnung in externen Kreisläufen bzw. Kaskaden eine nachrangige Stellung zu gegenüber den direkten Möglichkeiten der Vermeidung unnötigen Energieverbrauchs, der Senkung des spezifischen Nutzenergiebedarfs und der Erhöhung der energetischen Nutzungsgrade.

Die modernen Techniken der Brüdenkompression sind ein Beispiel für primärenergetische Vorteile, die mit zusätzlichem Stromverbrauch erreichbar sind. Sie stehen im Wettbewerb zu konventionellen Systemen der Kraft-Wärme-Kopplung. Richtig

im und mit dem Gesamtsystem geplant führen sie zu einer hochmodernen Art eines Kraft-Wärme-Verbundes. Diesen Wandel machen die Daten von *Tafel 2* deutlich.

Tafel 2: Verminderung des Energieverbrauchs einer Zuckerfabrik durch den Einsatz von Brüdenkompressoren sowie einer Gasturbine für die Schnitzeltrocknung

	Auslegung der Zuckerfabrik	
	konventionell, KWK mit Gegendruckturbine	Brüdenverdichtung, Gegendnickturbine, Gasturbine für Schnitzeltrocknung
Prozeßparameter:		
• spez. Stromverbrauch	0,19 kWh/kg	0,35 kWh/kg
• Prozeßdampfbedarf	1,21 kWh/kg	0,84 kWh/kg
• Stromerzeugung Gegendruckturbine	0,19 kWh/kg	0,18 kWh/kg
• Stromerzeugung Gasturbine	-	0,17 kWh/kg
Brennstoffeinsatz für:		
• Schnitzeltrocknung 1)	0,61 kWh/kg	0,24 kWh/kg
• Dampferzeuger	1,63 kWh/kg	1,19 kWh/kg
• Gasturbine	-	0,57 kWh/kg
• gesamt	2,24 kWh/kg	1,99 kWh/kg
Einsparung	-	11,1%

- Alle Zahlenangaben bezogen auf ein kg Zucker
- Tageskapazität ca. 15000 t Rüben pro Tag (1070 t Zucker /d)

1) bei der Fabrik mit Gasturbine ist hier nur der Bedarf der Zusatzfeuerung ausgewiesen

Verglichen wird der Energieverbrauch einer mit Gegendruckdampfturbine ausgestatteten konventionellen Zuckerfabrik mit dem einer Zuckerfabrik, die mit Brüdenkompression und einer Gasturbine arbeitet, deren Abgase direkt für die Schnitzeltrocknung eingesetzt werden. Beide Fabriken sind mit Eigenanlagen ausgestattet, die auf eine vollständige Erzeugung des benötigten Stroms ausgelegt sind. Bei der konventionellen Fabrik, deren Energieverbrauchsstruktur in etwa dem Mittel in der

Kampagne 1990 entspricht, reicht dazu eine Gegendruckturbine mit einer Stromkennzahl von 0,16. Die Trocknung der Hackschnitzel erfolgt in einer direkt brennstoffgefeuerten Anlage, die 0,61 kWh Brennstoff pro kg Zucker benötigt. Durch den Einsatz der Brüdenverdichtung bei der Safteindickung und Kristallisation reduziert sich der Prozeßdampfbedarf von 1,21 kWh/kg auf 0,84 kWh/kg; der Stromverbrauch steigt von 0,19 kWh/kg auf 0,35 kWh/kg. Damit erhöht sich das Verhältnis von Strom- zu Prozeßdampfbedarf von 0,16 auf 0,41.

Da eine Gegendruckturbine selbst bei sehr hohen Frischdampfparametern eine solche Stromkennzahl nicht erreichen kann, wird die benötigte Stromerzeugung auf eine Gegendruck- und eine Gasturbine aufgeteilt, die Abgase der Gasturbine werden zur Schnitzeltrocknung herangezogen. Mit der gewählten Auslegung der beiden Stromerzeuger wird der Strombedarf während der Kampagne vollständig gedeckt, die Rückspeisung ins Netz minimiert und eine Endenergieersparnis von 11% erreicht.

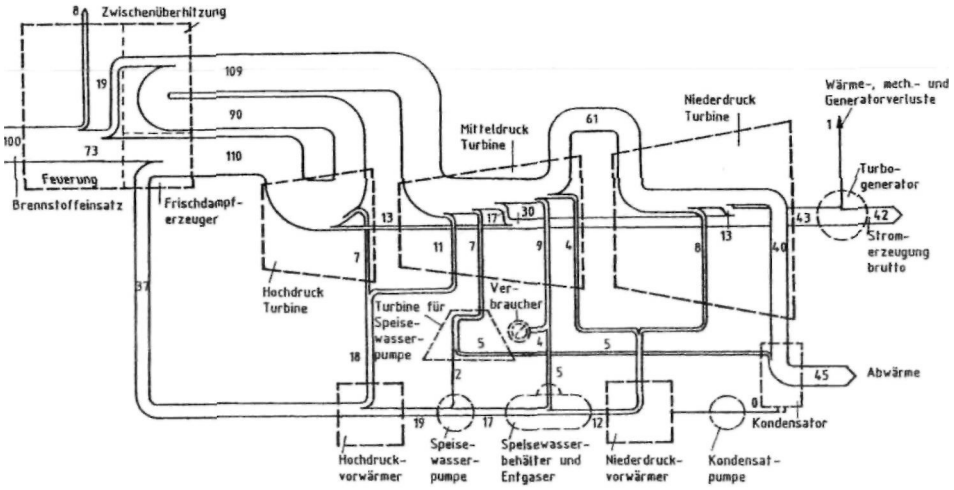


Bild 3: Energieflußbild eines Dampfkraftwerks (Zahlenwerte in %, bezogen auf den Brennstoffeinsatz)

Bild 3 zeigt den Energiefluß eines Dampfkraftwerkes mit einfacher Zwischenüberhitzung und einer mit einer Dampfturbine angetriebenen Speisewasserpumpe. Vom Brennstoffeinsatz, der zu 100% gesetzt ist, fallen 8% als Rauchgasverluste an, 45%

werden mit dem Kühlwasser des Kondensators abgeführt, 4% des Brennstoffs werden von internen Verbrauchern genutzt bzw. sind Oberflächenverluste an Turbinengehäusen, Rohrleitungen usw., 1% des Energieeinsatzes fallen als Generatorverluste an und 42% der Energie werden ins Netz geliefert. Aus dem Bild werden die vielfältigen Rückwärmeströme insbesondere durch die regenerative Speisewasservorwärmung zur Rückwärme deutlich.

Die Rückgewinnung mechanischer Energie zeigt *Bild 4* für ein Elektrofahrzeug bei einer Stadtfahrt. Es macht deutlich, daß von dem Anteil kinetischer Energie beim Bremsen durch generatorischen Betrieb der elektrischen Maschine, der über das elektrische System zurückgewonnen wird, letztlich nur etwa drei Viertel in die Batterie eingespeist werden

Eine besondere Art der energetischen Abfallverwertung tritt bei der Müllentsorgung auf. *Bild 5* zeigt den Vergleich des Kumulierten Energieaufwandes, das ist die ganzheitlich primärenergetisch bewertete Summe allen Energieaufwandes, für verschiedene Wege der Müllentsorgung. Die Angaben sind Mittelwerte und beziehen sich auf die Entsorgung einer Tonne Hausmüll.

Für die *klassische Müllentsorgung* entstehen folgende Aufwendungen:

Bereitstellung der Sammelbehälter	45 MJ/t
Verschleiß und Kraftstoffverbrauch der Lkw	260 MJ/t
Deponiebau, -führung und Rekultivierung	223 MJ/t

Die Entsorgung und Deponierung des häuslichen Abfalls verbraucht neben den 8500 MJ/t, die als stoffgebundener Energieaufwand (Heizwert) bereits in einer Tonne Müll enthalten sind, zusätzlich 528 MJ/t. Bei einer Deponiegasnutzung können über Gasmotoren ca. 1160 MJ/t zurückgewonnen werden.

Eine aus ganzheitlich energetischer Sicht bessere Müllentsorgung führt über die *Müllverbrennungsanlage.* Hier sind folgende Aufwendungen zu bilanzieren:

Bereitstellung der Sammelbehälter	45 MJ/t
Verschleiß und Kraftstoffverbrauch der Lkw	260 MJ/t
Deponiebau, -führung und Rekultivierung	74 MJ /t
Bau und Betrieb der MVA	349 MJ/t

Insgesamt entstehen energetische Aufwendungen von 728 MJ/t. Da der Heizwert des Mülls zur Wärme-Stromerzeugung genutzt wird, ergibt sich eine Nettogutschrift bei

der Müllverbrennung von rd. 4680 MJ/t.

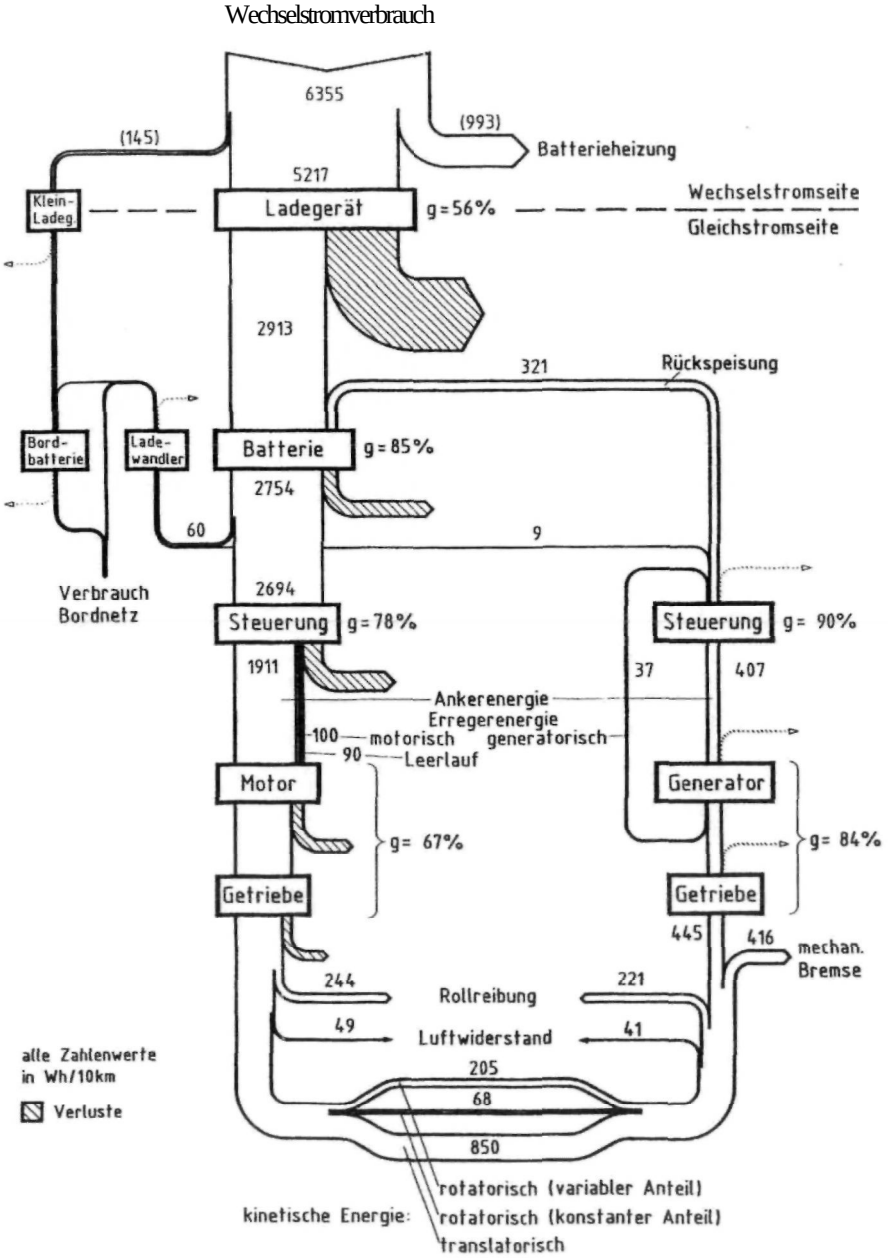
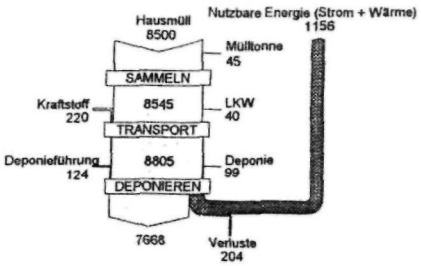
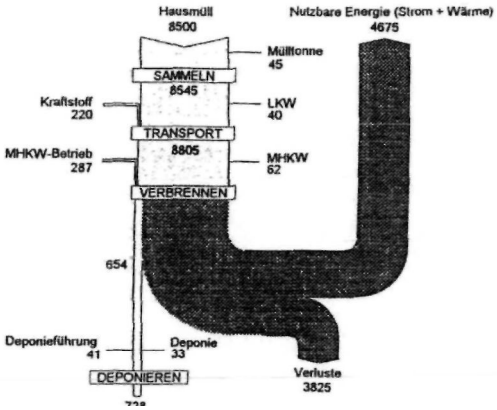


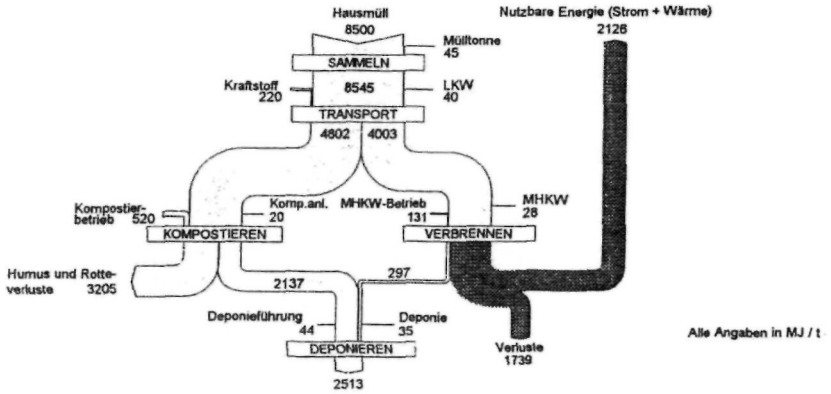
Bild 4: Energiebilanz eines Elektrofahrzeugs für eine Stadtfahrt



Müllabfuhr, Deponierung und Deponiegasnutzung



Müllabfuhr, energetische Nutzung und Deponierung der Schlacke



Müllabfuhr, **Kompostierung, energetische Nutzung und** Deponierung der Reststoffe

Bild 5: Vergleich des Kumulierten Energieaufwandes je t Hausmüll für verschiedene Wege der Entsorgung

Eine weitere Möglichkeit der Entsorgung von Hausmüll ist die *Kompostierung* der organischen Abfälle, die *Verbrennung* des Restmülls und die *Deponierung* der Schlacke. Dabei werden folgende Aufwendungen verursacht:

Bereitstellung der Sammellbehälter	45 MJ/t
Verschleiß und Kraftstoffverbrauch der Lkw	260 MJ/t
Bau und Betrieb der Kompostieranlage	540 MJ/t
Deponiebau, -fuhrung und Rekultivierung	79 MJ/t.

Die Nettogutschrift für Strom und Wärme liegt in diesem Fall bei rd. 2130 MJ/t.

Eine überschlägige Ermittlung des technischen Potentials nutzbarer Abwärme in der Bundesrepublik Deutschland läßt sich aus der Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf Verbrauchersektoren und Bedarfsarten, wie sie in *Bild 6* für die alten Bundesländer im Jahr 1992 dargestellt ist, ableiten.

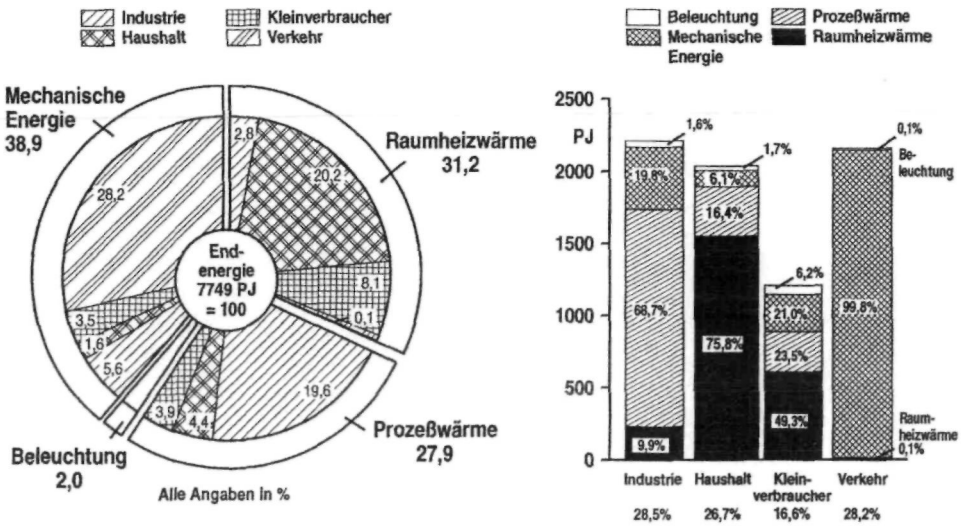


Bild 6: Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf Verbrauchersektoren und Bedarfsarien in den alten Bundesländern der BRD für 1992 (Quelle: VDEW/Frankfurt, IfE/TU München, GVSl/Essen; Aufbereitung: FfE/München)

Überschlägig treten gefaßte Abwärmeströme mit einem grundsätzlich nutzbaren Temperaturniveau im Bereich der Raumheizung mit einem Energieinhalt von etwa

15% des gesamten Endenergieverbrauchs, bei der Prozeßwärme von etwa 13% und beim Kleinverbrauch von etwa 3% auf. Die gefaßte Abwärme bei Absaugleuchten kann vernachlässigt werden. Insgesamt beträgt dieses grundsätzlich technisch nutzbare Potential etwa 30% des Endenergieeinsatzes. Von diesem Potential kann allerdings nur ein Teil realisiert werden, wobei nicht nur ökonomische Faktoren die Umsetzung begrenzen, sondern auch der Massen-, Flächen- und Energieaufwand für die notwendige Anlagentechnik Grenzen des sinnvoll Mach- und Vertretbaren stellt. Zudem darf nicht vergessen werden, daß von der freien Wärme in Gebäuden durch den Abwärmeanfall der Maschinen und Anlagen, der haustechnischen Geräte sowie durch die Menschen und durch die Einstrahlung solarer Energie ein nicht unbeträchtlicher Anteil des Raumheizwärmebedarfs, wenn auch ungesteuert, gedeckt wird und damit Endenergie substituiert. Die freie Wärme kann allerdings auch, insbesondere im Sommer, zu zusätzlichem Endenergieverbrauch fuhren, wenn eine Lüftung oder gar Kühlung notwendig wird.