

Vorlesungsabschnitte

- I. Aufgaben kommunaler Versorger**
- II. Technik der kommunalen Versorgung**
- III. Technik der kommunalen Entsorgung**
- IV. Ver- und Entsorgungskonzepte**
- V. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)**

I. Aufgaben kommunaler Versorger

- 1. Unternehmensaufgaben kommunaler Versorger im energiewirtschaftlichen Umfeld**
 - 1.1. Definition eines kommunalen Versorger im energiewirtschaftlichen Umfeld**
 - 1.2. Herkunft und Entwicklung**
 - 1.3. Gegenwärtiges rechtliches Umfeld**
- 2. Produkte und Dienstleistungen kommunaler Versorgungsunternehmen**
- 3. Organisations- und Rechtsform öffentlicher Unternehmen**
- 4. Die Elektrizitätsversorgungsstruktur in Deutschland**
- 5. Die öffentliche Gas- und Wärmeversorgungsstruktur**

II. Technik der kommunalen Versorgung

- 1. Wasserversorgung**
 - 1.1. Anforderungen an die kommunale Wasserversorgung**
 - 1.2. Der Wasserkreislauf**
 - 1.3. Gefährdung der Wasserversorgung**
 - 1.4. Ökologische Wasserwirtschaft**
 - 1.5. Wasserbestandteile und Qualitätsanforderungen**
 - 1.6. Wassergewinnung**
 - 1.7. Wasseraufbereitung**
 - 1.8. Wasserspeicherung und –verteilung**
 - 1.9. Wasserverbrauch, Wasserdienste**
 - 1.10. Die wichtigsten gesetzlichen Grundlagen**
- 2. Gas-(Erdgas-) versorgung**
 - 2.1. Einsatzmöglichkeiten von Erdgas**
 - 2.2. Gasversorgungstechnik**
 - 2.3. Gasverteilung**
 - 2.4. Gaswirtschaft**
 - 2.5. Arbeitssicherheit, Gesetze und Verordnungen**

- 3. Stromversorgung**
 - 3.1. Standbeine der konventionellen kommunalen Stromversorgung**
 - 3.2. Kraftwerkstechnik: Wärmekraftwerke**
 - 3.2.1. Physikalische Grundlagen**
 - 3.2.2. Dampfkraftwerke, Grundlagen**
 - 3.2.3. Technische Komponenten eines Dampfkraftwerkes**
 - 3.2.4. Maßnahmen zur Erhöhung des Kraftwerkwirkungsgrades**
 - 3.2.5. Das moderne Dampfkraftwerk**
 - 3.3. Gasturbinenkraftwerke**
 - 3.4. Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke**
 - 3.5. Kraft-Wärmekopplung**
- 4. Heizen und Kühlen**
 - 4.1. Thermodynamik des Heizens**
 - 4.2. Nah- und Fernwärmesysteme**

III. Technik der kommunalen Entsorgung

- 1. Abwasserentsorgung und -reinigung**
 - 1.1 Abwasserarten und -sammlung**
 - 1.2 Aufbau und Funktion einer konventionellen kommunalen Kläranlage (KKA)**
 - 1.3 Alternativen im ländlichen Bereich**
 - 1.4 Klärschlamm**
 - 1.5 Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer**
- 2. Abfallentsorgung**
 - 2.1 Hausmüllentsorgung**
 - 2.2 Entsorgung von organischen Abfällen und Bioabfällen**
 - 2.3 Sonderabfall-Entsorgungssysteme**
- 3. Recyclingtechnologien**
 - 3.1 Sammel-, Trenn- und Verwertungssysteme**
 - 3.2 Recycling von Bauabfällen**
 - 3.3 Altlastensanierung und Flächenrecycling**

IV. Ver- und Entsorgungskonzepte

- 1. Umfelddefinitionen**
 - 1.1. Versorgungskonzepte**
 - 1.2. Entsorgungskonzepte**

- 2. Versorgungskonzepte**
 - 2.1. Formulierung der Zielsetzung, Auswahl der Methoden zur Konzepterstellung und IST-Analyse des Betrachtungszeitraumes**
 - 2.2. Darstellung von Möglichkeiten zur Energieeinsparung/rationalen Energieverwendung und dem Einsatz regenerativer Energien**
 - 2.3. Ausarbeitung von Grobkonzepten und Umsetzungsempfehlungen**

- 3. Verbrauchsatlanten und Entsorgungsstrukturpläne**
 - 3.1 Wärmeatlas**
 - 3.2 Abfallatlas**

- 4. Energiestudien, Energiepläne**

- 5. Entsorgungskonzepte**

- 6. Umweltmanagement**
 - 6.1 EG-Öko-Audit**
 - 6.2 ISO 14000 ff. Umweltmanagement (UM) Normenreihe**
 - 6.3 Die Kommunalökologie**

V. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

- 1. Rolle des Verkehrs in urbanen Zentren**
 - 1.1 Geschichtliche Entwicklung des Personenverkehrs**
 - 1.2 Die aktuelle Situation im Personennahverkehr**
 - 1.3 Aspekte künftiger verkehrs- und städtebaulicher Maßnahmen**
 - 1.4 Neue Schwerpunkte in der Stadt- und Regionalplanung**

- 2. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) im Saarland**
 - 2.1 Aufgaben des ÖPNV (im Saarland)**
 - 2.2 Die Saarbahn**
 - 2.2.1 Chronik der Saarbahn**
 - 2.2.2 Zielsetzung der Saarbahn**

- 3. Techniken des ÖPNV**
 - 3.1 Der Omnibus**
 - 3.2 Die Straßenbahn**
 - 3.3 Die Stadtbahn**
 - 3.4 Der Nahverkehr der Bahn**
 - 3.5. Die Untergrund-Bahn**
 - 3.6 Liniengebundene Sonderformen**

- 4. Entwicklungsgeschichte von Bussen und Bahnen**
 - 4.1 Technische Entwicklung der Busse**
 - 4.2 Technische Entwicklungsgeschichte der Straßenbahn**

- 5. Neue technische Entwicklungen**
 - 5.1 Bussysteme**
 - 5.2 Straßenbahn**

6. Dienstleistung ÖPNV

- 6.1 Integraler Taktfahrplan**
- 6.2 Einheitliche Tarifstruktur**
- 6.3 Dynamische Fahrgastinformation**
- 6.4 Dynamische Anschlusssicherung**
- 6.5 Flexible Betriebsweisen**
- 6.6 Automatisierung und Rationalisierung**
- 6.7 Marketing**
- 6.8 Entwicklung der Fahrgastzahlen**



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

I. Aufgaben kommunaler Versorger

- 1. Unternehmensaufgaben kommunaler Versorger im energiewirtschaftlichen Umfeld**
 - 1.1. Definition eines kommunalen Versorgers im energiewirtschaftlichen Umfeld**
 - 1.2. Herkunft und Entwicklung**
 - 1.3. Gegenwärtiges rechtliches Umfeld**
- 2. Produkte und Dienstleistungen kommunaler Versorgungsunternehmen**
- 3. Organisations- und Rechtsform öffentlicher Unternehmen**
- 4. Die Elektrizitätsversorgungsstruktur in Deutschland**
- 5. Die öffentliche Gas- und Wärmeversorgungsstruktur**

I. Aufgaben kommunaler Versorger

1. Unternehmensaufgaben kommunaler Versorger im energiewirtschaftlichen Umfeld

1.1 Definition eines kommunalen Unternehmens

In den meisten mittleren und größeren Gemeinden Deutschlands und vieler anderer Staaten werden Grundgüter und Dienstleistungen, die für ein funktionierendes Gemeinwesen erforderlich sind, von kommunalen Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Ein Unternehmen ist dann als kommunal zu bezeichnen, wenn es sich ausschließlich oder mehrheitlich in der Hand einer Gemeinde oder eines Landkreises befindet ¹. Nach Artikel 28 des Grundgesetzes wird die kommunale Selbstverwaltung gesichert, und die Gemeinden haben das Recht, Versorgungsunternehmen zu betreiben.

Art. 28, Ab& 2 GG (Auszug):

Den Gemeinden muss das Recht gewährleistet sein, alle Angelegenheiten der örtlichen Gemeinschaft im Rahmen der Gesetze in eigener Verantwortung zu regeln...

Die kommunale Selbstverwaltung der Gemeinden nach dem Subsidiaritätsprinzip ist seit ca. 170 Jahren in Deutschland traditionell fest verankert (Kap. 1.2) ².

Das **Subsidiaritätsprinzip bedeutet**, dass Aufgaben, die Zwecken einer kleinräumigen Ordnungsform (z.B. einer Gemeinde) dienen, nicht von einer übergeordneten Stelle übernommen werden sollen.

¹ G. Püttner: Das Recht in der kommunalen Energieversorgung. Schriftenreihe des Vereins für Kommunalwissenschaften eV. Berlin. W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart 1967

² 10 Thesen zur Stellung der kommunalen Versorgungsunternehmen in Wirtschaft und Gesellschaft. Verband kommunaler Unternehmen VKU, 2. Auflage 1978

Einige Merkmale kommunaler Unternehmen²:

- Kommunale Versorgungsunternehmen werden von Städten und Gemeinden getragen. Sie erfüllen die öffentlichen Aufgaben der **Versorgung nach gemeinwirtschaftlichen Grundsätzen** unter bürgerschaftlicher Kontrolle durch gewählte Gemeindevertreter.
- Kommunale Versorgungsunternehmen sind den Zielen der **Stadtentwicklung** verpflichtet. Sie bieten deshalb die besten Voraussetzungen für die im Interesse aller Bürger und der Wirtschaft unerlässliche Abstimmung von Stadtentwicklung, Versorgungsplanung und Umweltschutz.
- Kommunale Versorgungsunternehmen arbeiten **bürgernah im überschaubaren Bereich der Gemeinden**. Sie haben besonders engen Kontakt zu ihren Kunden und können flexibel auf die besonderen örtlichen Verhältnisse eingehen (Voraussetzungen für Energiedienstleistungen siehe Kap. 2).
- Kommunale Versorgungsunternehmen bilden auch ihre **Preise unter Berücksichtigung gemeinwirtschaftlicher Grundsätze**. Überschüsse werden ausschließlich zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben verwendet.
- Kommunale Unternehmen waren vielfach Schrittmacher der technischen Entwicklung, insbesondere bei der Versorgung der Ballungsräume. Sie werden auch in der Zukunft für alle sich aus dem Wandel der technischen und ökonomischen Verhältnisse ergebenden Anforderungen sachgerechte Lösungen finden und oftmals eine Vorreiterrolle einnehmen.

1.2 Herkunft und Entwicklung

Die erste Aufgabe kommunaler Versorgungsunternehmen war die Gasversorgung:

In den Jahren zwischen 1830 und 1850 wurden in Deutschland nach englischem Vorbild die ersten Gaswerke gebaut (in Saarbrücken: 1856). Obwohl es neben der Gasbelieferung von Gewerbe und privaten Verbrauchern vor allem um die **Straßenbeleuchtung** ging, wagten sich die Städte nicht an die Gründung und

Inbetriebnahme eigener Unternehmen, sondern gaben erfahrenen (deutschen und englischen) Unternehmen eine **“Konzession“**, indem sie ihnen, zum Teil unentgeltlich, die Erlaubnis zur Verlegung der Rohre in den städtischen Gemeinden erteilten. Aufgrund schlechter Erfahrungen mit manchen Gesellschaften übernahmen die Städte jedoch bald die Gasversorgung in zunehmendem Umfang selbst oder gründeten sofort eigene Werke. Während im Jahre 1860 nur ein Viertel der Gaswerke in kommunalem Eigentum stand, waren es vor dem Ersten Weltkrieg bereits drei Viertel.

Als gegen Ende des 19. Jahrhunderts die Elektrizitätswerke errichtet wurden, verlief die Entwicklung ähnlich, nur dass sich die Städte sofort stärker engagierten. Bis zum ersten Weltkrieg waren in allen größeren Orten Gas- und Elektrizitätswerke vorhanden, und zwar überwiegend in kommunaler Hand.

Schon vor dem ersten Weltkrieg, besonders aber in der Weimarer Zeit, verloren die Ortswerke mehr und mehr ihre dominierende Stellung in der Energiebereitstellung, und die regionalen Großkraftwerke und Ferngasgesellschaften errangen das Übergewicht.

Auf diese Weise hat sich die heutige Struktur der Energiewirtschaft herausgebildet. Ein spezielles Gesetz über die Energieversorgung hat es bis 1935 nicht gegeben. Der Staat nahm mit hoheitlichen Mitteln kaum Einfluss. Die Städte verfügten damals wie heute über das zur Leitungsverlegung unerlässliche Straßennetz, so dass ohne ihre Einwilligung eine allgemeine Versorgung nicht durchgeführt werden konnte und kann (**“Wegerecht“**).

Die Gemeinde hatte und hat deshalb die Möglichkeit, sich im Wegeüberlassungsverträge (**Konzessionsvertrag**) alle Aufgabenbefugnisse und Genehmigungserfordernisse vorzubehalten, die zur Ordnung eines natürlichen Monopols der Energie- und Wasserverteilung und zur Wahrung der Disposition über das Straßenland erforderlich erscheinen. Ein solcher Konzessionsvertrag konnte und kann mit regionalen oder überregionalen Versorgungsunternehmen geschlossen werden, die die Versorgungsrechte und -pflichten wahrnehmen und dafür an die Kommune

Konzessionsabgaben zahlen. Die Konzessionsabgaben wurden erst nach dem ersten Weltkrieg im größeren Maße bekannt.

Statt der Überlassung an Fremdundertnehmen konnte und kann die Gemeinde jedoch das Unternehmen selbst führen und auf diese Weise den Anforderungen der öffentlichen Ordnung gerecht werden (Kap.I.1).

Auf die kommunale Aktivität gehen ebenfalls die heute nicht mehr existierende Gebietsabgrenzung (**Demarkation**) und der Gebietsschutz zurück; Grenzen der Versorgungsgebiete deckten sich gewöhnlich mit Gemeinde- oder Kreisgrenzen.

Was die wirtschaftlichen Ergebnisse der Versorgungsunternehmen in der Vergangenheit angeht, so erbrachten die meisten Unternehmen nach anfänglichem Risiko und manchen Rückschlägen dank ihrer relativen Monopolstellung bald erhebliche Überschüsse, welche die Städte aus ihren eigenen Unternehmen zur Entlastung des Gemeindehaushalts entnehmen konnten oder an denen sie wo konzessionierte Unternehmen tätig waren, allmählich im Wege der sogenannten Konzessionsabgaben zu partizipieren begannen.

1.3 Gegenwärtiges rechtliches Umfeld

Grundlage der leitungsgebundenen Energiewirtschaft ist das Energiewirtschaftsgesetz. Das erste Energiewirtschaftsgesetz wurde 1935 erlassen und hatte bis 1996 Gültigkeit. Grundgedanke dieses Gesetzes war der Schutz von Energieversorgungsunternehmen, um eine sichere Versorgung der Bevölkerung zu gewährleisten. Die Versorgung erfolgte in abgegrenzten Gebieten (Demarkation), die Versorgungsunternehmen hatten in ihrem Bereich eine Monopolstellung. Die meisten Versorgungsunternehmen waren „vertikal integriert“, d. h. die Wertschöpfungsstufen Energieproduktion (Kraftwerke), Verteilung (Transport- und Verteilungsnetze) und Vertrieb (Kundenabrechnung) waren in einem Unternehmen zusammengefasst, zwischen den einzelnen Bereichen konnte ein ungehinderter Informationsaustausch stattfinden.

Aufgrund der Vorgaben der europäischen Kommission zur Deregulierung des Energiemarktes wurde 1996 ein neues Energiewirtschaftsgesetz erlassen, das einschließlich zweier Änderungen in 2003 und 2005 nunmehr die Basis der deregulierten Energieversorgung darstellt. Wesentliches Merkmal des neuen Energierechts ist der Wettbewerb. Die Kunden, also die Verbraucher, können sich ihren Energieversorger (Strom, Gas) selbst aussuchen, die Monopolstrukturen wurden aufgehoben und die vertikale Integration der Unternehmen durch das „Unbundling“ ersetzt. Neben dem reinen Energiewirtschaftsgesetz und den zugehörigen Verordnungen (Netzzugangsverordnung, Netzentgeltverordnung u. ä.) sind zukünftig auch in stärkerem Maße das Kartellrecht sowie die Gesetze über die Erneuerbaren Energien (EEG – Erneuerbares Energie Gesetz) und die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Gesetz) maßgebend.

Systematik des neuen Energierechts :

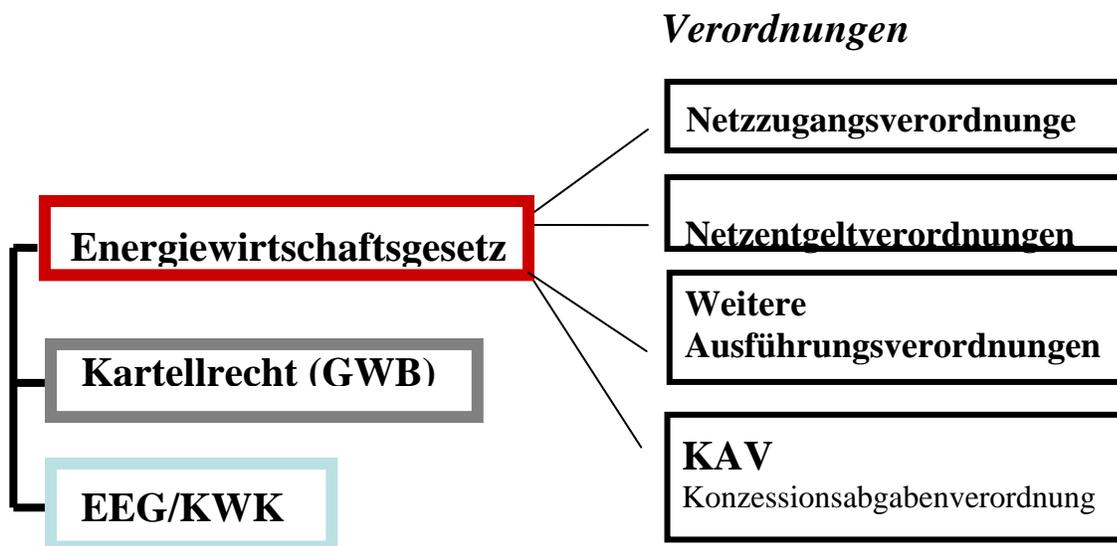


Abb. 1 Systematik des Energierechts

Die Welt der Energieversorgung und insbesondere der Energieversorgungsunternehmen hat sich durch diesen Paradigmenwechsel grundlegend geändert. Durch das Unbundling werden die Wertschöpfungsstufen organisatorisch und bei größeren

Unternehmen sogar gesellschaftsrechtlich getrennt. Der Informationsaustausch zwischen Netzbetreiber und Produzent bzw. Händler wird strikt unterbunden. Ein vollständiger Wettbewerb auf dem Sektor der leitungsgebundenen Energien ist allerdings aufgrund der technischen Gegebenheiten nicht möglich, da die vorhandene Elektrizitäts- bzw. Gasnetze „natürlich“ Monopole darstellen. Die Gesetze und Regelungen müssen daher gewährleisten, dass alle Teilnehmer am Markt einen „diskriminierungsfreien Zugang“ zu diesen Netzen haben. Dies wird durch die Einrichtung einer Regulierungsbehörde (Bundesnetzagentur – BNA) gewährleistet, die sowohl das Unbundling als auch den diskriminierungsfreien Zugang überwacht. (Anmerkung: Der wesentliche Unterschied zur Telekommunikation besteht darin, dass in der Energieversorgung keine Parallelnetze aufgebaut werden, wie dies insbesondere durch die Entwicklung der Handy-Technik möglich war).

Unbundling:

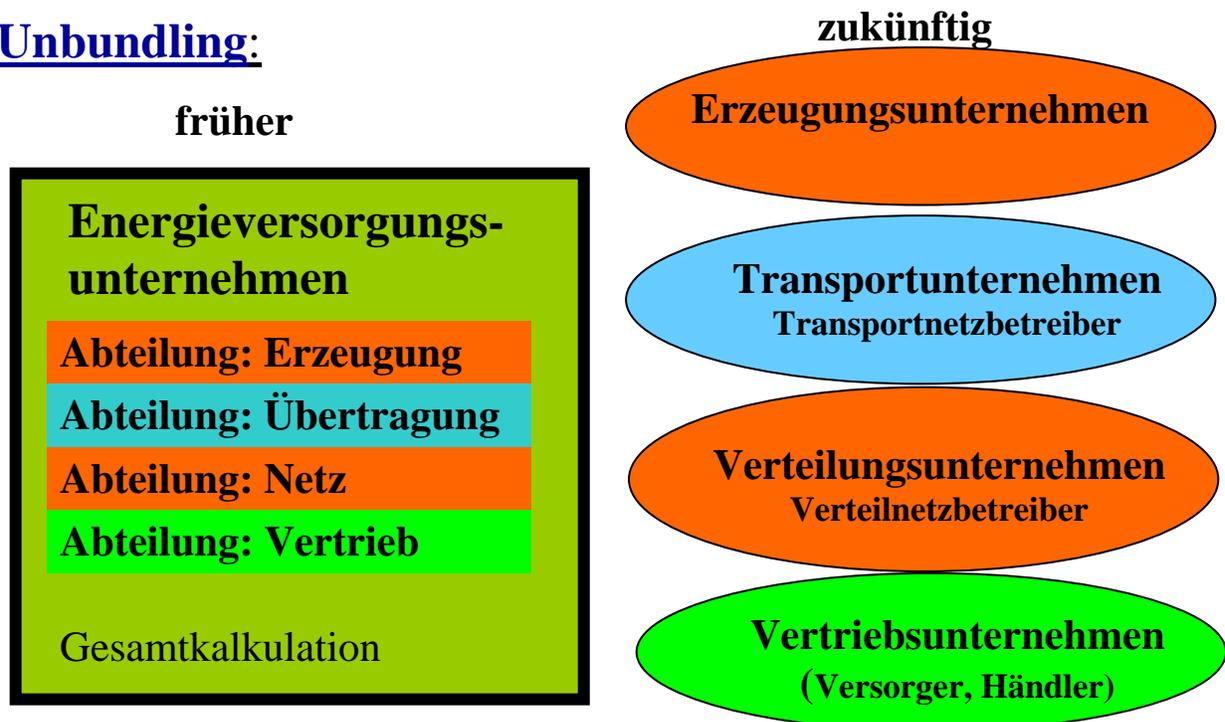


Abb. 2 Unbundling

Die Energienetze können daher als „regulierte Monopole“ betrachtet werden. Wesentliche Instrumente zur Regulierung sind die Netzzugangsverordnungen und die

Netzentgeltverordnung. In der Netzzugangsverordnung ist festgelegt, dass jeder Stromlieferant (Händler) einen ungehinderten Zugang zu den Transport- und Verteilnetzen erhalten muss. Unter Transportnetzen versteht man die Hochspannungs- bzw. Hochdruckleitungen, die Verteilnetze umfassen die Netze an die die Kunden (Industrie-, Gewerbe- und Haushaltskunden) angeschlossen sind. Für die Nutzung dieser Netze zahlt der Stromhändler ein Netznutzungsentgelt (NNE), dessen Berechnung durch die Netznutzungsentgeltverordnung geregelt ist und dessen Höhe von der Regulierungsbehörde überwacht wird. Dazu müssen die Betreiber der Verteilnetze der Behörde jährlich die Kalkulation der Netznutzungsentgelte zur Prüfung und Genehmigung vorlegen. Die Entgelte enthalten alle Kosten für den Netzbetrieb, also auch die Kosten für die vorgelagerten Hochspannungsnetze. Die Genehmigung der Netznutzungsentgelte wird im Internet veröffentlicht, so dass jeder Stromhändler in der Lage ist, bei der Kalkulation eines Angebotes für einen Kunden diese Netznutzungsentgelte in sein Angebot einzubeziehen.

Um auch in diesem „Monopolssektor“ einen Quasi-Wettbewerb zu generieren, wird voraussichtlich 2009 eine „Anreizregulierung“ eingeführt. Durch ein relativ kompliziertes Verfahren haben die Netzbetreiber die Möglichkeit, durch interne Effizienzsteigerungen zusätzliche Erträge zu generieren. Ziel der Anreizregulierung ist letztendlich eine Kostensenkung der Netznutzungsentgelte durch eine nachhaltige Steigerung der Kosteneffizienz.

Anreizregulierung Ziel: „Wettbewerb in einem Monopol“

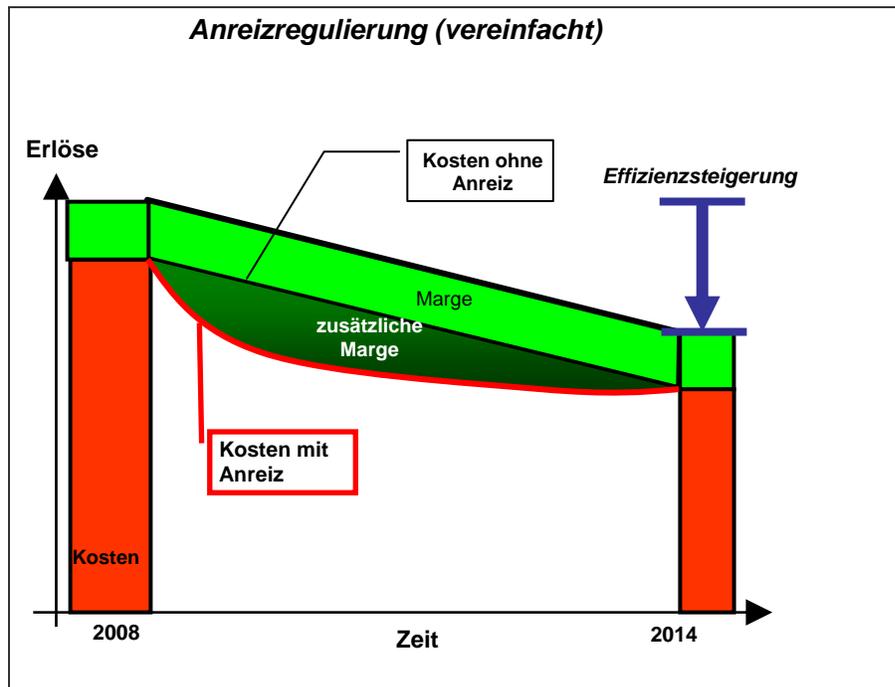


Abb. 3 Anreizregulierung

Die Energiepreise für den Kunden werden von folgenden Kostensegmenten beeinflusst:

- Erzeugungspreis (Kraftwerke, Gaseinkauf),
- Netznutzungsentgelte,
- Messkosten (Zählergebühren),
- Vertriebskosten (Abrechnung).

Lediglich die Netznutzungsentgelte unterliegen einer staatlichen Regulierung und werden von der Bundesnetzagentur kontrolliert. Alle anderen Kostenelemente werden durch den freien Markt und den Wettbewerb bestimmt.

Das Erneuerbare Energie Gesetz (EEG) regelt die Vergütung von Stromeinspeisungen aus erneuerbaren Energien (Wind, Biomasse, Wasser u. ä.). Die Einspeisevergütung liegt in der Regel höher als der Marktpreis, die Differenz wird durch einen entsprechenden Aufschlag auf den Strompreis (EEG-Zuschlag) finanziert.

Das KWK-Gesetz regelt die Förderung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (Erzeugung von Strom und Fernwärme). Die notwendigen finanziellen Mittel werden ebenfalls durch einen entsprechenden Aufschlag auf den Strompreis (KWK-Zuschlag) dargestellt). Die Anteile der einzelnen Kostenelemente am Gesamtstrompreis sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Zusammensetzung Strompreis 2007

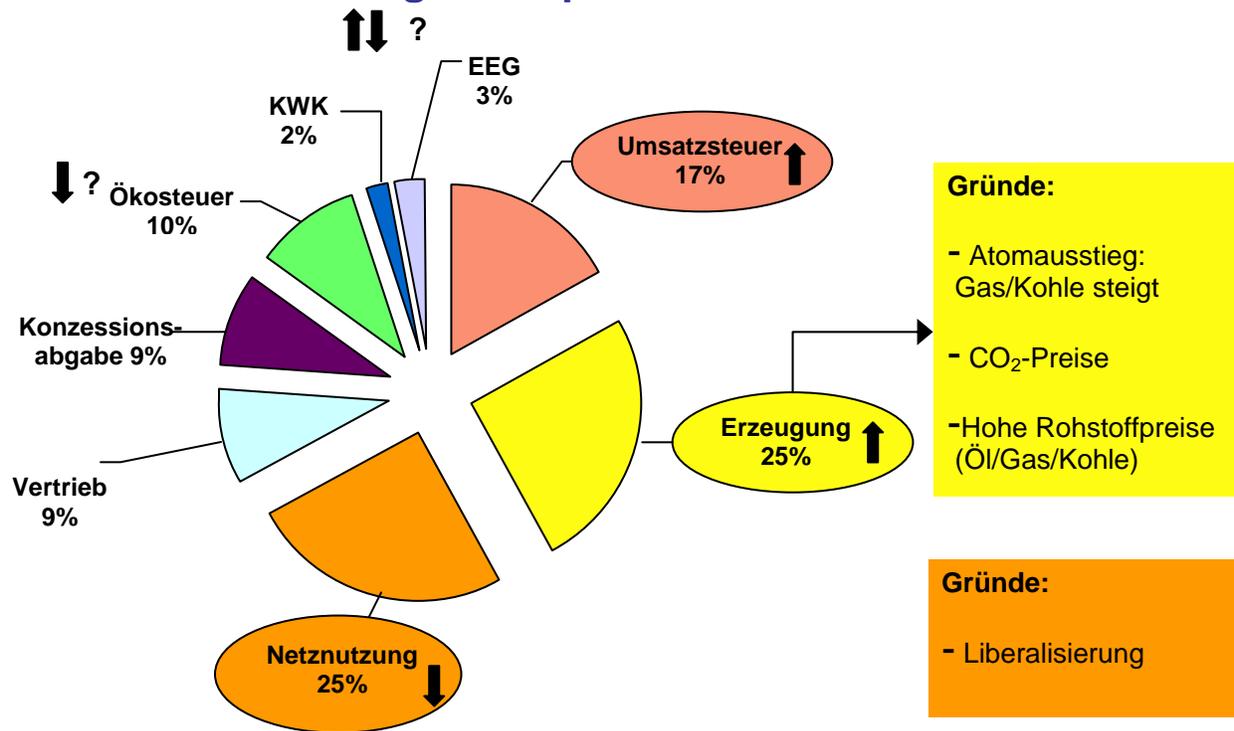


Abb. 4 Zusammensetzung der Strompreise und Entwicklungstendenzen

Für die kommunalen Energieversorgungsunternehmen ist neben dem Energierecht auch das kommunale Wirtschaftsrecht maßgebend. Es regelt allgemein die wirtschaftliche Betätigung der Kommunen und erlaubt diesen im Rahmen der Daseinsvorsorge bestimmte Tätigkeiten wie z. B. Energieversorgung, Wasserversorgung u. ä. in öffentlichen Dienstleistungsunternehmen zu organisieren.

2. Produkte und Dienstleistungen kommunaler Versorgungsunternehmen

Unter die Grundgüter, die ein kommunales Unternehmen im Rahmen der Gemeinwirtschaft liefern kann, fallen:

- die leitungsgebundenen Energieträger

- Elektrizität
- Gas
- Wärme
- Trinkwasser (leitungsgebunden)

Die Lieferungen dieser Güter werden über privatrechtliche Verträge geleistet.

Die Zuständigkeit für die parallele Lieferung mehrerer Güter (Strom, Gas, Fern- und Nahwärme, Wasser) wird Querverbund genannt. Diese gleichzeitige Versorgung bietet Möglichkeiten zum rationellen Einsatz der Versorgungsanlagen, zur Nutzung von Abfallproduktion aus einem Bereich in anderen Bereichen und ist damit eine Grundlage für eine umweltgerechte kommunale Versorgung (Technische Verfahren siehe Vorlesungsabschnitt II).

Weiterhin bieten kommunale Unternehmen im Bereich ihrer Gemeindegrenzen oft fundamentale Dienstleistungen an:

- den Personentransport mit Hilfe Öffentlicher Personen-Nahverkehrssysteme (ÖPNV) oder Regionalverkehrssysteme
- Entsorgungsdienstleistungen, also Dienstleistungen zur Erfassung, zum Transport, zur Lagerung, Aufbereitung, Nutzung und Deponierung von Abfallstoffen
- die Entsorgung und Reinigung von Abwasser
- den Betrieb von Krankenhäusern
- den Betrieb von öffentlichen Schwimmbädern

Die Gewährung dieser Dienstleistungen (Umfang der Leistungen, Gebühren etc.) wird öffentlich-rechtlich geregelt.

Weitere Dienstleistungen von öffentlichen Versorgungs- (und Verkehrs-)unternehmen sind neueren Ursprungs:

- Beratungsdienstleistungen für öffentliche, gewerbliche und private Kunden zur nutzbringenden und rationellen Verwendung der gelieferten Grundgüter
- Planungsdienstleistungen in bestimmten Fällen zur Durchführung von Versorgungs-, Bau- und Sanierungsvorhaben, vorzugsweise im öffentlichen Bereich

Im Zuge der Veränderungen in der Wirtschaftsstruktur (Privatisierungen, Deregulierung und Liberalisierung des Strommarktes) können sich weitere Geschäftsfelder für kommunale Unternehmen eröffnen.

Kommunen haben gemäß den Grundzügen der Kommunalwirtschaft die Aufgabe, die obengenannten Güter und Dienstleistungen

- ausreichend
- sicher und zuverlässig
- zu angemessenen Preisen
- umweltverträglich
- unter Erhaltung ihrer Finanzkraft

bereitzustellen.

Zu diesen „klassischen“ Zielen sind seit ca. 15 Jahren (Beginn der örtlichen Versorgungskonzepte) zunehmend neue Leitbilder hinzugekommen:

- Anreize zur rationellen Nutzung der Ressourcen und der gelieferten Güter
- Erhöhung des Komforts für die Kunden
- bedarfsgerechte und kundenspezifische Leistungen („maßgeschneiderte Lösungen“)
- Verbesserung der Produktqualität (speziell von Wasser).
- Erhöhung des Verbraucherschutzes durch vorsorgende Beratung

Diese neuen Leitbilder begründen im Wesentlichen das Engagement in den neuen Dienstleistungsbereichen Beratung und Planung.

Durch die Erweiterung der Geschäftsbereiche und Verantwortlichkeiten zur Umsetzung der neuen Unternehmensziele wird sich das Versorgungsunternehmen zu einem

öffentlichen Dienstleistungsunternehmen

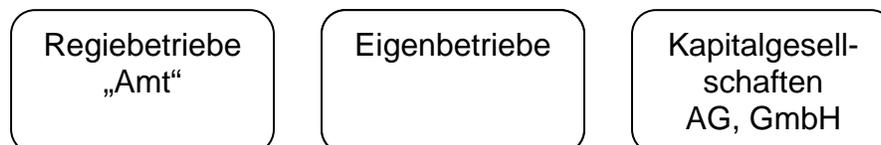
entwickeln. Diese umfassende Aufgabenstellung wird auch als „nachhaltige Daseinsvorsorge“ bezeichnet.

3. Organisations- und Rechtsformen öffentlicher Unternehmen

Die Gemeinden können Konzessionsverträge für den Netzbetrieb abschließen mit

- **übergeordneten Netzbetreibern (z.B. auf regionaler oder Verbundebene).** Damit wird das Recht der Versorgung auf ein fremdes Unternehmen übertragen. Diese Gemeinden bezeichnet man als „B-Gemeinden“.
- **eigenen Netzbetreibern** („Stadtwerken“). Gemeinden mit eigenen Energieversorgungsunternehmen bezeichnet man als „A-Gemeinden“. Ob eigene Stadtwerke gegründet werden, hängt von den wirtschaftlichen Rahmendaten ab. In der Regel ist der Betrieb von Stadtwerken bei größeren Kommunen wirtschaftlich.

Für die Organisation eigener Versorgungsbetriebe in A-Gemeinden gibt es verschiedene Formen:



Über die Wahl einer dieser Rechtsformen kann der Gemeinde- oder Stadtrat frei entscheiden. Diese Entscheidung wird gewöhnlich aufgrund ökonomisch-finanzieller Erwägungen getroffen.

Regiebetriebe sind Teile der Stadtverwaltung ohne eigene Rechtspersönlichkeit. Sie haben keine organisatorische, finanzielle und vermögensrechtliche Selbständigkeit. Da sie in ihrer Finanzverwaltung und wirtschaftlichen Planung dem kameralistischen Haushaltssystem der Verwaltungen unterworfen sind, welches das wirtschaftliche Ergebnis nicht transparent zeigt, ist diese Organisationsform sehr selten geworden.

Eigenbetriebe haben immer noch keine eigene Rechtspersönlichkeit, sie besitzen jedoch eine organisatorische, finanzielle und vermögensrechtliche Selbständigkeit innerhalb der Verwaltung. Die Rechte und Pflichten von Eigenbetrieben und ihre Stellung zur übrigen Gemeindeverwaltung ergeben sich ausschließlich aus dem Kommunalrecht, also den Gemeindeverordnungen, den Eigenbetriebsgesetzen und Eigenvertriebsverordnungen. Eigenbetriebe sind nicht bilanzierungspflichtig nach HGB und werden nicht ins Handelsregister eingetragen. Die Geschäftsgrundlagen und die Geschäftsverteilung werden durch eine Betriebssatzung geregelt, die vom Gemeinde- oder Stadtrat erlassen wird. Die laufende Geschäftsführung liegt in den Händen der Werkleitung, die aus einem oder mehreren Werkleitern bestehen kann. Der Vorgesetzte des Werkleiters ist der Bürgermeister. Ein spezieller Ausschuss des Gemeinde- oder Stadtrates, der Werksausschuss, nimmt Aufsichtsfunktionen wahr.

Die Zahl der Eigenbetriebe nimmt ab, da zunehmend die Rechtsform der Kapitalgesellschaft gewählt wird. Eigenbetriebe sind vorwiegend in kleineren Städten zu finden, jedoch können auch Versorgungsbetriebe sehr großer Städte als Eigenbetriebe organisiert sein.

Kapitalgesellschaften besitzen im Rahmen des Gesellschaftsrechts die Verantwortung für alle technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekte der Geschäftsführung. Sie sind nach HGB bilanzpflichtig und müssen einen Jahresabschluss vorlegen.

An kommunalen Unternehmen können sich prinzipiell auch Dritte beteiligen, wobei dies sowohl öffentliche Unternehmen (z. B. andere Stadtwerke) als auch private

Unternehmen sein können. Ein Unternehmen an dem sowohl eine Kommune als auch ein privater Partner beteiligt sind wird auch Public Private Partnership (PPP) bezeichnet.

Die Gesellschaftsorgane haben in ihren Aufgaben eine klare Kompetenzabgrenzung:

- Die **Hauptversammlung** (AG) bzw. **Gesellschafterversammlung** (GmbH) gibt die Unternehmensziele vor. Die Haupt- oder Gesellschafterversammlung gewährleistet, dass die von der Gesellschaft übernommen gemeinwirtschaftlichen Lasten, d.h. die Erfüllung des Versorgungsauftrages der Gesellschaft bezahlt wird.
- Der **Aufsichtsrat** kontrolliert die Geschäftsleitung. Bei einer AG ist er notwendig, bei einer GmbH ist seine Existenz nur bei Unternehmen über 500 Beschäftigten bindend. Er wird, gemäß dem Betriebsverfassungsgesetz, zu zwei Dritteln aus Vertretern der Gesellschafter und zu einem Drittel aus Vertretern der Belegschaft gebildet. Seine Aufgaben bestehen im Wesentlichen in der Überwachung der Wirtschaftsführung des Vorstands bzw. der Geschäftsführer. Für manche Geschäfte, z.B.: Investitionen oberhalb eines bestimmten Betrages, kann die Genehmigung des Aufsichtsrates vorgesehen werden. Politische Erwägungen spielen bei Aufsichtsratsentscheidungen nur dann eine Rolle, wenn sie im Sinne des Unternehmensziels sind. Aufsichtsratsvorsitzender ist immer ein führender Vertreter der Kommune (Bürgermeister, Oberbürgermeister, Stadtdirektor o.ä.)
- Der **Vorstand** (AG) bzw. die **Geschäftsführung** (GmbH) ist für die Betriebsführung und die Betriebsergebnisse des kommunalen Unternehmens voll verantwortlich und vertritt das Unternehmen nach außen.

Öffentliche Konzerne:

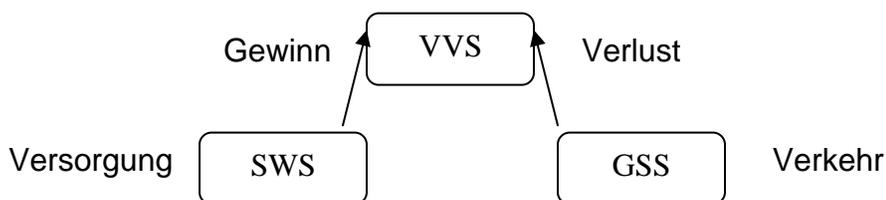
Für die erweiterten Aufgaben kommunaler Unternehmen wurden die Möglichkeiten der Firmenstrukturen mittlerweile erweitert: Mehrere kommunale Unternehmen

(Aktiengesellschaften oder GmbHs) können sich den Weisungen eines anderen Unternehmens unterwerfen, so dass eine Konzernstruktur entsteht. Die Weisungsrechte werden in einem Beherrschungsvertrag festgelegt.

Innerhalb eines Konzerns, das heißt, unter einer beherrschenden Mutter, kann ein profitables Unternehmen (z. B. Versorgungsbetriebe) mit einem defizitären Unternehmen (z.B. Verkehrsbetriebe) zusammengeschaltet werden, wobei das profitable Unternehmen mit seinen Gewinnen innerhalb des Konzerns die Verluste des defizitären Unternehmens deckt und das Gesamtergebnis im Konzern (steuersparend) ungefähr ausgeglichen ist. Die Konzernmutter ist dabei auch ein zu hundert Prozent kommunales Unternehmen. Der Ausgleich der Ergebnisse wird durch einen Gewinnabführungs- und Beherrschungsvertrag geregelt. Ein Beispiel dafür ist der Öffentliche Nahverkehr, der seit Jahrzehnten negative wirtschaftliche Ergebnisse zu verbuchen hat, aber als Grundelement einer kommunalen Infrastruktur unverzichtbar ist.

Ein Teil der öffentlichen Unternehmen der Landeshauptstadt Saarbrücken ist nach diesem Muster strukturiert:

Über die Konzernmutter VVS (Verkehrs- und Versorgungsgesellschaft Saarbrücken mbH) sind u.a. die Töchter SWS (Stadtwerke Saarbrücken AG) und GSS (Gesellschaft für Straßenbahnen im Saartal AG) miteinander verbunden. Die GSS-Verluste werden über die Konzerngesellschaft VVS mit den SWS-Gewinnen verrechnet.



Mit dieser Konstruktion können gemeinwirtschaftliche Lasten, wie sie bei der Bereitstellung öffentlicher Personennahverkehrsleistungen zurzeit unvermeidlich sind, von der Kommune getragen werden.

4. Die Elektrizitätsversorgungsstruktur in Deutschland

Das Wegerecht für Versorgungsstrassen liegt bei den Kommunen. Besonders bei der Elektrizitätsversorgung hat im Laufe der Jahrzehnte ein Konzentrationsprozess stattgefunden, indem viele Gemeinden auf ihr Versorgungsrecht verzichtet haben (B-Gemeinden, Kap. 3). Am ausgeprägtesten war dieser Prozess in ländlichen Gegenden, wo hohe Investitionskosten für lange Leitungen geringen Erträgen wegen geringen Bedarfes an elektrischer Energie gegenüberstehen. Hier boten sich nach dem ersten Weltkrieg überregional wirkende Elektrizitätsversorgungsunternehmen zur Übernahme der Versorgung an, da sie mit ihren immer größeren Kraftwerksleistungen auch über größere Landflächen den Strom preiswert anbieten konnten und die Eigenerzeugung für die kleinen Kommunalwerke unrentabel wurde.

Die Kommunen schlossen also mit den Versorgungsunternehmen Konzessionsverträge mit möglichst langer Laufzeit ab, für die sie **Konzessionsabgaben** erheben konnten. Die Konzessionsabgaben sind ein Entgelt für die Sondernutzung der Trassen auf dem Gemeindegebiet. Sie werden als fester Betrag pro abgesetzte Einheit berechnet. Für die Gemeinden stellten sie eine sichere Einnahmequelle dar, da außer der temporären Überlassung von Rechten keine Gegenleistungen zu erbringen sind.

Mit der zunehmenden Entwicklung der Großkraftwerkstechnik und der zunehmenden Wirtschaftlichkeit dieser Größtanlagen (Erreichen der gegenwärtigen größten Einheitsleistungen von ca. 1500 MW_{el} in den siebziger Jahren) schritt der Konzentrationsprozess ständig fort.

Die **Allzuständigkeit der Gemeinden** für

- Beschaffung
- Verteilung
- Verkauf

ist also zum Teil abgegeben.

Dabei hat sich eine dreistufige **Struktur der Stromversorgung** herausgebildet:

- die **Verbundstufe** (überregional, mit Großkraftwerken und Höchstspannungsnetzen bis 380 kV)
- die **regionale Stufe** mit Energiebeschaffung in eigenen oder Beteiligungskraftwerken und der Zuständigkeit für die ländliche Verteilung
- die **kommunale Stufe** zur Versorgung der Städte und mancher Gemeinden.

Das gleichzeitige Angebot mehrerer Versorgungsgüter im **Querverbund** hat sich wegen der gemeinwirtschaftlichen Handlungsgrundsätze nur **auf der kommunalen Stufe** durchgesetzt, wengleich auch einige Unternehmen der Verbund- und Regionalstufe ihre günstige wirtschaftliche Situation, ihre Infrastruktur und Marktliberalisierungsentwicklungen zur Diversifizierung in weitere Geschäftsfelder mit der Gründung von Tochterfirmen nutzen (z.B. im Bereich der Entsorgung und der Telekommunikation).

In Folge der **Liberalisierung des Strommarktes** kam es in Deutschland zu einer massiven Konzentration im Bereich Stromproduktion und Stromtransport. Von vormals **8 größeren Stromversorgungsunternehmen sind noch 4 Großkonzerne übriggeblieben**: RWE, EON, EnBW und Vattenfall. Diese Unternehmen verfügen nicht nur fast ausschließlich über das Höchstspannungstransportnetz (380 kV und 220 kV), sondern decken auch ca. 90% der Energieerzeugung in Deutschland ab.



Abb. 5 Übertragungsnetze BRD

Ebenso sind diese 4 Unternehmen an ca. 71% der Vertriebsorganisationen mittel oder unmittelbar beteiligt. Die restlichen 29% werden von ca. 900 kommunalen und regionalen Versorgern abgedeckt.



Abb. 6 Transportnetz Strom BRD

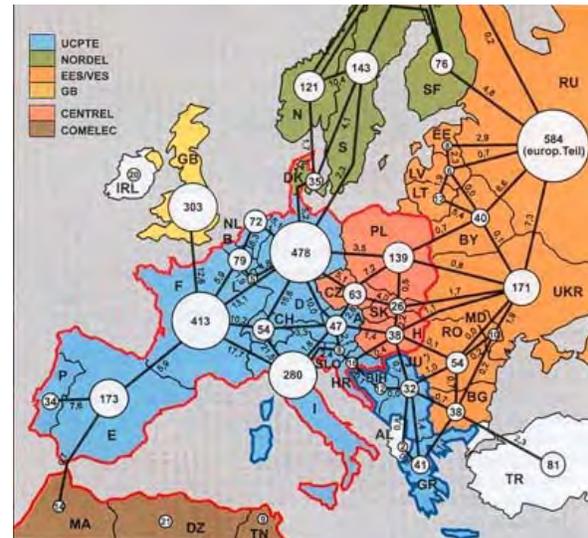


Abb. 7 Europ. Stromnetz (Hochspannung)

Aufgrund der hohen Vermaschung des bundesdeutschen Stromnetzes (Abb. 6) ist Deutschland zugleich auch eine der wichtigsten Drehscheiben für den europäischen Stromhandel (Abb. 7). Die Europäische Kommission möchte durch das s. g. "Ownership-Unbundling" (eigentumsrechtliche Trennung) die Vormachtstellung der 4 großen Konzerne einschränken, was dazu führen würde, dass die Gesellschaften entweder ihre Netze oder aber ihre Erzeugung verkaufen müssten.

Neben den öffentlichen Versorgern stellt noch die industrielle Kraftwirtschaft 13% der gesamten installierten Leistung in Deutschland. Weiterhin betreibt die Deutsche Bahn noch eigene Kraftwerke die ca. 1% der gesamten installierten Leistung ausmachen.

Die Verbundunternehmen beliefern in einigen Gebieten auch Letztverbraucher direkt.

Die Verbundunternehmen sind in der Deutschen Verbundgesellschaft (DVG) zusammengeschlossen.

Die **regionalen Versorgungsunternehmen** geben von Verbundgesellschaften und anderen Unternehmen erzeugte, aber auch in eigenen Kraftwerken produzierte Elektrizität an kommunale Versorgungsunternehmen und auch an Letztabnehmer ab. Insgesamt existieren in der Bundesrepublik Deutschland rund 80 regionale Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Zusammengeschlossen sind die meisten dieser Unternehmen in der Arbeitsgemeinschaft Regionaler Energieversorgungsunternehmen (ARE) e.V. **Der Anteil der regionalen Versorgungsunternehmen (9% aller EVU) beträgt 38% an der Stromabgabe und 10% an der Stromerzeugung öffentlicher Unternehmen.**

Die rund 850 **kommunalen Versorgungsunternehmen** deren Unternehmen im Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU) organisiert sind, nehmen bei der Versorgung der Letztabnehmer mit Elektrizität - häufig im Querverbund - überwiegend reine Verteilerfunktion wahr. Den größten Teil ihres Strombedarfs decken die gemeindeeigenen Unternehmen in der Regel durch Bezug der vorgelagerten regionalen und Verbundstufe. Diese Bezüge werden allerdings zum Teil durch Stromerzeugung in eigenen Kraftwerken ergänzt, wobei die Eigenerzeugung in Einzelfällen bis zu 100% reicht.

Die kommunalen Stromversorger haben einen **Anteil von 29%** an der Stromabgabe und von **10% an der öffentlichen Stromerzeugung.**

Struktur der deutschen Strombranche

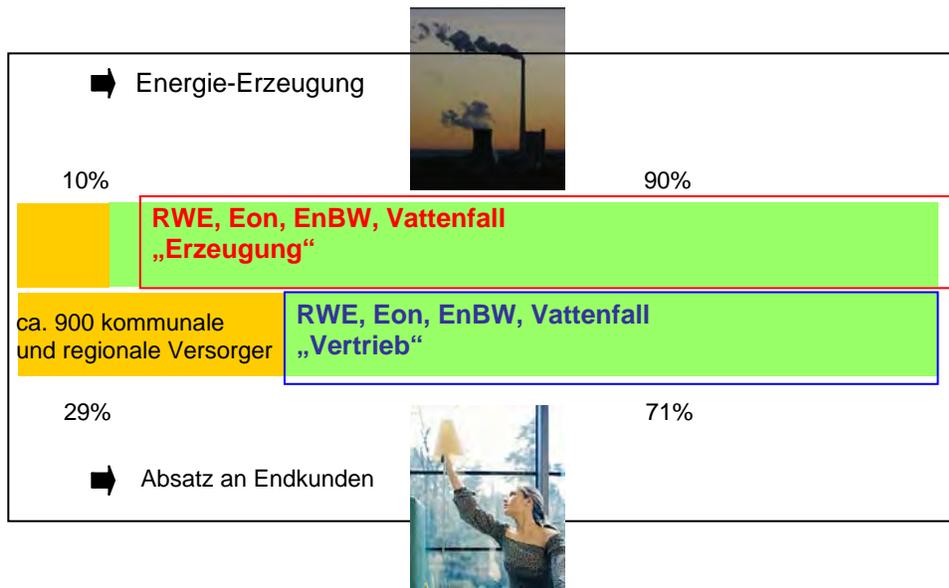


Abb. 8 Struktur der deutschen Strombranche

5. Die öffentliche Gas- und Wärmeversorgungsstruktur

Analog zur Elektrizitätswirtschaft gibt es in der Erdgaswirtschaft eine dreistufige Marktstruktur:

- die Produktions- und Importstufe
- die Fortleitungs- und Weiterverteilstufe und
- die Endverbraucherstufe

Auf diesen drei Marktstufen betätigen sich rund 600 Unternehmen.

Die **Produktions- und Importstufe** beliefert die Ferngasgesellschaften der Fortleitungsstufe sowie Großabnehmer. Dabei entstammten 2005 19% inländischer Förderung, 81% wurden vorwiegend aus Russland, den Niederlanden und Norwegen importiert.

Die **Fortleitungs- und Weiterverteilstufe** obliegt den zwanzig deutschen **Ferngasgesellschaften**, die Erdgas

- importieren,
- von inländischen Vorlieferanten beziehen,
- an Weiterverteiler und Großabnehmer abgeben,

und den rund 80 Regionalversorgungsunternehmen ,die

- von inländischen Vorlieferanten beziehen,
- die regionale Weiterverteilung übernehmen.

Die **Endverbrauchermärkte** werden von den **Regionalversorgungs- und Ortsgasgesellschaften** (2003:ca. 700 Endverteiler) bedient. Dazu zählen auch kommunale Querverbundunternehmen.

Die unmittelbare Versorgung der Letztverbraucher erfolgte im Jahre 1992

- zu 66% durch Orts- und
- zu 32% durch Ferngasgesellschaften
- zu 2% durch Erdgasproduzenten.

Der nicht-öffentlichen Gaswirtschaft werden der Steinkohlenbergbau, die Eisenindustrie und die Mineralölindustrie zugerechnet. Sie liefern heutzutage vor allem Nicht-Erdgase (Grubengas, Erdölgas, Kokereigas, Hochofengas, Gichtgas), das oft in Kuppelproduktion für den Eigenverbrauch erzeugt wird (Kokereigas, Gichtgas).

Kokereigas wurde in der Vergangenheit bisweilen als Stadtgas eingesetzt (in Saarbrücken bis 1995). Mittlerweile ist es im öffentlichen Bereich vollständig durch Erdgas verdrängt.

Der Fernwärmemarkt

Fernwärme kann wegen der Temperaturverluste nicht über lange Strecken transportiert werden. Deshalb konzentriert sich der öffentliche Wärmemarkt zum großen Teil auf den Ortsbereich. Damit wird die öffentliche Wärmeversorgung (zumeist Nieder-temperaturwärme zur Raumheizung) zu einer **Domäne der kommunalen Versorgungsunternehmen**, zumal die Wärme zumeist als Kuppelprodukt aus der gemeinsamen Strom- und Wärmeproduktion (Kraft-Wärme-Kopplung, siehe Vorlesungsabschnitt II, Kap.5) im Querverbund angeboten wird.

Auch die Industrie kann nicht-industriellen Wärmeverbraucher Fernwärme zur Verfügung stellen. In einigen Fällen beliefert die Industrie, bisweilen mit öffentlichen Strom- und Wärmeversorgern, über den lokalen Bereich hinaus eine Region (z.B. Fernwärmeschiene Saar, siehe Abb. 2).

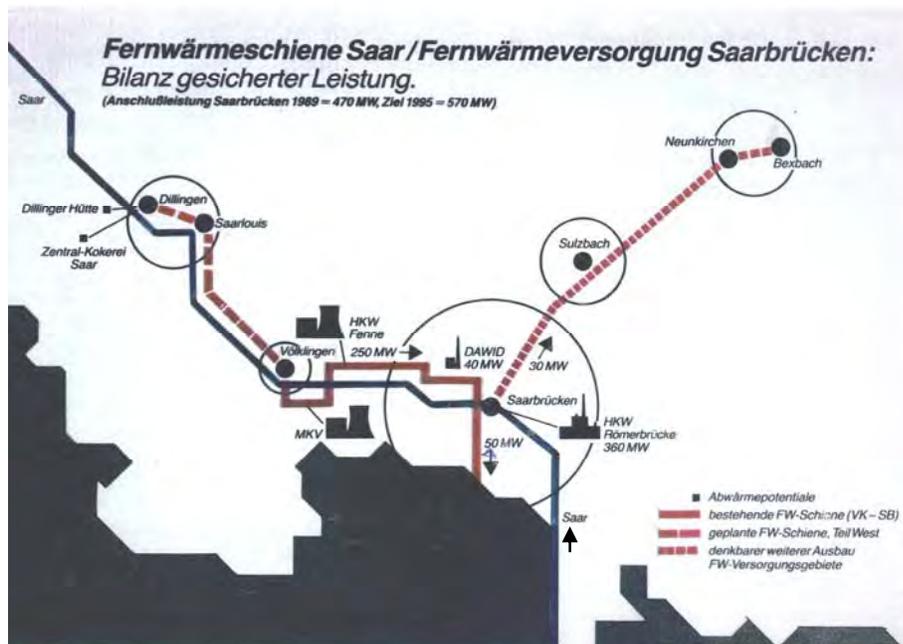
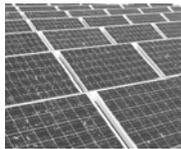


Abb. 9 Verlauf und Einspeisungen der Fernwärmeschiene Saar (SWS)



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

3.2 Kraftwerkstechnik: Wärmekraftwerke (Fortsetzung)

3.2.3 Technische Komponenten eines Dampfkraftwerkes

II. Technik der kommunalen Versorgung

3.2.3 Technische Komponenten eines Dampfkraftwerks



Abb. 28: Modellkraftwerk Völklingen-Fenne

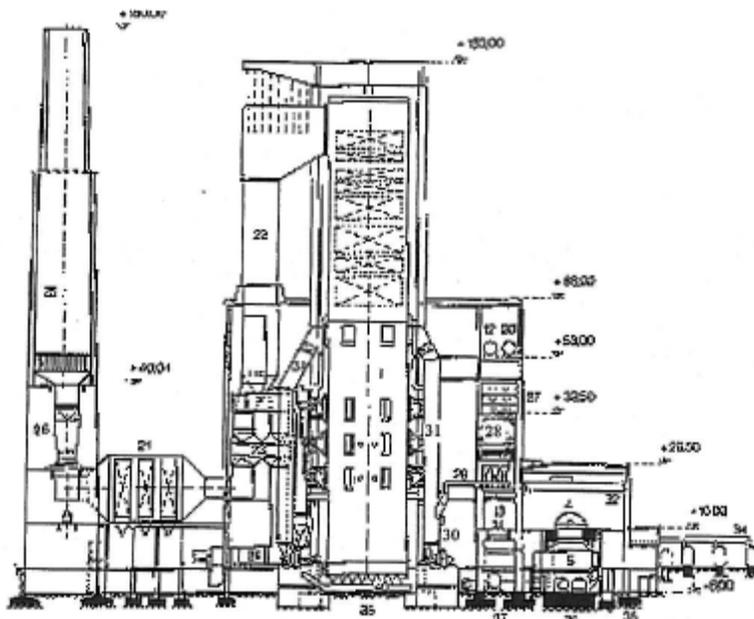


Abb. 29: Thermisches Kraftwerk 600 MW/780 MVA mit Braunkohlenfeuerung, Gesamtquerschnitt²¹

²¹ H. Happoldt, D. Oeding: Elektrische Kraftwerke und Netze, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 5. Auflage 1978

Wie Bild 29 zeigt, müssen die Hauptkomponenten Dampferzeuger, Dampfturbinen, Kondenstor, Speisepumpe und Generator in eine umfangreiche Infrastruktur eingebettet werden. Diese Infrastruktur wird von der Variationsbreite der eingesetzten Brennstoffe - Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Steinkohlenmittelprodukte Braunkohle und Abfälle aus Produktionsprozessen wie z.B. Gichtgas - bestimmt, wobei in vielen Fällen auch der Einsatz mehrerer Brennstoffe in einer Kesselanlage gefordert wird. Die kommunale Stromversorgung stützt sich vor allem auf Steinkohlen-Dampfkraftwerke, daher wird man sich im Folgenden auf die Beschreibung der Apparaturen für die Steinkohlenutzung beschränken.

Die Hauptkomponenten²² sind:

Einrichtungen zur Brennstoffanlieferung

Die Kohle wird mit der Bahn oder dem Schiff, seltener mit LKW antransportiert. Bei großen Kraftwerkseinheiten (z.B. Fenne, Bexbach) wird daher der Standort des Kraftwerks wegen der großen anzuladenden Brennstoffmengen auch nach dem Verkehrsanschluss ausgewählt.

Brennstoffversorgung und –aufbereitung

Die Kohle wird nach dem Entladen über Förderbänder in Brechanlagen zerkleinert (gebrochen) und in geschlossenen Silos zwischengelagert. An großen Standorten wird sie auch vor dem Brechen auf Halden abgeladen. Bevor sie in die Feuerung eingeblasen wird, muss die Kohle zu Kohlenstaub zermahlen und getrocknet werden. Die Trocknungswärme wird häufig den Rauchgasen aus der Dampferzeugung entnommen. Bei kleineren Anlagen (< 35 MW_{th}) wird die Kohle ungemahlen auf einem Rost verfeuert.

²² T. Bohn (Hrsg.): Fossil beheizte Dampfkraftwerke. Band 6 der Handbuchreihe ENERGIE. Technischer Verlag Resch Verlag TUV Rheinland, Gräfelting/Köln 1986

Dampferzeuger

Die gemahlene und auf eine Restfeuchte von ca. 1 % getrocknete Kohle (Kohlestaub) wird mit einer Geschwindigkeit von ca. 20 m/s in den Feuerraum eingeblasen. Parallel dazu wird die Verbrennungsluft (Primärluft) eingeblasen. Die Kohleteilchen erwärmen sich innerhalb von 0,05 Sekunden auf die Zündtemperatur zwischen 250 und 500°C, die vom Anteil der flüchtigen Bestandteile (Gas) in den Kohlepartikeln abhängt. Die flüchtigen Bestandteile werden während der Erwärmung aus den Kohlepartikeln ausgetrieben und bilden mit der Primärluft ein zündfähiges Gemisch.

Der scharfe Strahl der Verbrennungsluft und der Kohlepartikel führt zu einer turbulenten Vermischung im Feuerraum, wozu noch die heißen Rauchgase nach dem Verbrennungsvorgang treten. Die Feuerraumtemperatur beträgt ca. 1400 °C. Wirbelbrenner können durch eine zusätzliche Drallkomponente im Feuerungsstrahl die Verbrennungsgeschwindigkeit erhöhen und den Ausbrand verbessern. Besondere Luftführungen sorgen für einen dosierten Luftmangel in der Flamme (unterstöchiometrische Verbrennung) und damit für geringe Stickoxidanteile im Rauchgas.

Bei der Verfeuerung des Brennstoffs freigesetzte Wärmeenergie wird im Dampferzeuger (6) zum Erhitzen des Wassers, im Wasser-Dampfkreislauf, zum Verdampfen des Wassers und zur Überhitzung des Dampfes und am Schluss zur Vorwärmung der Verbrennungsluft verwendet

Die Wärme des Rauchgases wird an der Heizfläche über Wärmetauscher-Rohrbündel auf die Wasser-Dampfseite des Arbeitsmediums übertragen. In den Verdampferrohren gibt es mehrere Zonen mit unterschiedlichen Verdampfungsphänomenen. Die Verdampfung ist der Vorgang, der der waagerechten Linie der Energieaufnahme im Clausius-Rankine-Prozess (Bild 27) entspricht. In Bild 30 wird er anschaulich gemacht, und im Folgenden werden auch einige Probleme genannt, die während der Dampfbildung auftreten können:

- In der Zone des unterkühlten Siedens tritt die erste Dampfblasenbildung an der Heizfläche auf
- Sieden mit Wandbenetzung liefert den besten Wärmeübergang. Es besteht die Gefahr von Ablagerungen, da sich die zuvor im Wasser gelösten Mineralstoffe in der verbleibenden Wirbelschicht anreichern.
- In der Zone der sogenannten Siedekrise (Post-Dryout-Bereich) reicht der Wasseranteil nicht mehr aus, um die Wand vollständig zu benetzen. In gekrümmten Rohren kann es zu Erosionskorrosionen kommen, wenn Wassertropfen auf die oxidische Schutzschicht ausgeschleudert werden und diese immer wieder zerstören.
- Im Bereich der Tropfenströmung können sich noch Wassertröpfchen halten, obwohl im Mittel der Dampf schon leicht überhitzt ist. Die Existenz von kleinen Wassertropfen ist möglich, da die Oberflächenspannung infolge des kleinen Radius sehr groß und die Relativgeschwindigkeit zwischen Dampf und kleinen Wassertropfen so gering ist, dass der Wärmeübergang schlecht wird.

Ein geringer Teil nicht nutzbarer Wärmeenergie strömt mit den Rauchgasen durch den Schornstein ins Freie.

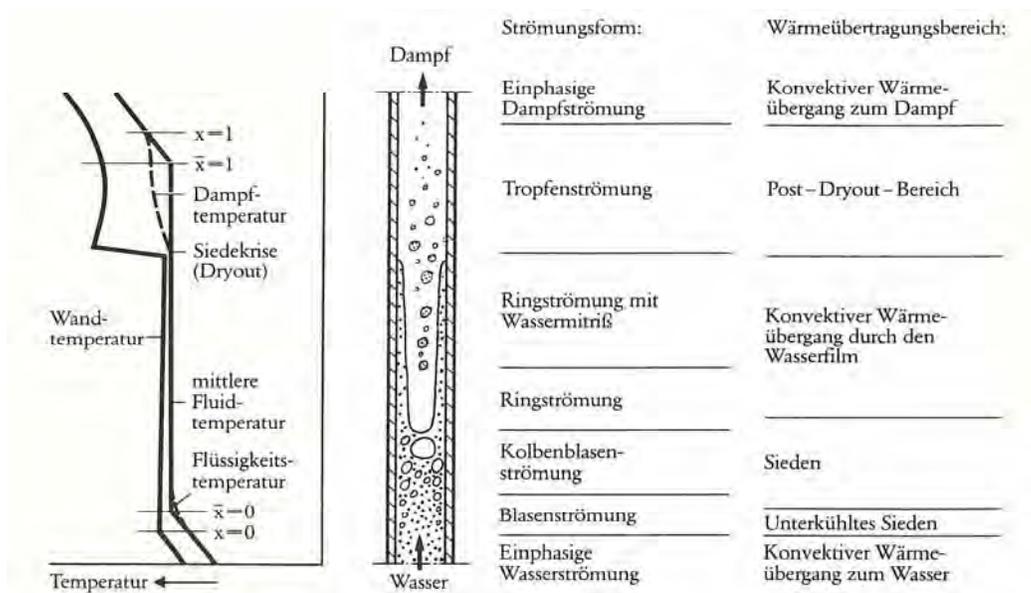


Abb. 30: Wärmeübergangsbereiche in hoch belasteten Verdampferheizflächen²²

Dampfturbinen

Der auf hohe Drücke und Temperaturen hochgespannte Dampf kann seine potentielle Energie in den Turbinen in Drehbewegung (mechanische Energie) umsetzen und damit Druck und Temperatur senken. Die Energie ist so groß, dass der Dampf in mehreren Stufen entspannt werden muss: In großen Kraftwerken sind Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckturbinen auf einer Achse hintereinander angeordnet und treiben gemeinsam den auf der gleichen Achse liegenden Generator zur Stromerzeugung an.

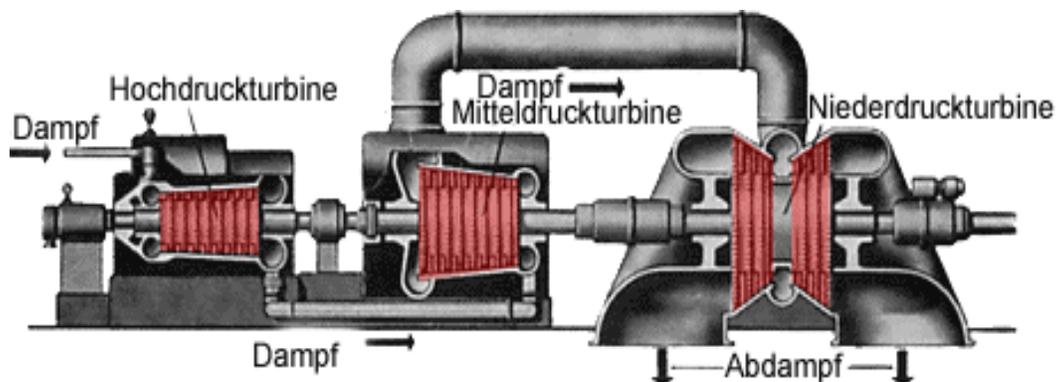


Abb. 31: Großturbinensatz für elektrische Leistungen von 800 MVA

Der Dampf erhält bei seiner Expansion im Dampferzeuger eine der Druckminderung entsprechende Strömungsgeschwindigkeit. Durch Umlenkung des strömenden Dampfes in gekrümmten Schaufeln wird auf diese eine Kraft ausgeübt. Der Wirkungsgrad der Energieumsetzung ist abhängig von dem Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit u der Schaufeln zur Strömungsgeschwindigkeit c des Dampfes.

Kraftwerks-Dampfturbinen bestehen aus einem Gehäuse mit feststehenden Schaufeln (Leitschaufeln), die in mehreren Stufen hintereinander angeordnet sind, und einer dicken, ebenfalls beschauelten Welle. Die Stufen mit Leitschaufeln und Laufschaufeln werden nacheinander in axialer Richtung vom Dampf durchströmt, dessen Druck sich in

der Regel sowohl im Leitschaufel- als auch im Laufschaufelbereich abbaut (Prinzip der Überdruck- oder Reaktionsturbine, Bild 32).

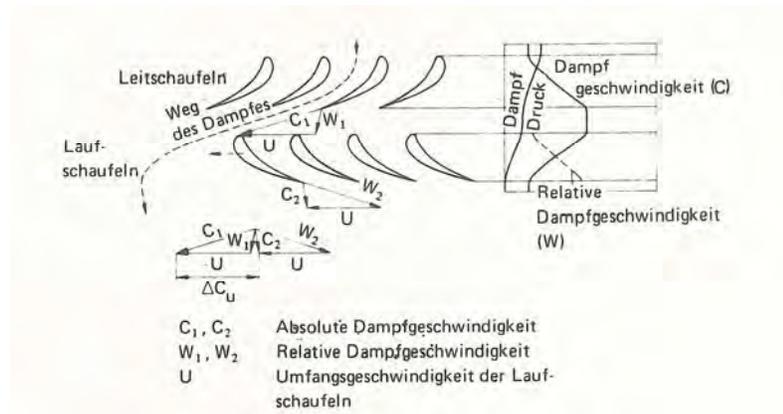


Abb. 32: Überdruckbeschauelung: Der Druckabfall der Turbinenstufe wird gleichmäßig auf die Leit- und Laufschaufeln verteilt. In den Leitschaufeln wird der Dampf nur auf eine Geschwindigkeit c_1 wenig über der Umfangsgeschwindigkeit u beschleunigt. Eine genau gleiche Weiterexpansion des Dampfes (Dampfdruckminderung) in der Laufschaufelreihe erzeugt Kräfte in Umfangsrichtung und ergibt eine relative Auslassgeschwindigkeit w_2 , die den gleichen Betrag wie c_1 hat, aber entgegengesetzt der Umfangsrichtung wirkt. Die absolute Auslassgeschwindigkeit c_2 ist sehr klein. Da die Strömungsverluste mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigen, hat die Überdruckturbine geringe Stufenverluste.

Die Arbeit einer Dampfmenge einer Stufe ist proportional $u \cdot \Delta c_u$, $= u \cdot (c_1 - c_2)$, also abhängig von den Umfangskomponenten der Geschwindigkeiten. Dieses Produkt wird auch als spezifische Arbeit des Dampfes bezeichnet und mit a abgekürzt:

$$a \equiv \frac{P}{\dot{m}} = u(c_1 - c_2)$$

Je geringer der Druck ist, desto weniger Energie steckt in dem Dampf, und die Turbinenschaufeln müssen größer sein (Bild 32). Am größten sind demnach die außen liegenden Schaufeln von Niederdruckturbinen (der Dampf wird in der Mitte eingeblasen). In ihrem Außenbereich ist die Umlaufgeschwindigkeit so groß, dass sie Überschallgeschwindigkeit erreichen kann.



Abb. 33: Turbinenstrang des HKW Römerbrücke II: Montage des Niederdruckteils

Für die Niederdruckturbinen ist wichtig, dass am Ende der Expansion in den letzten Turbinenstufen der Dampf infolge der niedrigen Temperaturen nicht zu sehr rückkondensiert und zu nass wird. Die Dampfnässe am Ende der Expansion, die sog. Endnässe ($1 - x$; x : Verdampfungsgrad), darf 0,10 bis 0,12 nicht überschreiten. Bei zu hoher Endnässe tritt nämlich in den Endstufen der Turbine Tropfenschlag auf, der zu einem technisch ungünstigen Verhalten des Dampfes (und dadurch zu einem geringeren Turbinenwirkungsgrad) und vor allem zu Erosionen der Turbinenbeschaufelung führt.

Wirkungsgrad von Turbinen:

Der totale Turbinenwirkungsgrad

$$\eta_{\sigma} \equiv \frac{1}{1 - j/a}$$

ist abhängig von der inneren Reibung des Dampfes, die im dissipativen Anteil der Dampfwärme $\int T ds$ begründet liegt, und der spezifischen Arbeit a . Beide Größen j und a sind abhängig von der Geometrie der Turbine, genauer gesagt vom Ein- und Austritt der Schaufelstufen.

Die größten Turbinenstränge (Bild 31) haben bei Dampfkraftwerken mit konventionellen Brennstoffen Einheitsleistungen bis ca. 800 MW (einer der größten Turbostränge ist im Kraftwerk Bexbach 3 installiert). Die Einzelwirkungsgrade der Turbinen liegen zwischen 90 und 93 %. Dieses Wirkungsgradniveau stellte bisher das wirtschaftliche Optimum dar, wird aber seit einigen Jahren durch Neubesatz mit rechnergestützt optimierten Schaufeln um ca. einen Prozentpunkt angehoben.

Generatoren

Der Generator wandelt die von den Turbinen bereitgestellte mechanische Drehenergie in elektrische Energie (Strom) um. Er ist bei großen Anlagen direkt an die Turbinenwelle angebunden, deshalb wird die Einheit Turbinen + Generator oft auch als Turbosatz bezeichnet.

In thermischen Kraftwerken kommen fast ausschließlich Vollpol- („Turbo“-)Generatoren zum Einsatz, die aus einem massiven Rotorkörper aus magnetischem Stahl und einem geblechten Stator in einem zylindrischen Gehäuse mit den dazugehörigen, in Nuten eingebetteten Wicklungen bestehen.

Wie bereits bekannt²³, erzeugt die Rotorspule, die in der magnetisch aktiven, im Wicklungsbereich zu einer Walze verdickten Rotorwelle in gefrästen Nuten liegt, ein drehendes Gleichfeld. Die Drehfrequenz dieses magnetischen Gleichfeldes wird von der Umdrehungszahl des Rotors (und damit von der Turbinenumdrehungszahl) vorgegeben und entspricht bei zweipoligen Maschinen der Frequenz des Netzes. Das drehende Gleichfeld induziert somit in der Statorwicklung ein dreiphasiges Wechselfeld mit fester Frequenz (Europa: 50 Hz, Nordamerika: 60 Hz). Die Einbettung der Wicklungen in Nuten garantiert einen magnetischen Kreis mit minimalem Durchflutungsbedarf.

Die elektrische Energie wird von den Statorwicklungs-Ableitungen auf einer Spannungsebene zwischen 12 und 30 kV über den Kraftwerkstransformator und die Schaltanlage an das elektrische Netz abgegeben.

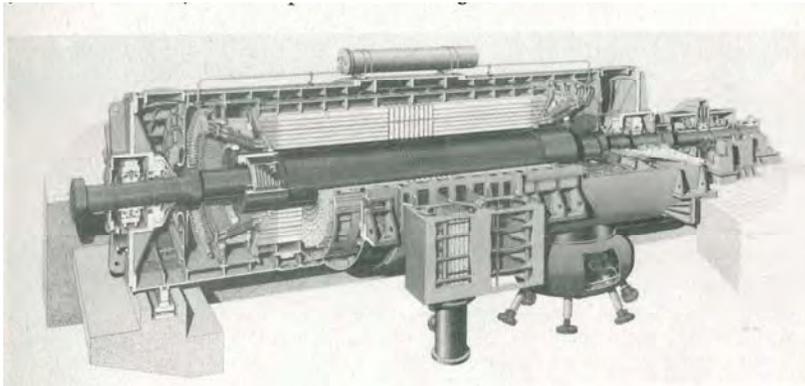


Abb. 34: Großer Turbogenerator 400 MVA (Werkbild ABB)

Die mit hohen Umlaufgeschwindigkeiten drehenden Turbogeneratoren (50 bzw. 60 Umdrehungen pro Sekunde bei zweipoligen Generatoren) erfordern für den Rotor, wie die rotierenden Teile der Turbinen, eine äußerst stabile Ausführung, um verheerende Schäden durch Auseinanderfliegen der tonnenschweren Teile zu vermeiden. Daher muss auf die Anforderungen an das Material der Rotorkappen, die die Rotor-(Erreger-)

²³ Prof. Dr. H. -J. Koglin: Elektrische Energietechnik 1+11, Kap 6: Betriebsverhalten von Generatoren. Vorlesung am Lehrstuhl für Energieversorgung an der Universität des Saarlandes

Wicklung in den Nuten halten, sorgfältig geachtet werden. Auf die Oberfläche eines großen zweipoligen Turbogenerators wirken Zentrifugalkräfte vom mehr als tausendfachen der Erdbeschleunigung!

Große Turbogeneratoren gehören zu den leistungsstärksten und ausgereiftesten Maschinen der Technik. Die größten Kraftwerksgeneratoren haben über 1.600 MVA (Mülheim-Kärlich) Nennleistung. Sie sind seit Jahrzehnten immer weiter optimiert worden und erreichen mittlerweile Auslegungswirkungsgrade von 99 %. Da seit ca. 15 Jahren die durchschnittliche Einheitsleistung nicht mehr zunimmt, wird sich der technische Fortschritt bei der Generatorentwicklung nur noch in kleinen Schritten bewegen.

Wichtig für große Generatoren mit ihrer hohen Energiedichte sind die Kühlsysteme. Mittlerweile können Maschinen bis zu 200 MVA mit Luft gekühlt werden. Oberhalb dieser Leistungsklasse kann die Kühlluft die Kupfer-, Eisen- und Reibungsverluste nicht mehr genügend aufnehmen, da wegen der hohen Luftdichte die Erwärmung infolge Luftreibung größer ist als die Kühlwirkung. Für diese großen Maschinen verwendet man Wasserstoffgas als Kühlmittel, das eine vierzehn mal geringere Dichte und eine vierzehn mal höhere Wärmekapazität hat. Das Wasserstoffgas steht im Generatorgehäuse unter einem Druck zwischen 3 und 6 bar und wird, von auf der Welle sitzenden Ventilatoren angetrieben, im Luftspalt zwischen Stator und Rotor entlang den Wicklungen geführt. Die Eisenverluste des Statorbleches werden auf der Blechpaket-Rückseite vom Wasserstoffstrom abgeführt. In größeren Maschinen (ab 350 MVA) wird die Stromwärme der Wicklungsleiter direkt, das heißt durch Hohlleiter in den Wicklungsstäben, abgeführt, meist mit Wasser, das von allen Kühlmitteln die höchste Wärmekapazität hat.

Selbstverständlich steigt mit dem Einsatz dieser besonderen Kühlmittel auch der Aufwand an Hilfseinrichtungen, z. B. druckdichte Wellenlager zur Verhinderung von Gasexplosionen infolge Vermischung von Wasserstoff mit Luft, und Aufbereitungsapparaturen zur Reinigung von Wasserstoff und Kühlwasser. Da aber bei

den großen Einheitsleistungen die Verminderung der Verluste in Leistungsgewinnen im Megawattbereich resultiert, ist dieser hohe Aufwand meistens gerechtfertigt.

Kondensatoren und Rückkühlsysteme für den Wasser-Dampf-Kreislauf

Der Kondensator sorgt im Wasser-Dampf-Kreislauf hinter der letzten (Niederdruck-) Turbinenstufe für die Rückwandlung des kalten und entspannten Dampfes in Wasser, bevor dieser Wärmeträger (Dampf/Wasser) wieder dem Kessel zum erneuten Verdampfen zugeführt werden kann und sich der Kreislauf geschlossen hat. Durch den geschlossenen Kreislauf wird es möglich, dass der Dampf in der Turbine auf tiefere Drücke als den Umgebungsdruck expandiert.

Die Erzeugung eines möglichst hohen Vakuums ist die wichtigste Funktion des Kondensators. Der Exergiegewinn $e_2 - e_1$ wird umso größer, je niedriger die Kondensationstemperatur T_0 ist und je länger der Weg der isentropen Entspannung (entlang der $s_2 = \text{const.}$ -Linie im T-s-Diagramm) ist. Um eine möglichst niedrige Kondensationstemperatur zu erreichen, muss der Dampfdruck möglichst gering sein, sonst besteht die Gefahr von zu hoher Endnässe und Tropfenschlag in den Turbinenstufen.

Der Kondensator muss so dimensioniert werden, dass

- die gesamte Abwärme (Anergie) $(BQ)_{12} = b_2 - b_1$ und zusätzlich
- der Exergieverlust, der sich aus der Differenz zwischen der Kondensationstemperatur T_0 und der Umgebungstemperatur T_u ergibt und ebenfalls über die Kraftwerkskühlung abgeführt werden muss, vom Kühlwasser aufgenommen werden kann. Wie bereits ausgeführt, geht mehr eingesetzte Brennstoffenergie als Anergie über das Kühlsystem in die Umgebung, als elektrische Nutzenergie P_{el} gewonnen wird: Das Verhältnis ist ca. 1,1 MW abzuführender Kondensationswärme pro 1 MW elektrischer Leistung. Es ist, wie erwähnt, vom Kondensatordruck abhängig.

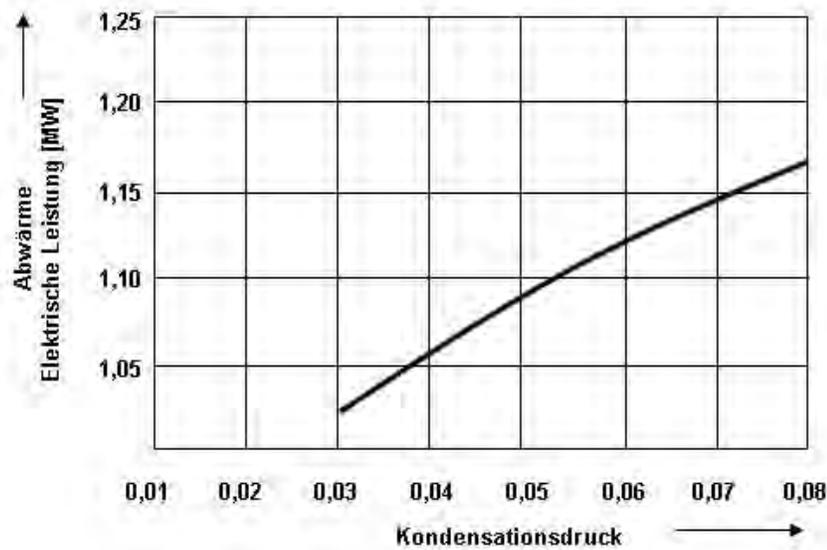


Abb. 35: Spezifische Abwärme (540 °C) eines fossil beheizten Kraftwerks (Frischdampf 250 bar,

Je nach Größenklasse und Kühlmittel gibt es verschiedene Kondensatorbauarten. Die gängigste Ausführung ist der Oberflächenkondensator, der im Prinzip ein Rohrbündel-Wärmetauscher ist. Das Kühlwasser (oder die Kühlluft) entzieht über die Wärmetauscherrohre dem aus der Turbine kommenden Nassdampf die Wärmeenergie, so dass sich der Dampf an den Rohrflächen niederschlägt und in dem Kondensatsammelgefäß sammelt.

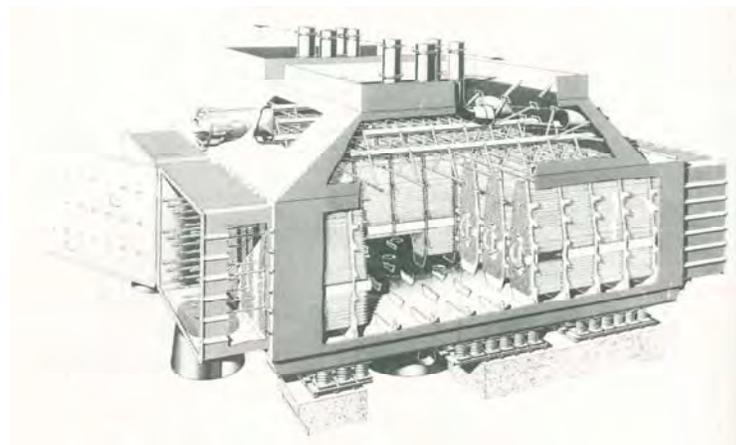
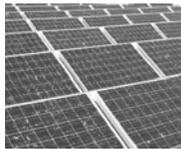


Abb. 36: ABB-Teilbündelkondensator

Das Kühlmittel, das die Abwärme des Dampfes aufgenommen hat, kann auf verschiedene Weise wieder rückgekühlt werden. Üblich sind nasse Rückkühlungen mit Kühltürmen, in denen ein Teil des Kühlwassers verdunstet und die Abwärme durch die Umgebungsluft, die unten im Kühlturm einströmt und durch natürlichen Zug den Kühlturm durch die obere Öffnung verlässt. Das nicht verdunstete Kühlwasser wird wieder dem Kühlkreislauf zugeführt. Der Kühlwasserverlust wird in der Regel mit Flusswasser ausgeglichen.

Eine andere Variante ist die offene Frischwasserkühlung mit Flusswasser. Hier wird das erwärmte Kühlwasser dem Fluss wieder zugeführt. Dabei besteht die Gefahr, dass der Fluss über das zulässige Maß und mit Schäden für die Flussbiotope erwärmt wird. Der offenen Frischwasser-Kraftwerkskühlung sind daher enge Auslegungsgrenzen gesetzt.



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

3.2 Kraftwerkstechnik: Wärmekraftwerke (Fortsetzung)

3.2.4 Maßnahmen zur Erhöhung des Kraftwerks- wirkungsgrades

3.2.5 Das moderne Dampfkraftwerk

3.2.4 Maßnahmen zur Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrades

Mit der einfachen Dampfkraftanlage nach dem Prozess, der in Bild 27 dargestellt ist, lassen sich nur Kraftwerks-Gesamtwirkungsgrade erreichen, die kaum über 30% liegen. Nur eine Modifikation des Clausius-Rankine-Prozesses kann zu besseren Resultaten führen.

Zwischenüberhitzung

Die begrenzende Größe ist die höchstzulässige Dampfnässe, die am Ende der Expansion nach den letzten Niederdruck-Turbinenstufen nicht überschritten werden darf. Die maximale Dampfnässe $(1-x)$ liegt bei ca. 0,1, bzw. der Mindestdampfgehalt x bei ca. 0,9. Bei zu hoher Dampfnässe tritt nämlich an den Endstufen der Turbine Tropfenschlag auf, der zu einem strömungstechnisch ungünstigen Verhalten des Dampfes (dadurch kleinerer Turbinenwirkungsgrad η_T) und vor allem zu Erosionen der Turbinenbeschaufelung führt. Die Dampfnässe $(1-x)$ ist nach Bild 27 abhängig vom Entropiewert s , und damit vom Prozessablauf:

Je höher die Frischdampf-Temperatur T_2 ist, desto weiter rechts im Diagramm Bild 27 liegt die Expansionslinie, und desto trockener (d.h. näher an der $x=1$ -Linie) ist der Dampf am Ende der Expansion. Allerdings sind der Erhöhung der Frischdampf-Temperatur durch die Werkstoffe des Dampferzeugers Grenzen gesetzt. Die obere Grenze liegt bei $T_7 = 565 \text{ °C}$. Der Einsatz von austenitischen Stählen für höhere Frischdampf-Temperaturen hat sich als nicht wirtschaftlich erwiesen. An der selben Stelle wurde erwähnt, dass sich bei gegebenem T_2 die Mitteltemperatur T_m , die die exergetischen Wirkungsgrade beeinflusst, nur durch Erhöhen des Frischdampfdrucks p steigern lässt.

Das Diagramm in Bild 37 demonstriert, dass eine Erhöhung des Frischdampfzustandes den Zustand des Dampfes am Ende der Expansion (Zustand 3) zu einer höheren, nicht zulässigen Dampfmasse führt - gegenüber Bild 27 ist berücksichtigt, dass die Expansion in der Turbine (2 > 3) nicht isentrop ist und Irreversibilitäten beinhaltet.

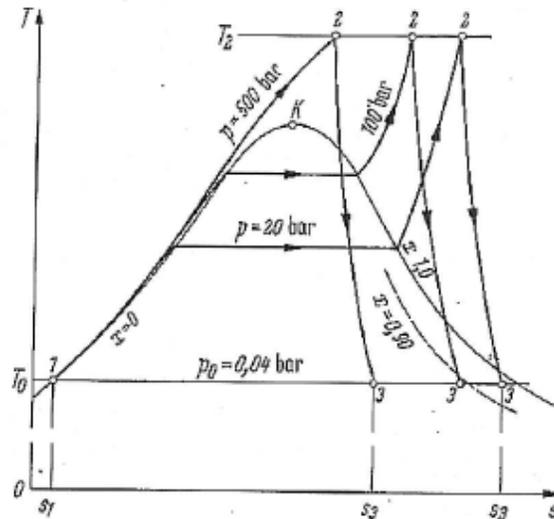


Abb. 37: Verschiebung des Abdampfzustandes 3 durch Erhöhen des Frischdampfzustandes p^{20}

Der Frischdampfdruck p wird also durch die zulässige Dampfmasse so begrenzt, dass er erheblich unter dem optimalen Frischdampfdruck p_{opt} (Tabelle 2) liegt, so dass der Gesamtwirkungsgrad ca. 30% nicht überschreitet. Von dieser Begrenzung kann man sich durch die Zwischenüberhitzung befreien: Der aus dem Dampferzeuger kommende Dampf expandiert in einer Hochdruckturbine bis auf einen Zwischendruck $p_3 = p_z$; er wird dann erneut in den Dampferzeuger geleitet und auf die Temperatur T_4 überhitzt, die meistens mit der Temperatur T_2 übereinstimmt. Nun erst expandiert der Dampf in einer zweiten (Niederdruck-)Turbine auf den Kondensatordruck P_0 (Bild 39). Im Zustand 5 am Ende der Expansion hat jetzt der Dampf eine größere Entropie s_5 und dem entsprechend einen hohen Dampfgehalt x_5 , so dass keine Gefahr des Tropfenschlags und einer Schaufelerosion in den Endstufen der Niederdruckturbine besteht.

Bei Anwendung der Zwischenüberhitzung kann der Kesseldruck p ohne Rücksicht auf die Endnässe erhöht werden. Dadurch wird das Temperaturniveau des Dampfes im Kessel angehoben, und es verringert sich der Exergieverlust bei der Wärmeübertragung vom Verbrennungsgas auf den Dampf. Diese Verbesserung äußert sich in einem höheren Wert der thermodynamischen Mitteltemperatur T_m im Vergleich zu einem Prozess ohne Zwischenüberhitzung, der bei einem wesentlich niedrigeren Kesseldruck ablaufen muss, um eine zu große Endnässe zu vermeiden. Die Steigerung von T_m durch Zwischenüberhitzung hat eigentlich zwei Ursachen: die Erhöhung des Kesseldrucks und die zusätzliche Wärmeaufnahme im Zwischenüberhitzer bei der besonders hohen Mitteltemperatur T_{mz} .

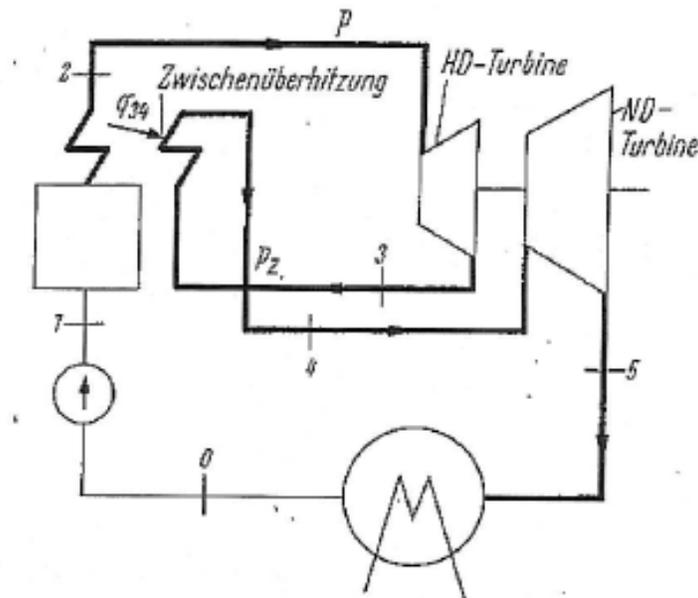


Abb. 38: Schaltbild einer Dampfkraftanlage mit Zwischenüberhitzung

Durch die Zwischenüberhitzung vergrößert sich der Gesamtwirkungsgrad θ von ca. 0,30 auf ca. 0,33.

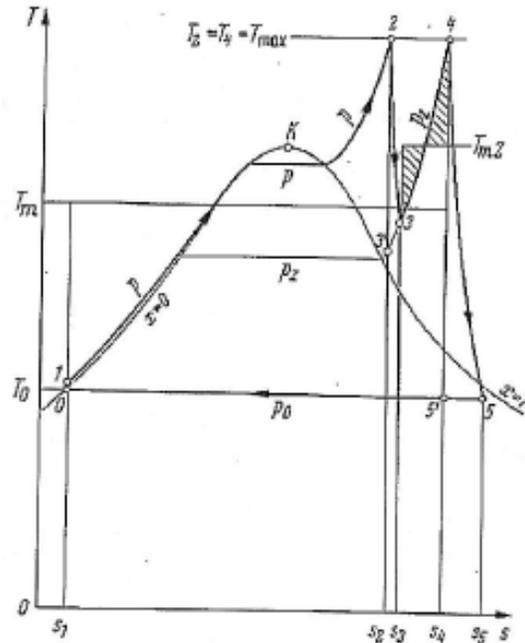


Abb. 39: Zustandsänderungen des Wasserdampfes beim Prozess mit Zwischenüberhitzung. T_m : thermodynamische Mitteltemperatur der gesamten Wärmeaufnahme, $T_{m,z}$: thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme im Zwischenüberhitzer

Regenerative Speisewasservorwärmung

Eine weitere Erhöhung der thermodynamischen Mitteltemperatur T_m über den durch Zwischenüberhitzung erreichten Wert hinaus lässt sich nur durch Anheben der Speisewassertemperatur T_1 erreichen. Das Speisewasser muss vor dem Eintritt in den Dampferzeuger vorgewärmt werden. Die hierzu erforderliche Wärme gibt ein Dampfstrom ab, der der Turbine entnommen wird (Bild 40). In die Turbine tritt der Frischdampf ein, der vom Frischdampfdruck p auf einen Zwischendruck, den sog. Entnahmedruck P_E , expandiert. Nun wird ein Teil des Dampfstroms der Turbine entnommen und dem Speisewasservorwärmer zugeführt, während der verbleibende Dampfstrom auf den Kondensatordruck P_0 expandiert. Der Entnahmedruck tritt dann mit dem Zustand E in den Speisewasservorwärmer ein und gibt dort einen Teil seines

Energieinhaltes als Wärme an das Speisewasser ab, das dadurch von der Temperatur t_1 auf die Vorwärmtemperatur t_v erwärmt wird. Der Entnahmedampf kondensiert im Vorwärmer und kühlt sich bis auf die Temperatur t_F ab, die nur wenig über t_1 liegt. Das Kondensat wird gedrosselt und dem Speisewasserstrom zugemischt, der aus dem Kondensator kommt.

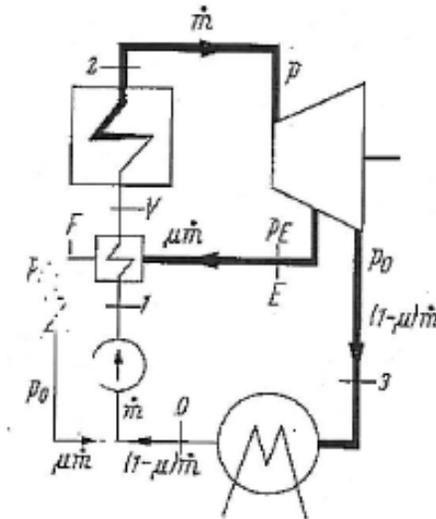


Abb. 40: Dampfkraftanlage mit einem Speisewasservorwärmer

Durch die Speisewasservorwärmung erhöht sich das Temperaturniveau des Dampfes im Dampferzeuger. Der Exergieverlust bei der Wärmeübertragung wird kleiner. Die vom Wasserdampf als Wärme aufgenommene Energie hat einen hohen Exergiegehalt, während die vom Entnahmedampf gelieferte Energie einen geringen Exergiegehalt ($e_v - e_1$) und einen großen Anergiegehalt ($b_v - b_1$) hat, siehe Bild 41. Mit steigender Vorwärmtemperatur t_v erhöht sich der exergetische Wirkungsgrad des Dampferzeugers, und es wird

$$\zeta_{WE} \zeta_{DE} = \eta_K \frac{H_u}{e_B} \left(1 - \frac{T_u}{T_{mv}} \right)$$

mit $T_{mv} > T_m$.

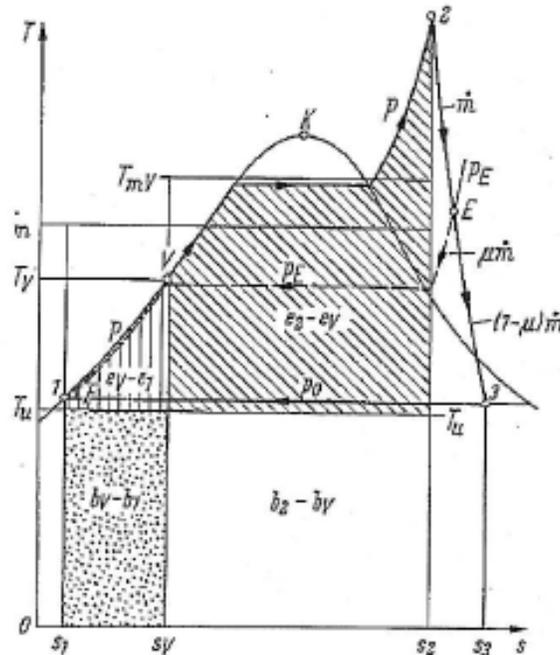


Abb. 41: Zustandsänderungen des Wassers und des Entnahmedampfes (gestrichelt) sowie die Exergieerhöhung ($e_v - e_1$) des Speisewassers im Vorwärmer und die Exergieaufnahme ($e_2 - e_v$) im Dampferzeuger

Das Produkt $\zeta_{WE\zeta_{DE}}$ wächst jedoch nur dann, wenn sich der Kesselwirkungsgrad θ_K durch die regenerative Speisewasservorwärmung nicht verschlechtert. Dies geschieht aber, denn das Abgas aus dem Dampferzeuger kann nicht mehr bis in die Nähe von t_1 abgekühlt werden; seine Austrittstemperatur t_A muss ja für den nachgeschalteten Speisewasservorwärmer über der Vorwärmtemperatur t_v liegen, die bei einem modernen Dampfkraftwerk etwa 250°C beträgt.

Um diesen erhöhten Abgasverlust zu vermeiden, kombiniert man die regenerative Speisewasservorwärmung mit der Vorwärmung der Verbrennungsluft durch das Abgas, siehe Bild 42 Im Luftvorwärmer kühlt sich das Abgas auch bei Anwenden der Speisewasservorwärmung auf eine niedrige Temperatur t_A ab, die durch den Säuretaupunkt (Kondensatbildung!) und nicht durch die Vorwärmtemperatur t_v , des Speisewassers bestimmt wird. Durch die kombinierte Luft- und

Speisewasservorwärmung wird also 0_K konstant gehalten und $\zeta_{WE\zeta_{DE}}$ (durch Erhöhen von T_m) merklich gesteigert.

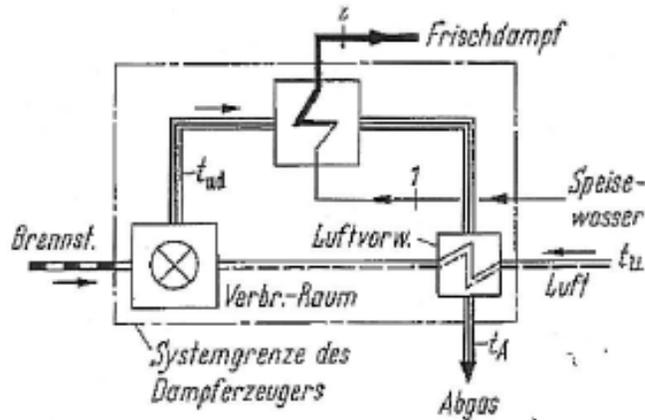


Abb. 42 Schema der regenerativen Luftvorwärmung durch das Abgas

Da im Speisewasservorwärmer Wärme bei endlichen Temperaturdifferenzen übertragen wird, tritt hier ein neuer Exergieverlust auf, der mit steigender Vorwärmtemperatur t_v größer wird. Dadurch nimmt der exergetische Wirkungsgrad

$$\zeta_{WKM} = \frac{-w_1}{e_2 - e_v}$$

des Kreisprozesses mit steigendem t_v ab. Es verringert sich nämlich die Nutzarbeit $-w_1$ stärker als die Exergiedifferenz ($e_2 - e_v$). Somit erreicht der Gesamtwirkungsgrad

$$\zeta = \zeta_{WE}\zeta_{DE}\zeta_{WKM}$$

bei einer bestimmten Vorwärmtemperatur ein Maximum, siehe Bild 43. Ein Überschreiten dieser optimalen Vorwärmtemperatur ist sinnlos, denn die Verringerung des Exergieverlustes im Dampferzeuger wird dann durch die Zunahme des

Exergieverlustes bei der Wärmeübertragung im Vorwärmer aufgezehrt.

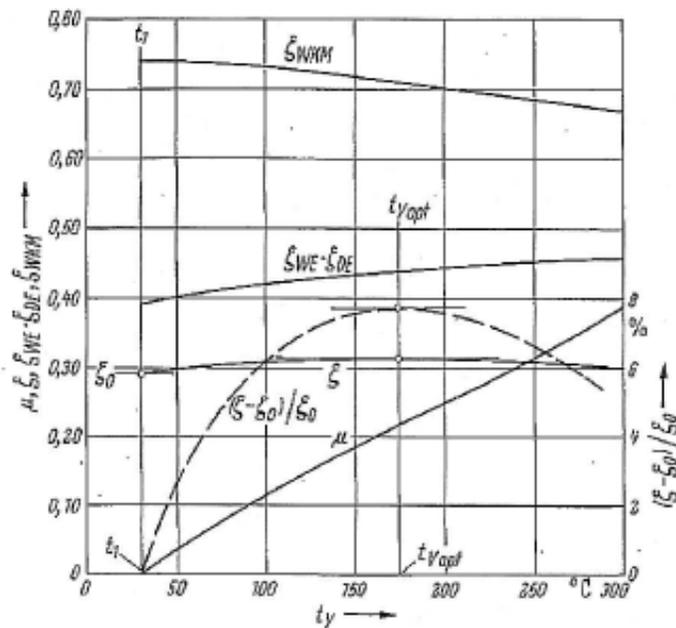


Abb. 43: Exergetische Wirkungsgrade ζ , ζ_{WE} , ζ_{DE} und ζ_{WKM} sowie Anteil μ des Entnahmedampfes in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur bei einem Speisewasservorwärmer. Gestrichelt: relative Vergrößerung $(\zeta - \zeta_0) / \zeta_0$ des exergetischen Gesamtwirkungsgrades durch die Speisewasservorwärmung

Der Exergieverlust bei der Wärmeübertragung im Vorwärmer lässt sich dadurch verringern, dass man nicht einen Vorwärmer, sondern mehrere Vorwärmer mit entsprechend vielen Entnahmen in der Turbine vorsieht. Dadurch lässt sich der Temperaturverlauf der verschiedenen Entnahme-Dampfströme dem Temperaturverlauf des vorzuwärmenden Speisewassers besser anpassen. Mit wachsender Zahl der Vorwärmstufen steigt die optimale Vorwärmtemperatur und auch der exergetische Gesamtwirkungsgrad; dieses geschieht jedoch immer langsamer, je größer die Anzahl der bereits vorhandenen Vorwärmer ist. Es gibt eine Höchstzahl von Vorwärmern und Entnahmen, deren Überschreitung aus wirtschaftlichen Gründen nicht gerechtfertigt ist.

3.2.5 Das moderne Dampfkraftwerk

Die in Kap. 3.2.2 erörterten Maßnahmen zur Verbesserung der einfachen Dampfkraftanlage werden in einem modernen Dampfkraftwerk gleichzeitig angewendet. Große, mit Kohle befeuerte Kraftwerke haben einmalige Zwischenüberhitzung bei Frischdampfdrücken um 185 bar und Turbineneintrittstemperaturen zwischen 525 °C und 550 °C. Das Speisewasser wird in sieben oder acht Vorwärmer auf etwa 250 °C vorgewärmt.

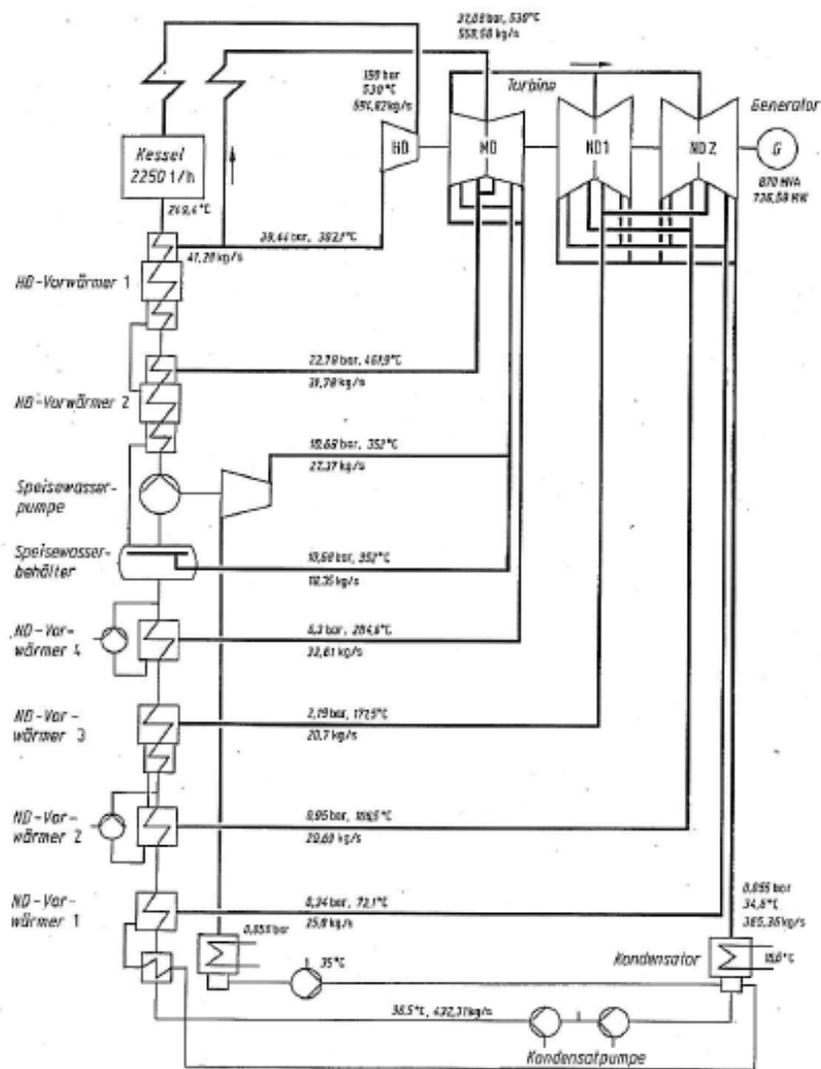


Abb. 44: Wärmeschaltbild des 750 MW-Steinkohlekraftwerks Bexbach (vereinfacht)



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

2. Gas-(Erdgas-)versorgung

2.1 Einsatzmöglichkeiten von Erdgas

2.2 Gasversorgungstechnik

2.3 Gasverteilung

2.4 Gaswirtschaft

2.5 Arbeitssicherheit, Gesetze und Verordnungen

II. Technik der kommunalen Versorgung

2. Gas-(Erdgas-)versorgung

2.1 Einsatzmöglichkeiten von Erdgas

Erdgas ist ein vielseitig einsetzbarer fossiler Energieträger. Mit Erdgas können sowohl stationäre als auch mobile Verbraucher versorgt werden.

Erdgas wird

- zur Stromerzeugung in Kraftwerken, meist in Gasturbinen mit hohen elektrischen Umwandlungswirkungsgraden ($0 \approx 45\%$, bei gleichzeitigem Einsatz von Gas- und Dampfturbinen (GuD) über 50%) und schnellen Reaktionszeiten zur Spitzenlastbereitstellung eingesetzt. Alle Gaskraftwerke können ebenfalls der Kraft-Wärme-Kopplung, also der gleichzeitigen Strom- und Wärmebereitstellung dienen.
- zur Wärmeerzeugung verwendet
 - in Gaskesseln mit z. T. sehr hohen Wirkungsgraden (Brennwertkesseln)
 - mit Gasheizstrahlern im gewerblichen Bereich
 - im Hausbereich für die Warmwasserbereitstellung (Speicher-, Durchlauferhitzer) und das Kochen
- in der Industrie (verschiedenste Arten von Gasbrennern und
- für den Antrieb von Gasmotoren (z.B. Blockheizkraftwerke)
- im Verkehrsbereich (Erdgas-Pkw, Erdgasbusse) für emissionsarmen Transport:
- Erdgas-Pkw, die zunehmend von den Automobilfirmen angeboten werden

Erdgasbusse für den öffentlichen Personen-Nahverkehr, die zunehmend im städtischen Bereich eingesetzt werden (Beispiel Saarbrücken: 2005: 90 Erdgasbusse)

Zusammensetzung von Erdgas

Erdgas (auch Naturgas genannt) besteht im Wesentlichen aus

- Methan (CH_4 , 85 - 98%),
- Äthan (C_2H_6 , 0,5 - 8%),
- Propan (C_3H_8 , 0,2 - 2%)
- und Butan (C_4H_{10} , 0,08 - 0,6%)

sowie aus Spuren höherer Kohlenwasserstoffe

und aus den inerten Komponenten

- Stickstoff (N_2 , 1 - 1,5%) und
- Kohlendioxid (CO_2 , 0,1 - 1,5%),

die zum Brennwert nichts beitragen.

Die unterschiedlichen Zusammensetzungen sind eine Folge der Herkunft des Gases aus verschiedenen Lagerstätten (Deutschland, Niederlande, GUS-Staaten, Norwegen, Dänemark) und der verschiedenen Mischungen im Gas-Verbundnetz („Verbundgas“),

Im Wesentlichen unterscheidet man zwei Hauptgruppen von Erdgas:

Erdgas L (low) und Erdgas H (high).

Erdgas L hat einen Anteil von ca 10% inertem N_2 und ca. 85% CH_4 .

Bei Erdgas H entfällt der inerte N_2 -Anteil, der CH_4 -Anteil ist ca. 93%.

Im Saarbrücker Gasnetz wird Erdgas H angeboten.

Bis 1994 wurde in Teilen des Saarbrücker Versorgungsgebietes Kokereigas aus den Koksproduktionen der Hüttenindustrie (Völklingen, Dillingen) bereitgestellt, das einen relativ hohen Anteil an Wasserstoff H₂ (ca.52%) und Kohlenmonoxid CO (ca. 6%) hatte und mit dem etwa halben Brennwert von Erdgas zur Klasse der Schwachgase gehört.

Die Verwendung des Schwachgases Gichtgas (aus dem Hüttenprozess der Halberger Hütte) im Heizkraftwerk Römerbrücke wurde 1995, nach der Stilllegung des konventionellen Hochofens auf der Halberger Hütte, eingestellt.

Die Nutzung von Naturmethan (Grubengas) im Blockheizkraftwerk Moltkestraße ist eine Spezialität der Saarbrücker Energieversorgung. Dieses Grubengas ist damit das einzige Nicht-Erdgas, das in Saarbrücken noch energetisch verwertet wird.

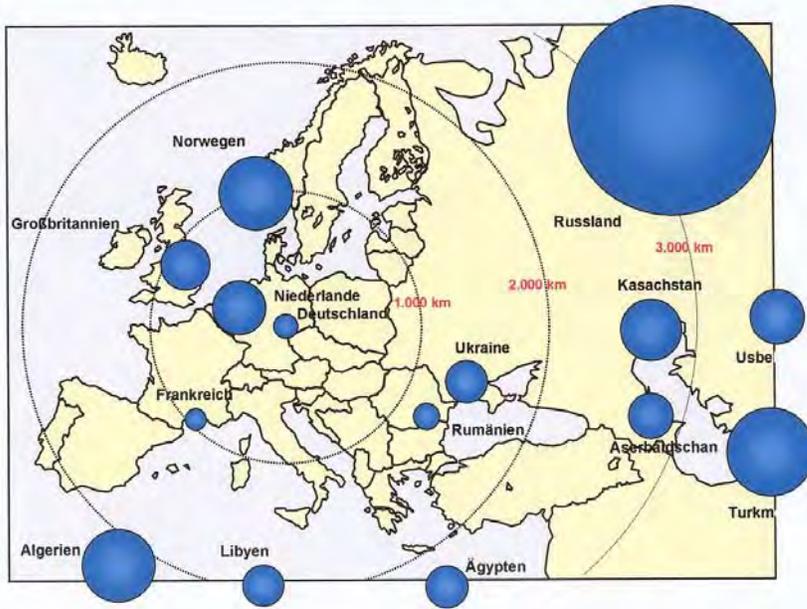
Anteil des Gases an den eingesetzten Energieträgern:

Im Jahre 2002 wurden in der Bundesrepublik Deutschland ca. 1.048 Mrd kWh Erdgas verteilt (s. Tabelle).

Aufkommen von Erdgas in Deutschland

Herkunftsland	Mrd kWh
Inland	197,2
Niederlande	189,7
Norwegen	268,0
Russland	347,1
Sonst.	46,2
Gesamt	1.048,2

Erdgasreserven 1999



Erdgasreserven 2020

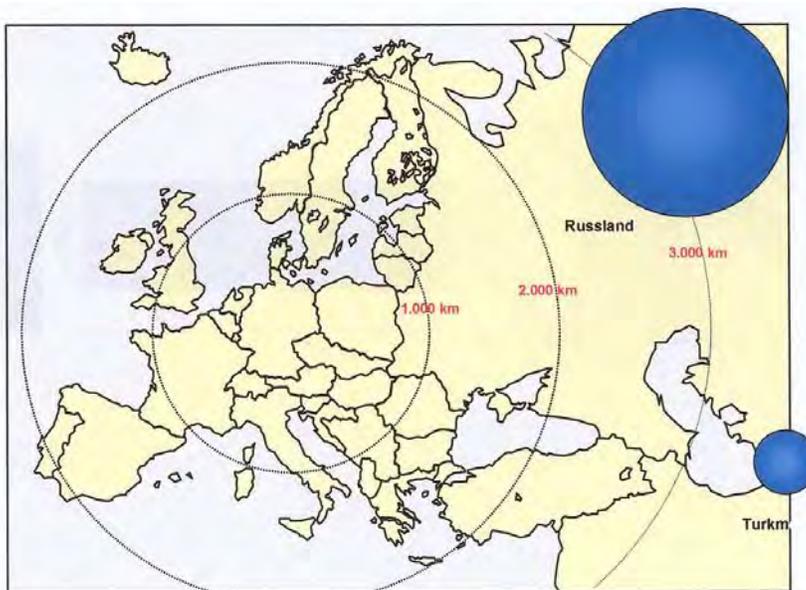


Abb. 15 Erdgasreserven Europa

Im Verhältnis zu den anderen Primärenergieträgern steigt der Erdgasanteil seit Jahren ständig an. Die Wachstumsrate für Deutschland betrug 1995 9,5% - in den neuen

Bundesländern sogar 30,9%! Neben der kühlen Witterung sind hierfür auch Effekte des Wandels der Energie-Infrastruktur (Umstellen von Stadtgas auf Erdgas, Zunahme erdgasbeheizter Wohnungen, Inbetriebnahme von Heizkraftwerken auf Erdgasbasis) verantwortlich.

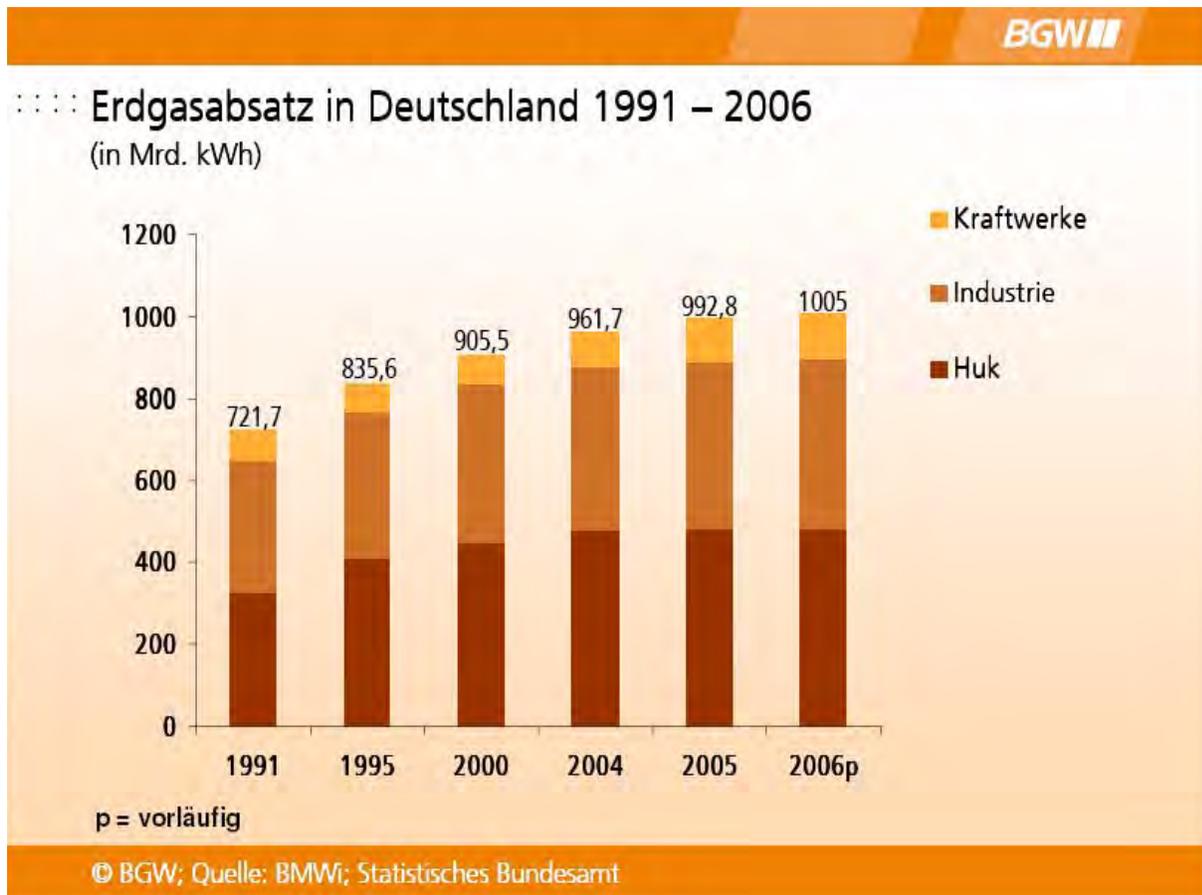


Abb. 16 Erdgasabsatz in der Bundesrepublik Deutschland 1995

Gasverbrauchscharakteristik einer Kommune am Beispiel Saarbrücken

2005 wurden in Saarbrücken (ca. 180.000 Einwohner) über 25.000 Hausanschlüsse 1.590 Mio kWh Gas abgesetzt. Etwa 2/3 wurde als Heizgas, ca. 1/3 in der Industrie verwendet.

Auch in Saarbrücken ist der Gasverbrauch in den vergangenen Jahren angestiegen.

2.2 Gasversorgungstechnik

Grundlegendes über den Gaszustand und die Gaseigenschaften Norm- und Standardzustand von Erdgas:

Als physikalischer Normzustand ist 0° C und 1,01325 bar Druck vereinbart. Dieser Zustand wird im Allgemeinen als Bezugszustand bei der Angabe von Gasmengen und Kennwerten verwendet.¹³

Für diesen Zustand ist das Normvolumen V_n und die Normdichte $\rho_n = m/V_n$ definiert (m: Masse des Gases).

Für den Transport des Gases zu Versorgungszwecken ist ein Gasdruck notwendig (analog der elektrischen Spannung beim Stromtransport). Über die Länge der Transportleitung treten Druckverluste auf (horizontale Fortleitung, Kompressibilitätszahl = 1).

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}$$

Der Druckverlust steigt also mit der Widerstandszahl λ , der Gasdichte ρ , und er sinkt bei größerem Rohrdurchmesser d . Diese Komponenten können also als „Durchflusswiderstand“ bezeichnet werden.

Die Analogie zum Ohmschen Gesetz endet mit der Gasströmungsgeschwindigkeit w , die im quadratischen Verhältnis in den Druckverlust eingeht - im Gegensatz zum elektrischen Strom bei der Berechnung des elektrischen Spannungsfalls.

¹³ G. Cerbe, H.-P. Charles, G. Knauf, J. Lehmann, H. Lethen, 11. Mauruschat: Grundlagen der Gastechnik, Carl

Die Widerstandszahl (Rohrreibungszahl) λ wird mit Hilfe verschiedener Näherungsformeln bestimmt, abhängig vom strömungstechnischen Verhalten in der Rohrleitung (laminare oder turbulente Strömung). Die verschiedenen Strömungserscheinungen sind unter anderem eine Folge des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Druckabfall und Gasgeschwindigkeit. Bei turbulenten Strömungen spielt der Zustand der Rohrwand eine Rolle, d. h. die Oberflächenbeschaffenheit der Rohrwand und das Rohrmaterial haben einen Einfluss auf den Druckverlust.¹⁴

Gasdruck:

Entsprechend den Transportlängen und den daraus resultierenden Druckverlusten gibt es für Verteilnetze verschiedene Druckbereiche:

Hochdruck: ab 1 bar

Mitteldruck: 100 mbar bis 1 bar

Niederdruck: bis 100 mbar

Brennwert und Heizwert:

Brenn- und Heizwert unterscheiden sich durch die Energie, die bei der Kondensation von Wasser im Abgas bei der Bezugstemperatur (25°C) freigesetzt wird. Es gilt:

$$H_0 = H_u + r \cdot \frac{9h + w}{100}$$

H_u : Heizwert (unterer Heizwert) [MJ/kg oder MJ/m³]

H_0 : Brennwert (oberer Heizwert) [MJ/kg oder MJ/m³]

w : Feuchtigkeitsmenge im Abgas, die durch 1 kg des eingesetzten Gases verursacht wird (in %)

Mauser Verlag, München Wien, 2. Auflage 1982

¹⁴ R.Eberhard, R. Hüning: Handbuch der Gasversorgungstechnik, Oldenbourg Verlag, München 1984

- h: Wasserstoffgehalt des Gases in %
r: Verdampfungsenthalpie (Kondensationswärme) des im Abgas enthaltenen
Wassers: 2.500 kJ/kg oder 2.000 kJ/m³

Üblicherweise wird mit dem Heizwert (Wasserdampf im Abgas enthalten) gerechnet.

2.3 Gasverteilung

Die Gasverteilung innerhalb der Kommune ist zurzeit die wichtigste Aufgabe der kommunalen Gasversorgungsunternehmen. Die Bedeutung der Gasanwendung wird allerdings im Rahmen des Ausbaus von Energiedienstleistungen zunehmen.

Das Erdgas wird über weite Strecken vom Förderort in Ferntransport-Rohrleitungen in die Verbrauchsgebiete transportiert. Um dem Druckverlust beim Transport zu begegnen, sind Druckerhöhungen in Verdichterstationen und möglichst hohe Leitungsdrücke erforderlich. Die höchsten derzeit üblichen Rohr-Betriebsdrücke sind 80 bar. Der durchschnittliche Druckabfall bei Hochdruckleitungen liegt bei ca. 0,1 bar/km.

Die großen Überlandleitung in die Verbrauchsregionen haben 1200 mm Durchmesser und werden mit einem Druck von 80 bar betrieben. Diese Leitungen transportieren ca. 20 mal soviel Energie wie die größte Stromüberlandleitung (drei 380 kV-Systeme je Mast) nahezu verlustlos.

In Saarbrücken ist der Gasdruck der Hochdruckleitungen an den Übergabepunkt vom Vorlieferanten 20 bar. 30 Hauptbezugsstationen regeln das bezogene Gas auf Mitteldruckniveau herunter.

Das Mitteldruckniveau (Verteilung auf die Stadtgebiete) ist 0,8 bar, das Niederdruckniveau 40 mbar. Ca. 200 Bezugsstationen sorgen für die Entspannung auf Niederdruckniveau.

An den Hausübergabestationen wird der Druck auf den Hausdruck von 20 mbar herabgeregelt.

Gasleitungen und Rohre

Gasrohre sind gemäß den spezifischen Anforderungen aus verschiedenen Materialien gefertigt:

- Gussrohre, heutzutage aus duktilem Gusseisen (Gusseisen, in dem Kohlenstoff kugelförmig eingelagert ist). Hauptanwendungsgebiet: Versorgungsleitungen höherer Drücke bis 16 bar. Die alten Rohre aus Grauguss werden zunehmend wegen ihrer Bruchgefahr ersetzt.
- Stahlrohre, für Transport- und Versorgungsleitungen höherer und hoher Drücke. Stahl ist korrosionsbeständig und elastisch, dadurch sind größere Baulängen möglich und damit weniger Verbindungen nötig. Daher ist Stahl der am häufigsten verwendete Rohrwerkstoff.
- Kunststoffrohre, meist aus PE (Polyäthylen) oder Hart-PVC (Polyvinylchlorid). Wegen ihrer Wirtschaftlichkeit werden die Kunststoffleitungen (der PVC-Anteil nimmt zugunsten des Hochdruck-Polyäthylens ab) für Drücke bis 4 bar häufig eingesetzt. Kunststoff ist korrosionsbeständig, elektrisch nicht leitend, aber bruchgefährdet bei temperaturbedingten Materialspannungen, mechanischen Belastungen und nicht alterungsbeständig.

Gussrohre werden üblicherweise mit „Tyton-Verbindungen“ (angegossene Muffen mit Gummidichtungen) verbunden.

Stahlrohre werden mit geschweißten Verbindungen und Kunststoffrohre mit Schweißmuffenverbindungen zusammengefügt.

Zu den Armaturen zählen Absperrorgane wie Schieber oder Hähne sowie Kondensatabscheider, die an Rohrnetz-Tiefpunkten das Kondensatwasser sammeln, das dort entfernt werden kann.

Gasnetze

Folgende Rohrnetzarten können unterschieden werden:

- a) Strahlenrohrnetz
- b) Verästelungsrohrnetz
- c) Ringrohrnetz
- d) vermaschtes Rohrnetz
- e) vermaschtes Ringrohrnetz

Die Planungskriterien sind Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit. Strahlen- und Verästelungsrohrnetze verursachen geringe Kosten, die Versorgungssicherheit ist aber schlecht. Die beste Versorgungsredundanz mit dem höchsten Investitionsbedarf liefern vermaschte Ringrohrnetze.

Bei der Rohrnetzplanung arbeitet man, analog zur Darstellung von elektrischen Versorgungsnetzen oder Schaltungskombinationen, mit den Elementen Strecke, Knoten und Masche.

Diese Elemente werden bei der EDV-gestützten Berechnung, Simulation und Erstellung von Bedarfsprognosen verwendet.

Die Ergebnisgrößen sind:

- der Druckverlust über die Leitungen
- der maximale Volumenstrom über die Leitungen
- die maximale Gasabgabe zur Netzversorgung.

Gasverdichteranlagen

Gas-Verdichteranlagen gleichen den Druckverlust beim Gastransport in Leitungen infolge der Rohrreibung aus.

Man unterscheidet:

- die Grundverdichtung, die am Anfang eines Transportsystems erforderlich ist, um das Gas vom Produktionsniveau auf das maximale Transportniveau anzuheben (bei Erdgas häufig nicht benötigt, weil das Erdgasfeld unter dem benötigten Anfangsdruck steht)
- die Transportverdichtung, die den Leitungsdruck über längere Entfernungen ungefähr konstant hält und damit die Transportkapazität steigert. Es gibt bei Transportleitungen einen optimalen Abstand zwischen zwei Verdichterstationen, der den wirtschaftlichsten Kompromiss zwischen der Transportkapazität und dem Investitionsaufwand für die Verdichterstationen darstellt.
- die Speicherverdichtung, die Untertagespeicher füllt.

Die Verdichtermaschinen werden in der Regel mit dem Erdgas aus dem Leitungsnetz betrieben. Man unterscheidet zwischen Kolbenverdichtern (Gasmotoren bei kleineren Mengen und hohen Verdichtungsverhältnissen) und Turboverdichtern (Gasturbinen bei großen Mengen und kleinen Druckdifferenzen).

Gas-Druckregelanlagen, Schieber, Ventile und Zähler

Eine Gasdruckregelung hat die Aufgabe, hohen Gasdruck ein- oder mehrstufig auf den Wert zu reduzieren, den die nachfolgende Anlage benötigt. Der Druck muss

- am Produktionsfeld für die Gasaufbereitung und den Transport

- in der Übergabestation zwischen Ferngasgesellschaft und (kommunalem) Gasversorgungsunternehmen
- im Ortsnetz bei der Übergabe von Hochdruck- zu Mitteldruck- und von Mitteldruck- zu Niederdrucknetzen
- am Hausanschluss, meist in Verbindung mit der Gaszählung
- vor dem Eintritt in Gasverbrauchseinrichtungen zur Aufrechterhaltung der Verbrennungsgüte und Vermeidung von Überlastungen

heruntergeregelt werden.

Beim Betrieb einer Gasdruckregel- und Messanlage werden neben der Regelung und der Messung noch andere Aufgaben erfüllt:

- Filterung zur Reinigung von Staub und sonstigen Verunreinigungen
- Vorwärmung
- Schutz der nachgeschalteten Anlagenteile vor unzulässig hohem Druck, ggf. auch gegen Gasmangel
- Registrieren der wichtigsten Kenngrößen
- Odorierung des Gases durch Geruchsstoff

Gas-Speichersysteme

Gas-Speicherung ist hauptsächlich aus folgenden Gründen erforderlich:

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
- Ausgleich von Verbrauchsschwankungen
- Deckung des Spitzenbedarfs
- Sicherstellung der Gasversorgung im Falle von Betriebsstörungen

Im kommunalen Bereich kommen fast ausschließlich oberirdische Speicherbehälter zum Einsatz. Tiefspeicher, z.B. in Salz- und Felskavernen, in aufgelassenen Bergwerken oder Porenspeicher haben in der Regel viel größere Speichervolumina oder werden mit verflüssigtem Gas gefüllt, sind also bei kommunalen Unternehmen fast nicht einsetzbar.

Gängige Formen oberirdischer Gasspeicher sind:

➤ Niederdruck-Glockengasbehälter.

Sie bestehen aus einer ein- oder mehrteiligen Stahlglocke, den „Hubteilen“, die in ein rundes Wasserbecken aus Stahl oder Beton eintauchen und sich bei Füllung (steigender Gasdruck) nach oben und bei Leerung (fallender Gasdruck) nach unten bewegen. Das Wasserbecken verhindert durch Abdichten der Glockenteile einen Gasaustritt. Das Gewicht der Glockenteile bestimmt den Gasüberdruck. Behälter mit mehrteiliger Glocke nennt man Teleskopbehälter. Die Führung der Glockenteile ist entweder senkrecht mit einem Führungsgerüst und schraubenförmig („Spiralbehälter“), wobei in diesem Fall die Führung entfallen kann.

➤ Niederdruck-Scheibengasbehälter

In einem runden oder viereckigen senkrechten zylindrischen Behälter deckt eine Scheibenkonstruktion den Gasraum ab. Entlang einer Führungslamelle hebt und senkt sich die Scheibe nach dem Gasdruck. Der Gasraum ist vom Luftraum über der Scheibe durch einen Ölfilm entlang der Scheiben-Gleitschiene abgedichtet. Scheibengasbehälter erfordern weniger teure Fundamentierungen als Glockenbehälter, sind aber größer in den Abmessungen.

➤ Hochdruck-Gasbehälter

Sie sind als Kugeln oder zylindrische Röhren ausgeführt und reduzieren den Grundflächenbedarf gegenüber Niederdruckbehältern erheblich und können auch unterirdisch verlegt werden.

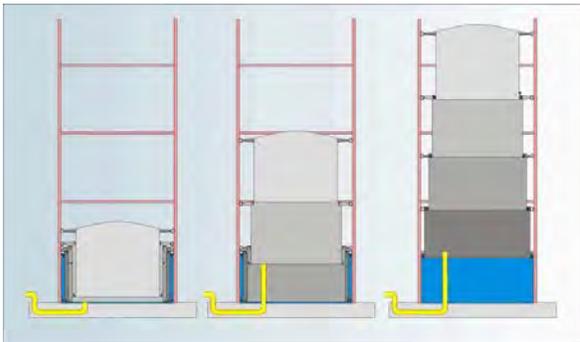


Abb. 17 Teleskopgasbehälter

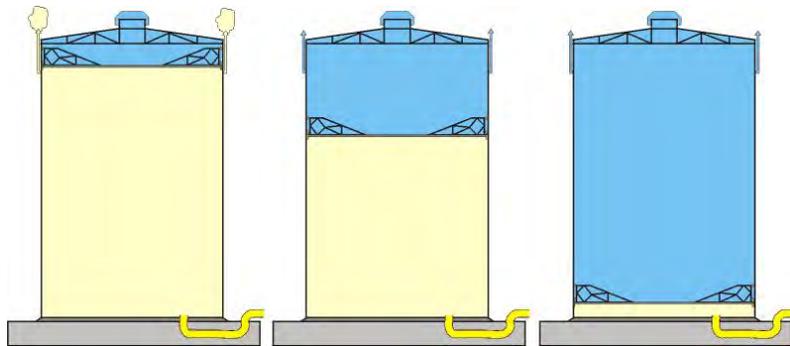


Abb. 18 Scheibengasbehälter



Abb. 19 Kugelgasbehälter

2.4 Gaswirtschaft

Grundlegend für die kommunale Versorgung ist die Beschaffung zu angemessenen Preisen (siehe Kap. 1). Zur Gewährleistung der Preiswürdigkeit sowohl auf der Beschaffungs- als auch auf der Lieferseite muss eine Reihe von Regeln und Berechnungen angewandt werden.

Grundlagen der Gaspreisbildung

Die Höhe der Gaspreise wird bestimmt durch

- die Preise der Konkurrenzenergeträger (> Kundenakzeptanz)
- der Anwendungsvorteile des Gases
- die Deckung der Ausgaben, die mit der Gasversorgung verbunden sind, unter Berücksichtigung einer angemessenen Verzinsung („Wirtschaftlichkeit“).

Das unterirdische Leitungsnetz der Gasversorgung mit seiner langen Nutzungsdauer erfordert Investitionen mit langer Kapitalbindung. Investitionsentscheidungen wie:

- Einführung neuer Betriebsmethoden,
- Anschluss neuer Kunden an das vorhandene Netz
- Erweiterung der Gasversorgung auf bisher nicht erschlossene Gebiete

basieren daher immer auf Planungsrechnungen.

Die Konsequenzen der Entscheidungen werden durch einen Soll-Ist-Vergleich ständig überprüft.

Vor der Absatzplanung (vor der Akquisition und dem Anschluss neuer Kunden) wird eine Marktforschung durchgeführt, die die Märkte der Kundengruppen

- Haushalte
- Handel und Gewerbe
- Industrie
- Öffentliche Einrichtungen
- Sonstige

abgrenzt, analysiert und beobachtet.

Die darauf folgende Absatzplanung bezieht weitere Einflussgrößen wie

- Beschaffungsverträge mit Vorlieferanten
- konjunkturelle Schwankungen
- strukturelle Veränderungen (z.B. kleinere Familien) und
- administrative Maßnahmen (z.B. Energieeinsparungsgesetze) mit ein.

Die Einsatzplanung untersucht alle Alternativen der Gasversorgung, damit die Ziele des Absatzplans erreicht werden können

Im Einzelnen werden

- der Gasbezug
- die Investitionen für Transportnetze und Verteilungsnetze
- der Betrieb und die Instandhaltung
- der Vertrieb und die Marketingaufwendungen
- die Konzessionsabgaben und
- die zu zahlenden Steuern kostenmäßig bewertet.

Dazu führt man eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durch, die, Regel mit dynamischen Methoden (Kapitalwert- oder Annuitätsmethode, werden zu einem späteren Zeitpunkt erläutert) die Erträge und Kosten quantifiziert.

2.5 Arbeitssicherheit, Gesetze und Verordnungen

In der Gasversorgung gibt es wegen der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Erdgases, die bei unsachgemäßem Umgang Erstickung, Vergiftung oder Explosionen zur Folge haben können, eine Reihe von Vorschriften für Errichtung und Betrieb von Gasanlagen.

Die wichtigsten sind:

- das DVGW-Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches
- das DIN-Normenwerk des Deutschen Instituts für Normung



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

4. Heizen und Kühlen

4.1 Thermodynamik des Heizens

4.2 Nah- und Fernwärmesysteme

4. Heizen und Kühlen

4.1 Thermodynamik des Heizens

Heizen und Kühlen sind Prozesse, bei denen einem System Energie als Wärme zugeführt oder entzogen wird, um seine Temperatur zu erhöhen, zu erniedrigen oder auf einem konstanten Wert zu halten. Es sind dies die Prozesse, welche der Heiztechnik, der Kältetechnik und der Klimatechnik zugrunde liegen. Zur Untersuchung dieser Prozesse wenden wir insbesondere den 2. Hauptsatz an, um die thermodynamischen Grundlagen der Heiz-, Klima- und Kältetechnik zu verstehen.

Wir beginnen damit, das Verhalten von Exergie und Anergie bei der Wärmeübertragung zu untersuchen. Wird zwischen zwei Systemen mit den Temperaturen T und T_u Energie als Wärme übertragen, so fließt mit dem Wärmestrom

$$\dot{Q} = \dot{E}_q + \dot{B}_q$$

ein Exergiestrom

$$\dot{E}_{q.} = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \dot{Q} = \eta_c \dot{Q}$$

und ein Anergiestrom

$$\dot{B}_q = \frac{T_u}{T} \dot{Q}$$

Diese Energieströme werden positiv gerechnet, wenn sie vom System A zum System B fließen. Hier sind nun zwei Fälle zu unterscheiden.

Bei Temperaturen T_A und T_B oberhalb der Umgebungstemperatur T_U fließen Exergie und Energie in gleicher Richtung, nämlich mit dem Wärmestrom Q in Richtung fallender Temperatur vom System A zum System B. Dabei verwandelt sich ein Teil des vom System A ausgehenden Exergiestroms in Anergie:

$$\dot{E}_v = T_u \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} \dot{Q}.$$

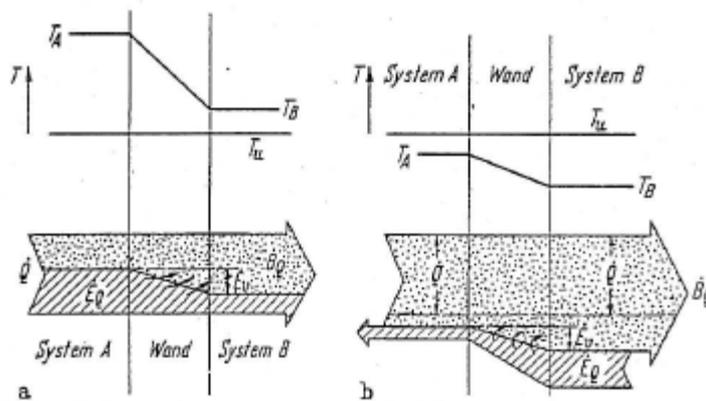


Abb. 61: Exergie- und Anergiefluss bei der Wärmeübertragung.
 b. Wärmeübertragung bei Temperaturen oberhalb der Umgebungstemperatur T_U ,
 c. Wärmeübertragung bei Temperaturen unterhalb T_U

Liegen die Temperaturen T_A und T_B unterhalb der Umgebungstemperatur, so wird der Carnot-Faktor θ_c negativ und damit auch E_Q . Das heißt aber, dass die Exergie in zum Wärmestrom entgegengesetzter Richtung vom kälteren zum wärmeren System fließt, wobei sie sich zum Teil in Anergie verwandelt. Der Anergiestrom, B_Q ist wegen $T < T_U$ größer als der Wärmestrom, er fließt aber in derselben Richtung wie dieser. Es gilt auch jetzt (ebenso wie bei Temperaturen oberhalb T_U) die Bilanz

$$\dot{Q} = \dot{E}_Q + \dot{B}_Q = \dot{B}_Q - |\dot{E}_Q|.$$

Dieses (bei Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur überraschende) Verhalten von Exergie und Anergie bei der Wärmeübertragung fassen wir in folgenden Sätzen zusammen:

Bei der Wärmeübertragung strömt die Anergie der Wärme stets in Richtung fallender Temperatur. Die Exergie der Wärme fließt stets in Richtung auf die Umgebungstemperatur und verwandelt sich dabei zum Teil in Anergie.

Um das Wesentliche zu zeigen, beschränken wir uns auf einen Sonderfall: Ein System soll auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, die sich von der Umgebungstemperatur T_u unterscheidet. Das betrachtete System, nämlich der geheizte oder gekühlte Raum, hat diatherme Wände, so dass Energie als Wärme zwischen dem System und der Umgebung "von selbst" übergeht. Durch das Heizen bzw. Kühlen sollen die Folgen dieses irreversiblen Wärmeübergangs für das System verhindert werden: seine Temperatur soll durch Wärmezufuhr (Heizen) und Wärmeentzug (Kühlen) konstant gehalten werden.

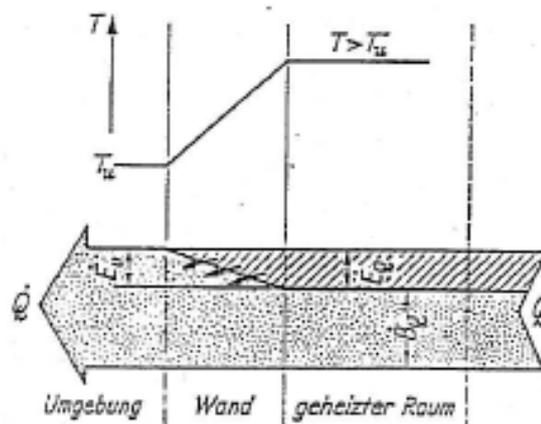


Abb. .62: Der Heizwärmestrom Q bestehend aus dem Exergiestrom E_Q und dem Anergiestrom B_Q , muss dem geheizten Raum zugeführt werden, um den Wärmeverlust an die Umgebung verbunden mit dem Exergieverluststrom E_V zu kompensieren.

Zur Heizung wird aber auch ein ganz bestimmter Anergiestrom verlangt. Diese Anergie ist für die Ausführungen von Heizprozessen genauso notwendig und bedeutungsvoll wie die zuzuführende Heizexergie. Auch beim Kühlen ist die Anergie

von entscheidender Bedeutung: ein durch die Temperatur des Kühlraums genau vorgeschriebener Energiestrom muss aus dem Kühlraum entfernt und an die Umgebung abgeführt werden. Hierzu werden Apparate und Maschinen benötigt.

Um das zum Heizen benötigte "Gemisch" aus Exergie und Anergie herzustellen, gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten:

Man kann den Heizwärmestrom durch Mischung der vorgeschriebenen Anteile reversibel herstellen, indem man zu der aus der Umgebung "kostenlos" zu entnehmenden Anergie die zugehörige Exergie als mechanische oder elektrische Energie hinzufügt. Die andere Möglichkeit besteht darin, von einem Energiestrom auszugehen, der mehr Exergie enthält als zur Heizung erforderlich ist; diese überschüssige Exergie wird durch einen irreversiblen Prozess in Anergie verwandelt, so dass die benötigte Heizenergie aus Exergie "hergestellt" wird.

Die zuerst genannte Möglichkeit der reversiblen Heizung lässt sich durch die Wärmepumpe verwirklichen, deren Konzept schon auf W. Thomson (Lord Kelvin) zurückgeht. In der reversibel arbeitenden Wärmepumpe durchläuft ein Medium einen "linksläufigen" Kreisprozess, dem eine Nutzleistung P_{rev} zugeführt wird. Die Wärmepumpe nimmt aus der Umgebung den Wärmestrom $(\dot{Q}_U)_{\text{rev}}$ auf und gibt an den beheizten Raum den Wärmestrom

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_U)_{\text{rev}} + P_{\text{rev}}$$

ab. Der Wärmestrom $(\dot{Q}_U)_{\text{rev}}$, der der Umgebung entnommen wird, besteht nur aus Anergie, so dass

$$(\dot{Q}_U)_{\text{rev}} = \dot{B}_Q = \frac{T_u}{T} \dot{Q}.$$

gilt.

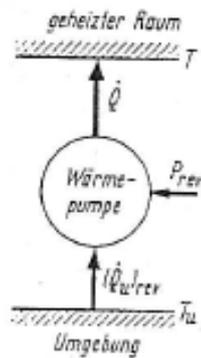


Abb. 63: Schema der reversibel arbeitenden Wärmepumpe

Beim Heizen ist die Systemtemperatur $T > T_u$. Ein Wärmestrom verlässt das System als "Wärmeverlust" durch die Wand und muss als Heizleistung Q kontinuierlich ersetzt werden.

Beim irreversiblen Wärmeübergang in der Wand verwandelt sich Exergie in Anergie. Der dabei auftretende Exergieverluststrom

$$\dot{E}_v = T_u \frac{T - T_u}{T \cdot T_u} \dot{Q} = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \dot{Q}$$

muss durch den mit der Heizleistung Q zuzuführenden Exergiestrom

$$\dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \dot{Q}$$

ersetzt werden. Beim Heizen wird also Exergie benötigt, weil sich als Folge des irreversiblen Wärmeübergangs Exergie in Anergie verwandelt. Da außerdem Anergie an die Umgebung abfließt, wird zur Heizung neben dem Exergiestrom auch der Anergiestrom

$$\dot{B}_Q = \frac{T_u}{T} \dot{Q}$$

verlangt. Die dem geheizten Raum zuzuführende Heizleistung Q muss sich also in bestimmter Weise aus Exergie und Anergie zusammensetzen. Dieses

“Mischungsverhältnis“ ist durch das Verhältnis von Umgebungstemperatur und Raumtemperatur eindeutig festgelegt.

Sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen wird also Exergie benötigt. Dieser Exergiebedarf hängt von der Temperatur des geheizten bzw. gekühlten Systems ab und ist umso größer, je mehr sich diese Temperatur von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Der zuzuführende Exergiestrom ist in Abb. 64 dargestellt. Der zum Heizen benötigte Exergiestrom E_Q ist stets kleiner als der Heizwärmestrom. Der Exergiebedarf der Kälteerzeugung wächst sehr rasch mit sinkender Temperatur t_0 des Kühlraumes; er wird bei tiefen Temperaturen größer als der Betrag der Kälteleistung Q_0 .

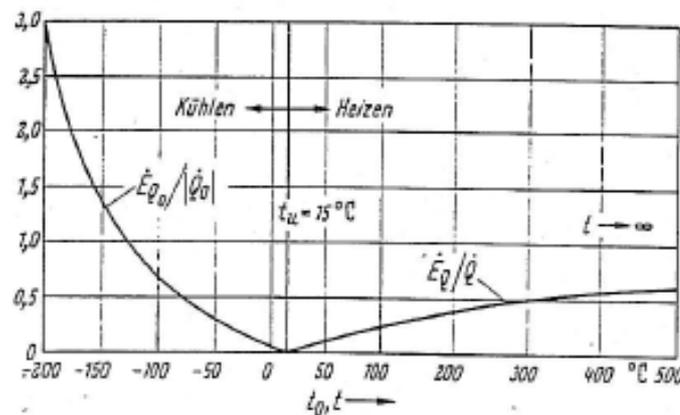


Abb. 64: Der beim Heizen und Kühlen zuzuführende Exergiestrom in Abhängigkeit von der Temperatur t des geheizten Raumes bzw. von der Temperatur t_0 , des Kühlraumes; gültig für $t_u = 15^\circ\text{C}$

Mit der zugeführten Antriebsleistung wird der zur Heizung erforderliche Exergiestrom aufgebracht:

$$P_{\text{rev}} = \dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \dot{Q}.$$

Der von der Wärmepumpe gelieferte Heizwärmestrom Q ist dann genau das vorgeschriebene Gemisch aus E_Q und B_Q .

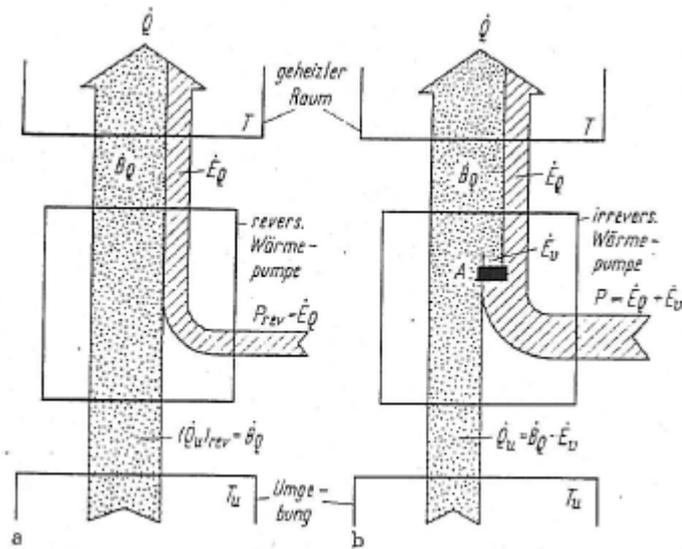


Abb. 65: Exergie-Anergie-Flussbilder für Wärmepumpen.

- a) reversibel,
- b) irreversibel arbeitende Wärmepumpe

Die Wärmepumpe kann als eine Umkehrung der Wärmekraftmaschine angesehen werden. Die Wärmekraftmaschine trennt die mit der zugeführten Wärme aufgenommene Exergie von der in der Wärme enthaltenen Anergie. Sie gibt die Exergie der Wärme als Nutzarbeit ab, die Anergie der Wärme wird als Abwärme an die Umgebung abgeführt. Die Wärmepumpe vereinigt die als Nutzarbeit zugeführte Exergie mit der aus der Umgebung als Wärme aufgenommenen Anergie zur Wärme, die bei $T > T_u$ dem beheizten Raum zugeführt wird. Auch in der Wärmepumpe durchläuft ein Arbeitsmedium einen Kreisprozess. Während dieser bei der Wärmekraftmaschine "rechtsläufig" ist, wird er bei der Wärmepumpe im entgegengesetzten Sinne durchlaufen. Auch in dieser Hinsicht kann man die Wärmepumpe als Umkehrung der Wärmekraftmaschine ansehen.

Die Heizung durch eine reversibel arbeitende Wärmepumpe ist die thermodynamisch günstigste Lösung des Problems, denn nur die Heizexergie muss als mechanische oder elektrische Energie zugeführt werden, während die besonders bei niedrigen Heiztemperaturen große Anergie "kostenlos" der Umgebung entnommen wird.

Wirklich ausgeführte Wärmepumpen arbeiten irreversibel, Abb. 58. Hier muss eine größere elektrische oder mechanische Antriebsleistung $P > E_Q$ zugeführt werden, um auch den Exergieverluststrom (Leistungsverlust) E_V der Wärmepumpe zu decken. Die zusätzlich benötigte Antriebsleistung

$$P - P_{\text{rev}} = P - \dot{E}_Q = \dot{E}_V$$

verwandelt sich in Anergie. Der aus der Umgebung als Wärme entnommene Energiestrom

$$\dot{Q}_u = (\dot{Q}_u)_{\text{rev}} - \dot{E}_V = \dot{E}_Q - \dot{E}_V$$

ist nun kleiner. Somit wird ein Teil der im geheizten Raum benötigten Anergie irreversibel aus Exergie erzeugt:

$$\dot{E}_Q = \dot{Q}_u + \dot{E}_V = \dot{Q}_u + P - P_{\text{rev}}$$

Der exergetische Wirkungsgrad der irreversiblen Wärmepumpe

$$\zeta = \frac{\dot{E}_Q}{P} = \frac{\dot{E}_Q}{P_{\text{rev}} + \dot{E}_V} = \frac{\dot{E}_Q}{\dot{E}_Q + \dot{E}_V}$$

ist kleiner als eins, wobei in praktisch ausgeführten Anlagen nur etwa $\zeta \approx 0,45$ erreicht wird. Da der Bau einer Wärmepumpe außerdem mit ziemlich hohen Anlagekosten verbunden ist, konnte sie sich zu Heizwecken aus wirtschaftlichen Gründen nur in bescheidenem Umfang durchsetzen.

Die elektrische Widerstandsheizung ist ein typisches Beispiel für die zweite Möglichkeit: die irreversible Heizung. Hier wird reine Exergie angeboten, aus der die ganze Heizenergie durch irreversible Prozesse erzeugt wird, Abb. 66. Dies ist die thermodynamisch ungünstigste Methode der Heizung. Ihr exergetischer Wirkungsgrad

$$\zeta = \frac{\dot{E}_Q}{P_{el}} = \frac{\dot{E}_Q}{\dot{Q}} = 1 - \frac{T_u}{T}$$

ist umso niedriger, je näher die Heiztemperatur T an der Umgebungstemperatur T_u liegt. Eine solche Heizung wäre thermodynamisch nur bei hohen Heiztemperaturen vertretbar. Die elektrische Widerstandsheizung hat jedoch praktische Vorteile: ihr Aufbau ist einfach, und die Anlagekosten sind viel niedriger als bei der Wärmepumpe.

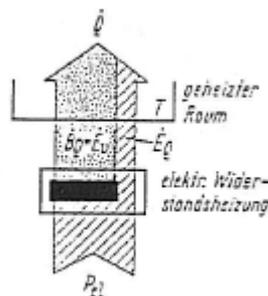


Abb. 66 Exergie-Anergie Plussbild für die elektrische Widerstandsheizung

Die Umwandlung von Exergie in Anergie durch irreversible Prozesse erfordert nämlich keinen besonderen technischen Aufwand, denn irreversible Prozesse laufen von selbst ab. Viel schwieriger ist es dagegen, mit der Exergie sparsam umzugehen.

Auch der exergetische Wirkungsgrad der direkten Feuerheizung (Ofen) ist nicht größer als der Wirkungsgrad der elektrischen Widerstandsheizung. Die chemische Energie, die durch den Verbrennungsprozess als Wärme frei gemacht wird, besteht nämlich fast ganz aus Exergie. Auch bei der Feuerheizung, einem stark irreversiblen Prozess, wird die ganze Heizenergie aus Exergie erzeugt. Z. Rant hat dies näher untersucht und die verschiedenen Methoden der Heizung hinsichtlich ihres Exergiebedarfs quantitativ miteinander verglichen. Die direkten Heizungen (elektrische Widerstandsheizung und Feuerheizung) sind thermodynamisch sehr unvorteilhaft; da sie jedoch einfach auszuführen sind, wurden sie von der komplizierten und damit teuren Wärmepumpe noch nicht verdrängt.

Beispiel

Eine Wärmepumpe dient zur Heizung eines Gebäudes. Zu ihrem Antrieb wird elektrische Energie benutzt, die in einem Wärmekraftwerk aus der chemischen Energie eines Brennstoffs gewonnen wird. Man berechne den exergetischen Wirkungsgrad ζ , den die Wärmepumpe mindestens haben muss, damit zu ihrem Betrieb nicht mehr Brennstoff (im Wärmekraftwerk) verbraucht wird als bei direkter Feuerheizung (Ofenheizung) mit dem gleichen Brennstoff.

Wir bezeichnen den Massenstrom des verbrauchten Brennstoffs mit \dot{m}_B und die bei seiner Verbrennung als Wärme frei werdende Energie, bezogen auf die Brennstoffmasse, als spez. Heizwert Δh des Brennstoffs. Bei der direkten Ofenheizung lässt sich nur ein Teil der Verbrennungswärme zur Heizung ausnutzen ('Schornsteinverlust'); es gilt daher für den Heizwärmestrom

$$\dot{Q} = \eta_F \dot{m}_B \Delta h$$

mit $0_F < 1$, dem Wirkungsgrad der Feuerung.

Bei der direkten Feuerheizung wird also der Brennstoffmassenstrom verbraucht.

$$(\dot{m}_B)_{FH} = \frac{\dot{Q}}{\eta_F \Delta h}$$

In einem Wärmekraftwerk lässt sich nur ein Teil der Verbrennungswärme in elektrische Energie umwandeln. Für die elektrische Leistung des Wärmekraftwerks gilt daher unter Berücksichtigung des Kraftwerkswirkungsgrades

$$P = \eta \dot{m}_B \Delta h$$

Um den Heizwärmestrom \dot{Q} bei der Heiztemperatur T zu liefern, braucht die Wärmepumpe die Antriebsleistung

$$P = \frac{\dot{E}_Q}{\zeta} = \frac{\dot{Q}}{\zeta} \left(1 - \frac{T_u}{T}\right)$$

Wird diese Antriebsleistung als elektrische Leistung vom Wärmekraftwerk geliefert, so gilt

$$\frac{\dot{Q}}{\zeta} \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) = \eta \dot{m}_B \Delta h$$

Zum Betrieb der Wärmepumpe wird also der Brennstoffmassenstrom

$$(\dot{m}_B)_{WP} = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \frac{\dot{Q}}{\zeta \eta \Delta h}$$

verbraucht.

Nun soll die Bedingung $(\dot{m}_B)_{WP} \leq (\dot{m}_B)_{FH}$ gelten, also

$$\left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \frac{\dot{Q}}{\zeta \eta \Delta h} \leq \frac{\dot{Q}}{\eta_F \Delta h}$$

sein. Daraus folgt für den exergetischen Wirkungsgrad der Wärmepumpe

$$\zeta \geq \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \frac{\eta_F}{\eta}$$

Diese Bedingung muss die Wärmepumpe erfüllen, soll sie allein hinsichtlich des Energieverbrauchs mit der direkten Heizung konkurrieren können. Diese Bedingung ist um so eher erfüllt, je weniger sich die Heiztemperatur von der Umgebungstemperatur unterscheidet, je größer der Kraftwerkswirkungsgrad η und je schlechter der Wirkungsgrad η_F der Feuerung ist.

Typische Werte der Wirkungsgrade sind $\eta = 0,35$ und $\eta_F = 0,75$. Nehmen wir ferner für die Raumheizung $t = 20^\circ\text{C}$ ($T = 293\text{K}$) und $t_u = -15^\circ\text{C}$ ($T_u = 258\text{K}$) an, so wird

$$\zeta \geq \left(1 - \frac{258}{293}\right) \frac{0,75}{0,35} = 0,26.$$

Dieser Grenzwert liegt relativ niedrig. Praktisch ausgeführte Wärmepumpen erreichen Wirkungsgrade $\zeta \approx 0,45$. Bei der direkten Heizung wird also fast die doppelte Brennstoffmenge verbraucht im Vergleich zu einer Wärmepumpenheizung. Trotzdem wird die Wärmepumpe nur bei besonders hohen Brennstoffpreisen der Feuerheizung wirtschaftlich überlegen sein, denn die Anlagekosten der Wärmepumpe sind wesentlich größer als die der einfachen Ofenheizung.

4.2 Nah- und Fernwärmesysteme

4.2.1 Grundlagen

Fernwärme ist eine Art der Energieversorgung, bei der an zentraler Stelle Wasser erwärmt wird (z. B. Heizwerk, Heizkraftwerk) und in Rohrleitungen den Verbrauchern zur Nutzung zugeführt wird. Die Fernwärmeversorgung in Deutschland begann Ende des 19. Jahrhunderts, insbesondere in großen Städten. 1993 waren etwa 8,5 % des Wohnungsbestandes in den alten Bundesländern und 25 % des Bestandes in den fünf neuen Ländern an Fernwärme angeschlossen. Der hohe Anschlussgrad in den fünf neuen Ländern beruht insbesondere auf der intensiven Nutzung von Braunkohle und dem örtlich gelenkten Ausbau der Fernwärme durch einen Anschluss- und Benutzungszwang.

Bei Fernwärmeanlagen unterscheidet man drei Systemvarianten:

- Heißwasserheizungen mit Temperaturen bis 120 °C,
- Heißwasserheizungen mit Temperaturen über 120 °C und
- Dampfheizungen.

Die Abgrenzung der Heizungen bis bzw. über 120 °C ist wegen der technischen Konsequenzen bei der Wärmeerzeugung und sicherheitstechnischen Ausstattungen der Hausanlagen notwendig.

Große Fernwärmesysteme werden in der Regel mit Temperaturen über 120 °C betrieben (max. Temperatur in der Regel 135 °C), während räumlich enger begrenzte Systeme (Nahwärmesysteme) in der Regel mit Temperaturen unterhalb 120 °C betrieben werden. Der Einsatz von Dampfheizungen ist wegen der hohen Energieverluste und der aufwendigen Technik zurückgegangen und wird nur noch in Einzelfällen angewendet.

Man unterscheidet weiterhin je nach der Anschlussart beim Verbraucher zwischen direkten und indirekten Systemen. Bei einem direkten System gelangt das Heizmedium unmittelbar in die Rohrnetze der Abnehmer, bei einem indirekten System werden Wärmetauscher (Hausübergabestationen) zwischengeschaltet.

Fernwärmesysteme werden heute in der Regel als Zweileitungssysteme (Vorlauf und Rücklauf) gebaut. Die Bereitstellung von Brauchwarmwasser erfolgt beim Kunden durch einen separaten Wärmetauscher. In den alten Bundesländern findet man zum Teil noch Dreileiter-Systeme, die aus zwei Vorläufen (Heizungsvorlauf und Warmwasservorlauf) und einem Rücklauf bestehen.

Die wesentlichen Systemkomponenten einer Fernwärmeversorgung sind:

1. Erzeugung,
2. Verteilung,
3. Hausübergabestationen.

4.2.2 Fernwärmeerzeugung

Die notwendige Wärme zur Fernwärmeerzeugung kann entweder über Heizkesselanlagen oder Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Als Wärmeerzeuger für das Heizwasser werden bei kleinen Anlagen gewöhnlich direkt beheizte Kessel verwendet. Das Heizwasser wird den angeschlossenen Verbrauchern direkt zugeleitet. Bei größeren Anlagen kommen Stahlkessel der verschiedensten Art zur Verwendung:

- Flammrohr-Rauchrohrkessel, Automatische Großkessel u. a.

Am meisten verwendet werden Dreizugkessel. Die Aufteilung der Gesamtleistung erfolgt auf zwei oder drei Einheiten. Auf diese Weise können Kessel bis zu 10 MW gebaut werden. Brennstoff ist je nach öffentlichen Verhältnissen Kohle, Koks, Öl oder Gas bzw. biogene Kraftstoffe wie Holz oder Biogas.

Die häufigste Wärmequelle für Fernwärmesysteme sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. In Frage kommen dabei große Anlagen in Wärmekraftwerken mit Gegendruckkondensations-turbinen (s. Kapitel 3.5) als auch kleinere Blockheizkraftwerke (BHKW). BHKW's werden meist in dezentralen Nahwärmesystemen eingesetzt und können Leistungsbereiche von 5 KW bis 20 MW abdecken. Als Erzeugungsanlagen kommen dabei sowohl Motoren (Öl, Gas) Gasturbinen, als auch Brennstoffzellen, Stirlingmotoren und Mikroturbinen in Betracht.

Exkurs Brennstoffzelle

Die Umwandlung fossiler Brennstoffe in Strom und Wärme erfolgte in der Vergangenheit nahezu ausschließlich indirekt in Wärmekraftmaschinen (Motoren, Turbinen oder Kondensationskraftwerken). Brennstoffzellen wandeln – im Gegensatz zu den herkömmlichen Technologien – die im Brenngas gespeicherte chemische Energie direkt in Strom und Wärme um. Die Reaktion und damit der Wirkungsgrad ist damit nicht vom Carnot-Faktor abhängig.

Im Vergleich zu konventionellen KWK-Anlagen mit Gasmotoren oder Gasturbinen haben Brennstoffzellenanlagen im Wesentlichen folgende Vorteile:

- Deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade.
- Praktisch vernachlässigbare Emissionen.
- Gutes Teillastverhalten.
- Sehr niedrige Geräuschemissionen.

Die Brennstoffzelle ist quasi die Umkehrung der Wasserelektrolyse. Die Hauptbestandteile einer einzelnen Brennstoffzelle sind der Elektrolyt, der den Ionentransport übernimmt, sowie die beiden Elektroden Anode und Kathode (s. Bild).

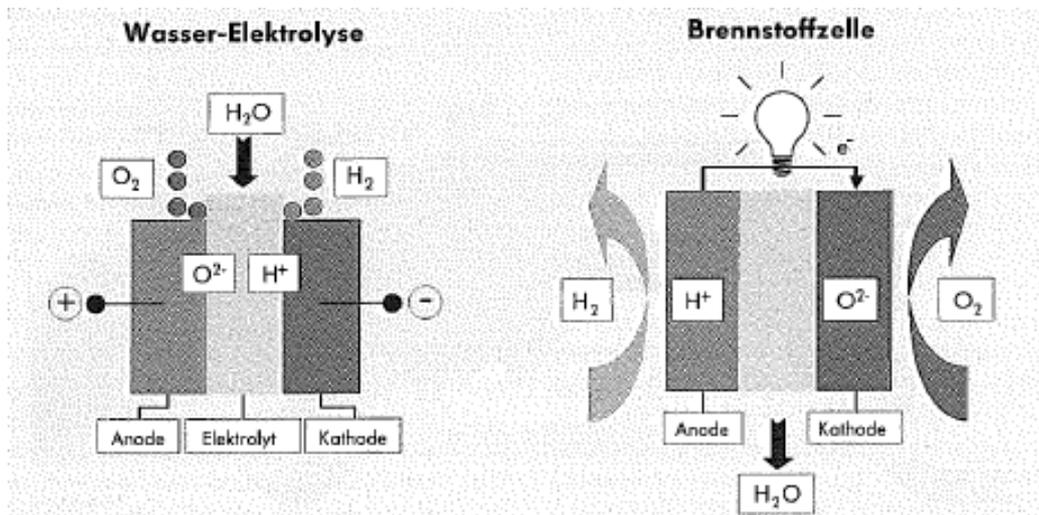


Abb. 67: Funktionsprinzipien von Wasser-Elektrolyse und Brennstoffzelle

Der Elektrolyt muss gasdicht ausgeführt sein, um den direkten Kontakt von Sauerstoff und Wasserstoff zu vermeiden. Die Elektroden müssen eine hohe Porosität aufweisen, damit eine große Oberfläche für die elektrochemischen Umsetzungen zur Verfügung steht. An der Anode erfolgt die Oxidation des zugeführten Wasserstoffs zu Wasserstoffionen, die freigesetzten Elektronen werden mit Hilfe eines externen Leiterkreises zur Kathode geleitet, wo der Sauerstoff zu Sauerstoffionen reduziert wird. Damit der Stromkreis geschlossen ist, müssen entweder Wasserstoffionen von der Anode zur Kathode oder umgekehrt Sauerstoffionen von der Kathode zu der Anode wandern. Die Art der wandernden Ionen ist vom Elektrolyten abhängig, der damit auch bestimmt, ob das Reaktionsprodukt Wasser an der Anode oder an der Kathodenseite entsteht. Die Wahl des Elektrolyten ist darüber hinaus für die Betriebstemperatur entscheidend.

Grundsätzlich benötigen Brennstoffzellen Wasserstoff als Elektronenlieferant, durch einen vorgeschalteten Reformierprozess kann jedoch Erdgas relativ einfach in

Wasserstoff und CO₂ umgewandelt werden, so dass Brennstoffzellen auch in einem Erdgasnetz betrieben werden können. Aufgrund der höheren Temperaturen, die sich beim Brennstoffzellenprozesse realisieren lassen, weisen Brennstoffzellen-BHKW's gegenüber Gasturbinen und Gasmotoren eine erheblich höhere Stromkennzahl aus.

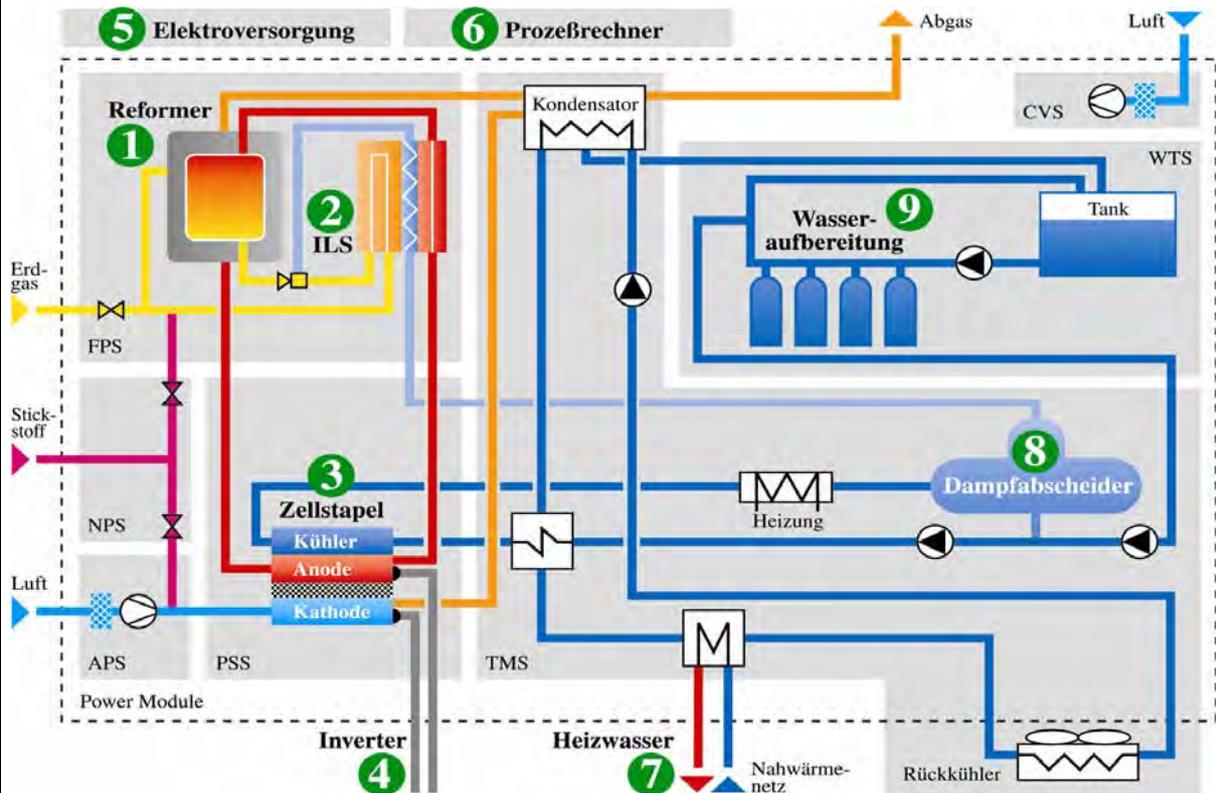


Abb. 68: Prinzip einer KWK-Brennstoffzelle

In der Brennstoffzellentechnik werden im Wesentlichen fünf verschiedene Typen unterschieden.

AFC, Alkalische Brennstoffzelle (alkaline fuel cell)

Die Alkalische Brennstoffzelle benötigt hochreinen Sauerstoff und hochreinen Wasserstoff als Reaktionspartner. Als Elektrolyt wird Kalilauge verwendet, in der die OH-Ionen von der Kathode zur Anode wandern. Die AFC zählt mit einer Arbeitstemperatur von max. 80 °C zu den Niedertemperaturbrennstoffzellen, ihre Anwendung beschränkt sich allerdings einige Nischenbereiche, insbesondere in der Raumfahrt.

PEMFC, Polymer-Membran Brennstoffzelle, (polymer electrolyte membran fuel cell bzw. proton-exchange membran fuel cell)

Die PEMFC wird anodenseitig mit Wasserstoff und kathodenseitig mit Luftsauerstoff betrieben. Aufgrund der geringen CO-Akzeptanz der Zelle sind die Anforderungen an die Brennstoffaufbereitung relativ hoch. Die Verwendung von reformiertem Erdgas ist durch eine zusätzliche Gasfeinreinigung möglich. Die Arbeitstemperatur der PEMFC von 70 – 90 °C erlaubt die Auskopplung von Nutzwärme und damit den Einsatz als BHKW zur dezentralen Energieversorgung. Ebenso können PEMFC-Zellen im Fahrzeugbereich eingesetzt werden. Zurzeit werden auch Technologien auf PEMFC-Basis für Haus-BHKW's entwickelt.

PAFC, phosphorsäure Brennstoffzelle (phosphoric acid fuel cell)

Die PAFC ist die Brennstoffzellentechnik, deren Kommerzialisierung mit Abstand am weitesten fortgeschritten ist. Mit einer Arbeitstemperatur zwischen 170 °C und 200 °C ist diese Anlage für den Einsatz als BHKW in der dezentralen Energieversorgung geeignet. Neben Erdgas können auch Wasserstoff und Sondergase für den Anlagenbetrieb eingesetzt werden. Das Elektrolyt besteht aus flüssiger Phosphorsäure, die in eine Matrix gebunden ist. Ein 200 kW-BHKW auf der Basis der PAFC

der Firma Onsi wurde 1997 von den Stadtwerken Saarbrücken im Wohngebiet Nachtweide installiert und hat zwischenzeitlich ca. 50.000 Betriebsstunden erreicht.



Abb. 69: PAFC-Brennstoffzelle 200 kW_{el}, Saarbrücken Nachtweide

MCFC, Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle (molten carbonate fuel cell)

Die hohe Arbeitstemperatur der MCFC von 650 °C erlaubt zusätzlich zur Wärmeversorgung eine Auskopplung von Prozessdampf. Dieser kann eine nachgeschaltete Dampfturbine antreiben, um den elektrischen Wirkungsgrad zu erhöhen. Hohe Arbeitstemperaturen stellen jedoch besondere Anforderungen an die Werkstoffwahl. Der Elektrolyt der MCFC besteht aus einer Mischung von Kaliumcarbonat und Lithiumcarbonat und ist in eine Matrix eingebunden. Der Schmelzpunkt des Karbonatgemischs liegt bei ca. 480 °C, so dass bei einer Betriebstemperatur von 650 °C die Salzschnmelze eine gute elektrolytische Leitfähigkeit aufweist.

SOFC, Festoxidkeramische Brennstoffzelle (solid-oxid fuel cell)

Die Festoxidkeramische Brennstoffzelle wird aufgrund ihrer Arbeitstemperatur von 900 ° bis 1.000 °C den Hochtemperaturbrennstoffzellen zugeordnet. Ebenso wie bei der MCFC kann auch bei der SOFC Prozesswärme ausgekoppelt werden. Der Elektrolyt der SOFC besteht aus einer Zirkondioxid-Keramik. Die Dotierung mit Hydriumoxid ermöglicht eine gute Leitfähigkeit für Sauerstoffionen bei Temperaturen oberhalb 800 °C. Bei diesen Temperaturen kann der Reformierprozess, d. h. die Umwandlung von Erdgas in Wasserstoff in die Zelle integriert werden.

Exkurs Stirling-Motor

Der Stirling-Motor wurde 1816 von dem schottischen Geistlichen Norbert Stirling erfunden. Dieser hatte erkannt, dass eine periodische Änderung der Gastemperatur erreicht werden kann, indem man das Gas mit Hilfe eines Verdrängerkolbens zwischen einem Raum mit konstant hoher Temperatur und einem Raum mit konstant niedriger Temperatur hin und her bewegt. Um hierbei möglichst wenig Wärme zu verlieren, wurde zwischen den beiden Räumen ein Regenerator eingeführt, an der das heiße Gas beim Durchströmen Wärme abgibt, bevor es in den gekühlten Raum eintritt. Beim Zurückströmen des Gases vom kalten Raum in den heißen Raum kann die im Regenerator gespeicherte Wärme dann wieder aufgenommen werden. Kombiniert man nun den Verdrängerkolben mit einem Arbeitskolben, so erhält man einen Stirling-Motor.

Das Prinzip des Stirling-Motors ist anhand der Abb. 70 und des PV-Diagramms (Abb. 71) erklärt. Wichtig zum Verständnis ist, dass der Verdrängerkolben keine Arbeit leistet, sondern lediglich das Arbeitsmedium vom kalten zum warmen Bereich des Kolbens bzw. umgekehrt schiebt.

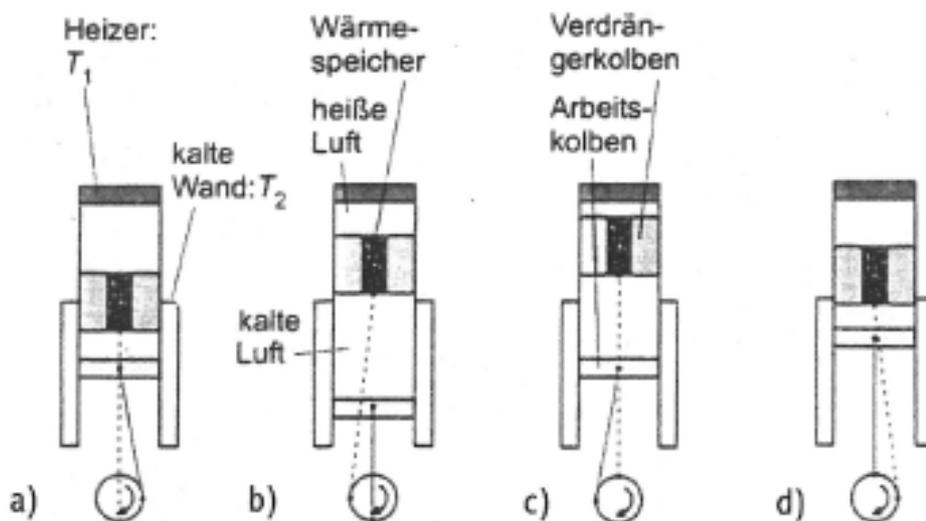


Abb.70: Kolbenstellung bei a) isothermer Expansion, b) isochorer Abkühlung,

c) isothermer Kompression, d) isochorer Erwärmung des Arbeitsgases

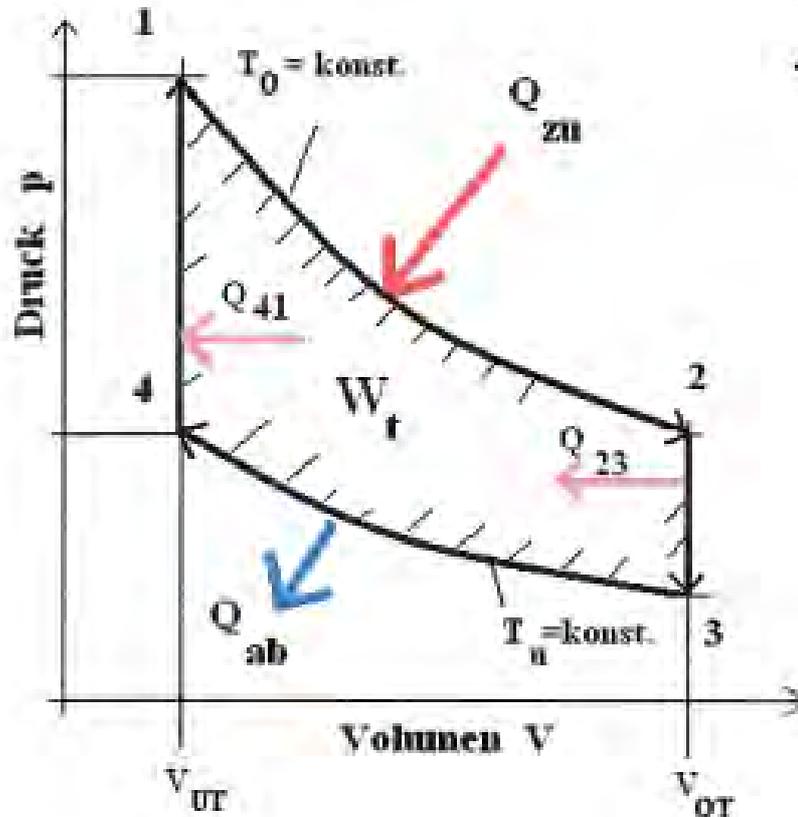


Abb. 71: p-V-Diagramm des Stirling-Motors

1. isotherme Expansion v a (1-2):

Unter Zuführung der Wärmemenge Q_{zu} expandiert das Gas isotherm vom Volumen V_1 nach V_2 . Der Druck im Zylinder fällt ab. Da sich bei isothermen Zustandsänderungen die innere Energie U des Systems nicht ändert ($dU = 0$), folgt aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik $dW = -dQ$, d.h. die zugeführte Wärme wird restlos in mechanische Arbeit umwandelt.

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dW = -n R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{12}$$

2. Isochore Abkühlung b (2-3):

Der Arbeits-Kolben befindet sich am unteren Umkehrpunkt ($V = V_2 = V_3$). Nun wird der Verdränger nach oben bewegt, und das warme Gas strömt durch den "kalten" Regenerator in den unteren gekühlten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur T_1 auf die Temperatur T_2 abgekühlt und verringert seine innere Energie um $\delta U_{23} = C_V \cdot (T_2 - T_1)$. Da bei isochoren Zustandsänderungen keine mechanische Arbeit verrichtet wird ($W_{23} = 0$), folgt aus dem 1. Hauptsatz, dass die Wärme $Q_{23} = \delta U_{23} < 0$ an den Regenerator abgegeben wird, diesen erwärmt und dort später wieder zur isochoren Erwärmung des Gases zur Verfügung steht. (Ohne Regenerator würde Q_{23} sozusagen an das Kühlwasser "verschwendet" werden!)

3. Isotherme Kompression c (3-4):

Durch das Schwungrad wird der Arbeits-Kolben zum oberen Umkehrpunkt zurück bewegt. Dabei wird das Gas im "kalten" Zylinderteil bei der Temperatur T_2 vom Volumen V_3 nach V_4 komprimiert. Dabei steigt der Gasdruck. Die vom Schwungrad verrichtete mechanische Arbeit

$$W_{34} = \int_{V_3=V_2}^{V_4=V_1} dW = n R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{34}$$

wird bei diesem Vorgang als Wärme Q_{ab} an den Kühler abgegeben.

4. Isochore Erwärmung d (4-1):

Der Arbeits-Kolben befindet sich am oberen Umkehrpunkt ($V = V_4 = V_1$). Nun wird der Verdränger nach unten bewegt, und das kalte Gas strömt durch den "warmen" Regenerator in den oberen beheizten Bereich des Zylinders. Dabei wird es (vom Regenerator) von der Temperatur T_2 auf die Temperatur T_1 erwärmt und erhöht seine innere Energie um $\delta U_{41} = C_V \cdot (T_1 - T_2)$. Die dazu benötigte Wärme $Q_{41} = \delta U_{41} = -Q_{23}$ wird vom Regenerator entnommen, wobei sich dieser wieder abkühlt. (Ohne Regenerator müsste Q_{41} zusätzlich von der Heizung zur Verfügung gestellt werden!)

Am Ende ist folgende Nettoarbeit verrichtet worden:

$$W = W_{12} + W_{34} = -n R (T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} = - \int p dV$$

Grafisch entspricht diese Arbeit der Fläche, die von den beiden Isochoren und Isothermen in Abb. 68 eingeschlossen wird.

Fernwärmenetze

Heisswasser-Fernwärmenetze werden heute in aller Regel als 2-Leitersystem (Vor- und Rücklauf) gebaut. Um auf den langen Transportwegen Wärmeverluste zu vermeiden, müssen die Rohre gut isoliert sein, man verwendet dazu heute meist s. g. Kunststoffmantelverbundrohre (KMR).



Abb. 72: Kunststoffmantelverbundrohre (KMR)

Das Mediumrohr besteht aus Stahl, die Wärmedämmung aus hartem Polyuretanschaum und das Mantelrohr aus Polyethylen. Das Mediumrohr ist meist für Betriebsdrücke von 16 bar – 25 bar ausgelegt. Die obere Temperaturgrenze für den Betrieb solcher Rohre liegt bei etwa 140 °C.

Die Wärmedämmung aus Polyuretanschaum hat zusätzlich die Aufgabe, zwischen Mediumrohr, Wärmedämmung und Mantelrohr einen kraftschlüssigen Verbund herzustellen und das Gewicht des befüllten Mediumrohrs zu tragen.

Das Mantelrohr schützt die Wärmedämmung vor äußeren Einflüssen. Der kraftschlüssige Verbund hat die Aufgabe, die durch die Erwärmung der Rohrleitung auftretenden Kräfte aufzunehmen und das Erdreich abzuleiten. Die Rohre werden in Dimensionen zwischen DN 20 und DN 1200 gebaut.

Da bei dem Betrieb von Fernwärmenetzen erhebliche Wassermengen mit Temperaturen über 100 ° C bewegt werden sind dazu speziell gebaute Pumpen notwendig. Der Betriebsdruck von Fernwärmeleitungen hängt von der Topografie des Fernwärmegebietes ab. In Saarbrücken werden 2 Netze betrieben, 1 Talnetz mit 3 – 6 bar und ein Bergenetz mit max. 16 bar.

Hausübergabestationen

Bei der Übergabe der Fernwärme an den Verbraucher unterscheidet man direkte und indirekte Systeme. Beim direkten System wird das warme Wasser aus der Fernwärmeleitung in den Sekundärkreislauf des Hauses eingespeist, bei indirekten Lösungen, die heute überwiegend angewendet werden, erfolgt der Wärmeübergang in einen Wärmetauscher. Die notwendigen Systeme (Wärmetauscher, Temperaturregler, Wärmezähler) werden heute meist in kleinen Übergabestationen (Kompaktstationen) installiert.

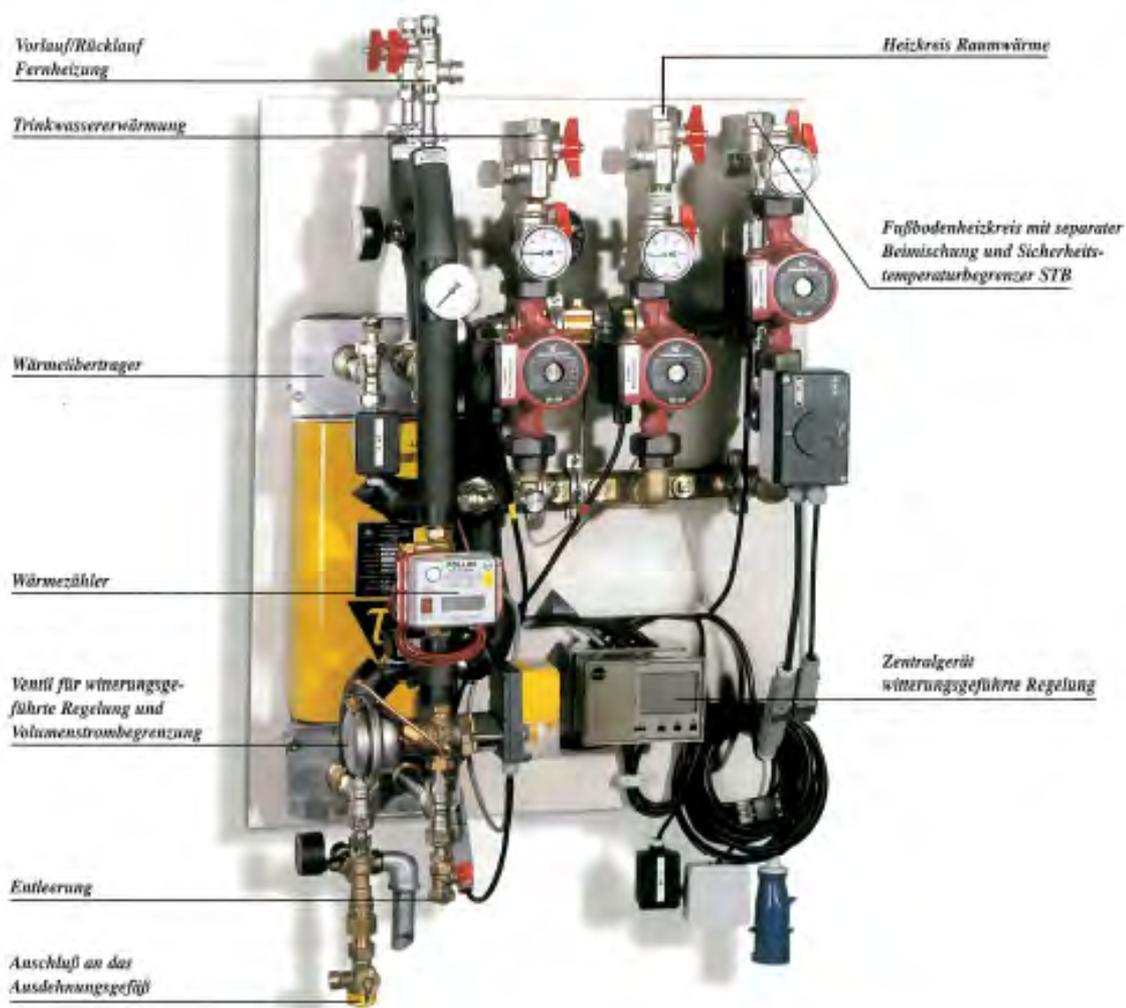
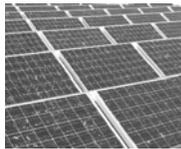


Abb. 73: Kompaktstation



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

3.3 Gasturbinen-Kraftwerke

3.4 Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke

3.5 Kraft-Wärme-Kopplung

3.3 Gasturbinen-Kraftwerke

Gasturbinenanlagen werden, wie Verbrennungsmotoren, den Verbrennungskraftanlagen zugeordnet. Der Brennstoff wird "normal", das heißt irreversibel verbrannt, und man wandelt die thermische Energie des Verbrennungsgases in Nutzarbeit um. Dies ist nur bei einer Expansion des Verbrennungsgases auf einen niedrigeren Druck möglich. Somit muss der Brennstoff unter höherem Druck verbrannt werden. Die Gasturbinenanlage enthält daher einen Verdichter, der die Luft auf den hohen Druck in der Brennkammer verdichtet.

In Gasturbinenanlagen wird also die Wärmeenergie über einen heißen Gasstrom direkt in die Turbine eingeführt, die dadurch angetrieben wird. Ein Zwischenkreislauf zur Wärmeübertragung wie z.B. der Dampfkreislauf entfällt. Der Brennstoff (üblicherweise Erdgas) wird in über eine Verdichterdüse in die Brennkammer eingeführt und dort gezündet, und das heiße Abgas kühlt sich bei der Durchströmung der Gasturbine ab. Der Kreislauf des Wärmeübertragungsmediums ist ein offenes System.

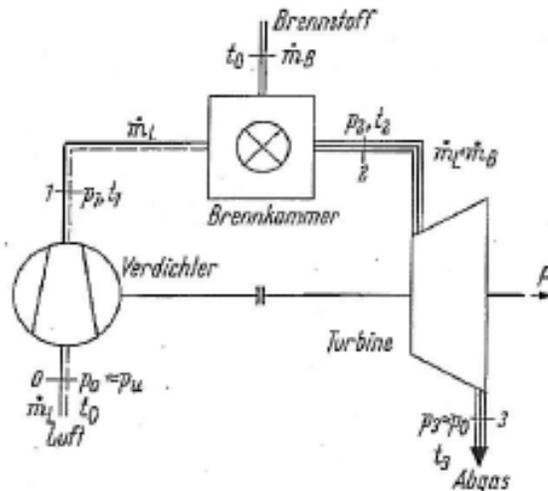


Abb. 45: Schaltplan einer offenen Gasturbinenanlage

Der Prozesswirkungsgrad und die Nutzleistung der offenen Gasturbinenanlage hängen vom Druckverhältnis und sehr stark von der Eintrittstemperatur der Verbrennungsgase in die Turbine sowie von den Umgebungsbedingungen ab.

Im Prinzip steigt der Wirkungsgrad und damit die erzielte Turbinenleistung mit dem Verhältnis von Verdichterdruck zum Umgebungsdruck p/p_0 , sowie mit dem Verhältnis von Abgastemperatur (=Turbineneintrittstemperatur) zur Temperatur der angesaugten Luft T_2/T_0 .

Ein erheblicher Teil der Turbinenarbeit muss allerdings zum Antrieb des Verdichters aufgewendet werden (Bild 45). Die Nutzleistung ist daher nur ein Teil der insgesamt installierten Turbinen- und Verdichterleistung. Wie Bild 46 zeigt, wächst der Wirkungsgrad η also zunächst mit steigendem Druckverhältnis, erreicht ein Maximum und sinkt wieder ab.

Die Nutzarbeit (und damit die Nutzleistung) einer Gasturbine ist abhängig vom Luftverhältnis λ (zur Erinnerung: $\lambda = 1$: stöchiometrische Verbrennung ohne Luftüberschuss). Das Luftverhältnis ist wiederum abhängig vom Druckverhältnis (Je höher der Verdichterdruck, desto mehr Luft wird eingeblasen). Auch für die Nutzleistung gibt es ein bestimmtes Druckverhältnis, bei dem die spezifische Nutzleistung ein Maximum annehmen kann. Dieses Druckverhältnis, bei dem die maximale spezifische Nutzleistung auftritt (Kurve a im Diagramm Bild 46), ist aber erheblich kleiner als das Druckverhältnis, bei dem der Wirkungsgrad η seinen Maximalwert erreicht.

Bei der Auslegung einer Gasturbinenanlage muss man einen Kompromiss eingehen: man wählt entweder das (kleinere) optimale Druckverhältnis für die größte Nutzarbeit oder einen etwas höheren Wert, um noch eine merkliche Wirkungsgradsteigerung zu erzielen.

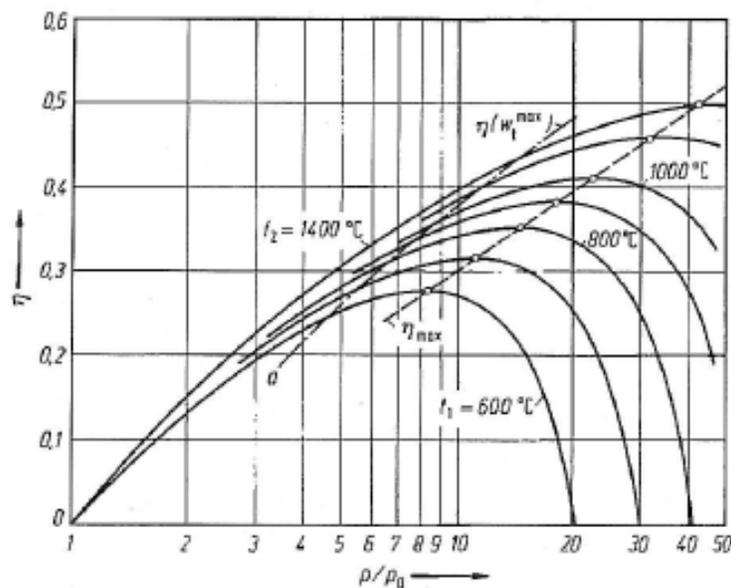


Abb. 46: Wirkungsgrad η der einfachen Gasturbinenanlage (Luftprozess) als Funktion des Druckverhältnisses p/p_0 und der Turbineneintrittstemperatur t_2 für t_0 (Ansaugtemperatur) = 15 °C. Kurve a: Wirkungsgrad bei maximaler Nutzarbeit

Hohe Wirkungsgrade lassen sich in allen Fällen nur bei hohen Gastemperaturen t_2 , am Turbineneintritt erreichen. Es ist daher stets Ziel der Gasturbinenentwicklung, die höchste Prozesstemperatur zu steigern. Dies geschah zunächst durch die Verwendung von möglichst warmfesten Materialien und später durch Schaufelkühlung, die eine merkliche Erhöhung von $t_2 = 800$ °C auf fast 1.100 °C gestattete.

Kreisdiagramm und Exergieverluste des Gasturbinenprozesses:

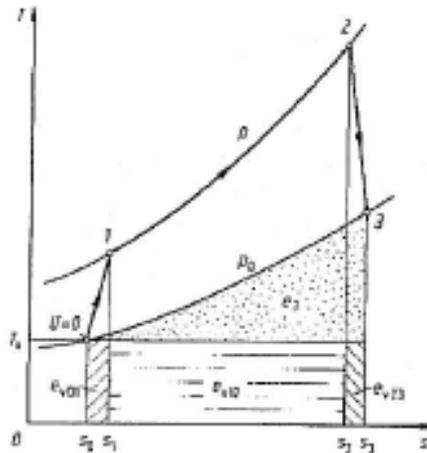


Abb. 47: Exergieverluste der einfachen Gasturbinenanlage im T-s-Diagramm

Die mit dem Zustand 0 angesaugte Verbrennungsluft wird im Verdichter auf den Zustand 1 gebracht. Nach der isobaren (konstanter Druck p) Wärmezufuhr 1-2 in der Brennkammer erfolgt die Entspannung 2-3 in der Turbine unter Abgabe der Nutzleistung. Die isobare (konstanter Druck p_0) Wärmeabgabe 3-0 entspricht der Abwärme, die durch die Turbinenabgase ausgetragen wird.

Spezifische Exergieverluste treten

- im (adiabaten) Verdichter:

$$e_{v01} = T_u(s_1 - s_0)$$

- in der (adiabaten) Brennkammer:

$$e_{v12} = e_B - (e_2 - e_1) = (h_2 - h_1) \left(\frac{e_B}{H_u} - 1 \right) + T_u(s_2 - s_1)$$

e_B : spezifische Exergie des Brennstoffs (der Teil der chemischen Energie, dessen Umwandlung in Nutzenergie nach dem 2. Hauptsatz möglich ist)

h : spezifische Enthalpie (Zustandsgröße des Gases, das dessen spezifische innere Energie u und die spezifische Strömungsenergie pv beinhaltet: $h = u + pv$), etwa die "thermodynamisch wirksame Energie"

H_U : unterer Heizwert

und

- in der (adiabaten) Turbine:

$$e_{v,23} = T_u(s_3 - s_2)$$

auf.

Infolge der guten strömungstechnischen Gestaltung von Verdichter und Turbine (hohe Werte von η_{VV} und η_{VT} !) bleiben die Exergieverluste dieser Maschinen relativ klein gegenüber dem Exergieverlust $e_{v,12}$ bei der Verbrennung, siehe Bild 47.

Neben den eben genannten Exergieverlusten muss aber auch die Exergie e_3 des Turbinenabgases als verloren gelten. Das aus der Turbine abströmende Gas hat eine noch hohe Temperatur T_3 und damit die hohe spezifische Energie

$$e_3 = h_3 - h_u - T_u(s_3 - s_u)$$

die nicht zur Gewinnung von Nutzarbeit herangezogen wird, siehe Bild 47. Man sollte aber versuchen, die Abgasenergie zu nutzen. Sie kann zur Gewinnung von Heizwärme oder Prozesswärme bei der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung dienen. Eine sehr vorteilhafte Nutzung des Gasturbinenabgases ist in den kombinierten Gas- und Dampf-Wärme- und Dampfkraftwerken möglich, wo das Abgas als Wärmequelle des nachgeschalteten Dampfkraftprozesses dient.

Ausführungen von Gasturbinenanlagen

Die bisher beschriebene einfache Gasturbinenanlage, die sich in ihrer modernen Form durch eine kompakte Bauweise mit geringen Anlagekosten, durch hohe Turbineneintrittstemperaturen und ein relativ großes Druckverhältnis auszeichnet, hat sich auf dem Markt für Leistungen zwischen 5 und mittlerweile über 150 MW elektrischer Nutzleistung durchgesetzt.

Gasturbinenkraftwerke sind heutzutage hoch standardisiert und sogar als komplette Stromerzeugungseinheiten im Werk vorgefertigt werden. Standardisierte Aufstellungsarten sind:

- die Freiluftaufstellung (Bild 48). Sie ist die einfachste und kostengünstigste Aufstellungsart einer Gasturbinenanlage, wird jedoch meist nur für Gasturbinen kleiner und mittlerer Leistungsgröße gewählt. Besonders in Ländern mit trockenem Klima wird diese Aufstellung bevorzugt, ferner bei der Errichtung in meist un bebauten Gebieten mit niedrigen Schallemissionsauflagen. Turbogruppen und Nebenanlagen werden mit einer Schutzhaube aus Stahlblech verkleidet, die den Schallschutzanforderungen entsprechend isoliert und ausgekleidet und staub- und regendicht ausgeführt ist. Den Anforderungen im kommunalen Bereich und unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen wird die Freiluftaufstellung in der Regel nicht gerecht.

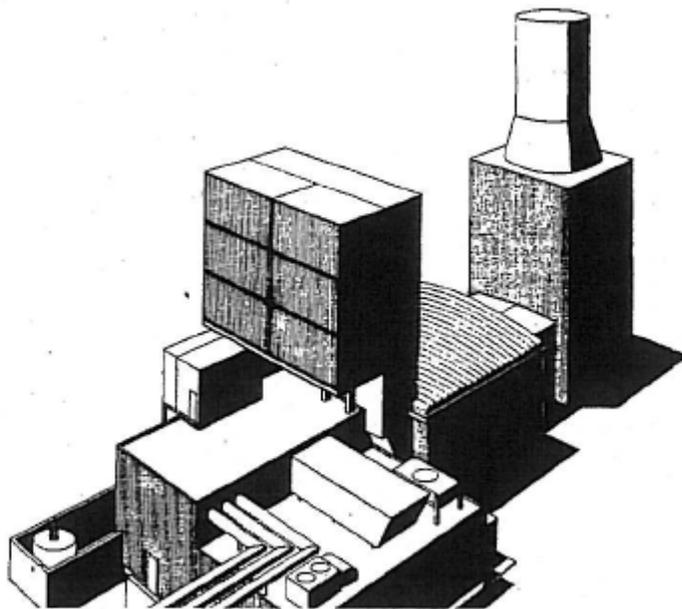


Abb. 48: Kompaktanordnung einer Gasturbinenanlage in Freiluftaufstellung

- die konventionelle Bauweise. Diese Installationsart verwendet Komponenten aus dem Dampfkraftwerksbau wie z.B. eine gemauerte Maschinenhalle und spezielle Räumlichkeiten für die Hilfseinrichtungen. Sie wird dort angewendet, wo hohe Schallschutzanforderungen gestellt werden, wo die klimatischen Verhältnisse eine dauerhafte Bauausführung erfordern und wo sich das Bauwerk architektonisch in die Umgebung eingliedern soll. Im kommunalen Bereich (in Saarbrücken: die Gasturbinenanlage im Südraum in der Nähe der Firma ZF) wird daher bevorzugt die konventionelle Bauweise zum Einsatz kommen.
- die Leichtbauweise. Rationalisierungsmaßnahmen führen zur Standardisierung sämtlicher Komponenten, und so hat man ganze Kraftwerke mit Maschinenhäusern zu vorgefertigten Serienprodukten entwickelt. Das Maschinenhaus ist eine Stahlbaukonstruktion, nur noch die Fundamente werden mit Stahlbeton ausgeführt. Mit dieser Konstruktion ist die Bauphase des Gasturbinenkraftwerks schon nach wenigen Monaten abgeschlossen.

Im kommunalen Bereich wird man die Leichtbauweise eher selten wählen, da sie für ähnliche Infrastrukturen konzipiert ist wie die Freiluftaufstellung.

Einsatzbereiche von Gasturbinenkraftwerken

Gegenüber Dampfkraftwerken hat der Einsatz von Gasturbinen in vielen Bereichen Vorteile:

- Gasturbinenanlagen können bis in den Leistungsbereich von über 150 MW auf Vorrat gefertigt werden. Sie haben ab Bestellung eine kurze Lieferzeit von 6 bis 12 Monaten, kleinere Einheiten sogar von 6 bis 8 Wochen.
- Gasturbinenanlagen sind kompakt gebaut und benötigen nur eine kleine Aufstellungsfläche. Der erhebliche Platzbedarf des Dampferzeugers entfällt.
- Die Anlagenkosten sind erheblich (ein Drittel bis die Hälfte) niedriger als bei Dampfkraftwerken.
- Gasturbinen haben kurze Anfahrtszeiten. Sie benötigen nur wenige Minuten vom Startbefehl bis zur Lieferung der vollen Leistung. Das prädestiniert diese Technik für Reserve- und Spitzenlastkraftwerke.
- Gasturbinenanlagen kommen ohne Kühlwasserversorgung aus. Der Eigenbedarf an elektrischer und Antriebsleistung ist gering (ca. 1%).
- Durch einfache Bedienung ist der Personalbedarf ebenfalls gering.

Allerdings sind beim Einsatz von Gasturbinenanlagen auch Nachteile gegenüber den Dampfkraftanlagen in Kauf zu nehmen:

- Es müssen bei Gasturbinen im offenen Kreislauf gasförmige oder flüssige Brennstoffe wie Erdgas oder Heizöl EL eingesetzt werden. Damit werden "Edel-Energieträger" verwendet, die kostenaufwendig sind und für viele andere Anwendungen (Industrie, kommunale Wärmeversorgung, Verkehr) vorgehalten werden müssen. Der Einsatz heimischer Kohle ist nicht möglich. Verfahren zur Kohlevergasung befinden sich in der Demonstrationsphase

- Die elektrischen Wirkungsgrade sind, wie bereits erwähnt, durch begrenzte Gasturbineeintrittstemperaturen, hohe Abgastemperaturen und limitierte Verdichterdruckverhältnisse auf ca. 35% beschränkt. Abhilfe kann die Kombination eines Gasturbinen- mit einem Dampfkraftprozess (GuD-Anlage) bieten.
- Die heißgasbeaufschlagten Teile im Schaufelbereich und am Turbinenausstritt haben wegen der hohen Betriebstemperaturen eine begrenzte Lebensdauer.
- Die Schall- und NO_x-Emissionen sind ziemlich hoch. Das begrenzt den Einsatz im kommunalen Bereich.

Die Summe dieser Eigenschaften führt dazu, dass Gasturbinenkraftwerke in Deutschland meist zur Spitzenlastlieferung und Reservehaltung eingesetzt werden, wo ihre Vorteile voll zur Geltung kommen. In anderen Ländern mit hohen Bedarfssteigerungsraten und mit einheimischen Gasressourcen steigt der Einsatz von Gasturbinenanlagen stark an.

Der Umstand, dass der exergetische Gesamtwirkungsgrad eines modernen Dampfkraftwerks über 41% und eines Gasturbinenkraftwerks über 36% nicht mehr merklich steigerbar ist, führten zu Überlegungen, wie die Exergie des heißen Verbrennungsgases besser nutzbar ist. Man erreicht das durch eine Verbindung des Dampf- und Gasturbinenprozesses über kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke.

3.4 Kombinierte Gas- und Dampf-Kraftwerke

Das Verbrennungsgas eines Dampfkraftwerks stellt einen Wärmestrom bei hohen Temperaturen zur Verfügung, dessen Exergiegehalt nur unvollkommen genutzt wird, weil der Wasserdampf trotz Zwischenüberhitzung und regenerativer Speisewasservorwärmung ein sehr viel niedrigeres Temperaturniveau hat. Um Wasserdampf von höchstens 550 °C zu erzeugen, braucht man Verbrennungsgas von 1500 °C und mehr. Will man den großen Exergieverlust bei der Wärmeübertragung im Dampferzeuger verringern, muss man die vom Verbrennungsgas bei hohen

Temperaturen angebotene Exergie anders nutzen, denn eine Erhöhung der Dampfparameter ist aus Gründen der Werkstoffwahl wirtschaftlich nicht möglich.

Es liegt nun nahe, die Verbrennung in einer Gasturbinenanlage auszuführen, das Verbrennungsgas in der Gasturbine unter Arbeitsgewinn zu entspannen und Dampf durch Abkühlen des Turbinengases zu erzeugen. Die hohe Abgasexergie der Gasturbinenanlage wird dem Dampfkraftwerk zugeführt und dort in Nutzarbeit verwandelt. Diese Kombination einer Verbrennungskraftanlage (Gasturbinenanlage) mit einer Wärmekraftmaschine (Dampfkreislauf) kann in zwei Varianten realisiert werden:

- Man geht von der Gasturbinenanlage aus und betrachtet die Wärmekraftmaschine als nachgeschalteten Prozess zur Abgas- und Abwärmeverwertung
- Man kann aber auch ein Dampfkraftwerk als Kernstück der kombinierten Anlage betrachten und die Gasturbine als Lieferanten des zur Verbrennung benötigten Sauerstoffs ansehen, der dem Dampferzeuger in einem bereits "vorgewärmten" und damit exergiereichen Gasgemisch, dem Gasturbinengas, zugeführt wird. Man spricht dann von einem Gas-Dampf-Kraftwerk mit Zusatzfeuerung. Im Dampferzeuger wird in der Regel Kohle verbrannt, in der Brennkammer der Gasturbinenanlage Öl oder Erdgas unter hohem Luftüberschuss, so dass das Turbinenabgas genügend Sauerstoff im Dampferzeuger enthält.

Generell bleiben selbst die verbesserten Dampfkraftprozesse wie beim Dampfkraftwerk mit Zwischenüberhitzung in Bezug auf den Wirkungsgrad 10 bis 15 Prozentpunkte hinter der Kombianlage. Hingegen sind die exergetischen Verluste im Kreislauf der Kombianlage höher, da der Wärmetausch zwischen den Abgasen der Gasturbine und dem Wasser-/Dampfkreislauf unter einem relativ hohen Temperaturunterschied stattfindet. Diese Tatsache macht deutlich, warum die Unterschiede der wirklichen Wirkungsgrade zwischen Kombikraftwerk (ca. 48% in der Praxis) und den übrigen Prozessen nicht sehr hoch ausfallen.

Bild 49 zeigt den Vergleich der vier bekannten Prozesse im Temperatur-Entropie-Diagramm. Danach nützt der kombinierte Prozess das Temperaturgefälle der zugeführten Wärme am besten aus, obwohl ein zusätzlicher Exergieverlust zwischen Gas- und Dampfprozess auftritt.

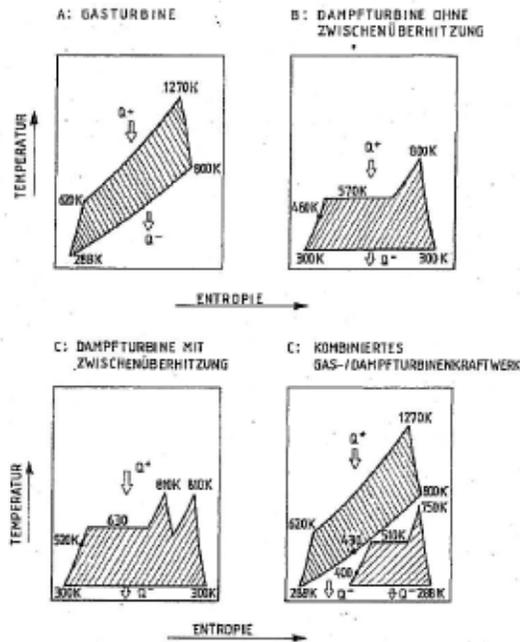
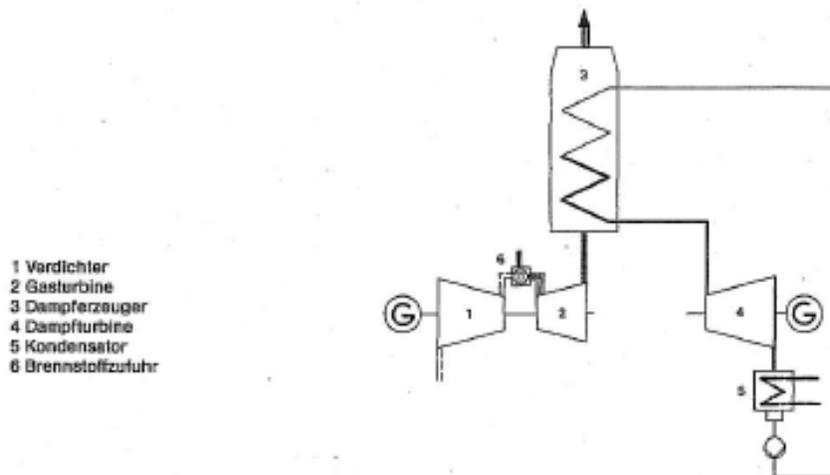


Abb. 49 Schema einer Gas-Dampf-Anlage ohne Zusatzfeuerung



- 1 Verdichter
- 2 Gasturbine
- 3 Dampferzeuger
- 4 Dampfturbine
- 5 Kondensator
- 6 Brennstoffzufuhr

Abb. 50: Prinzipschema eines kombinierten Gas-Dampfturbinenkraftwerks ohne Zusatzfeuerung

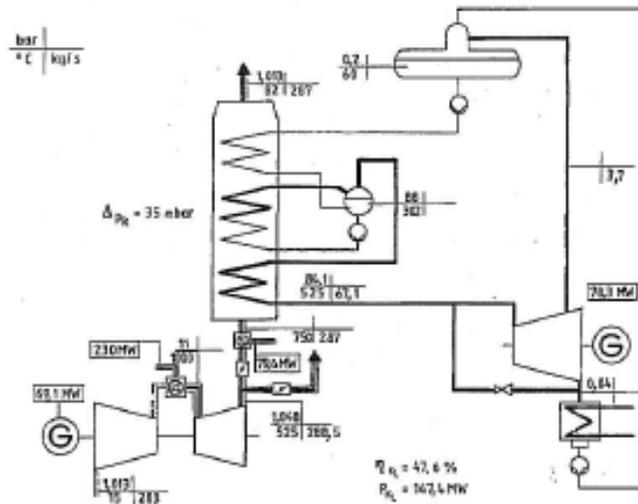


Abb. 51: Schema und Wärmebilanz eines Kombi-Kraftwerks mit geringer Zusatz-Feuerung

Charakteristisch für Kombikraftwerke mit Zusatzfeuerung ist das Verhältnis β der Brennstoffleistungen im Dampferzeuger (Zusatzfeuerung) und in der Gasturbine.

$$\beta := \frac{\dot{m}_B H_u}{\dot{m}_G H_u^G}$$

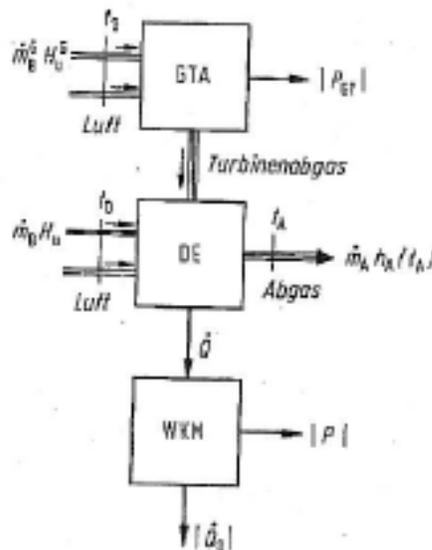


Abb. 52: Schema des Energieflusses in einem Gas-Dampf-Kraftwerk mit Zusatzfeuerung.

GTA: Gasturbinenanlage,

DE: Dampferzeuger,

WKM: Wärmekraftmaschine (Dampfkraftprozess)

Für $\beta = 0$ erhält man die Gasturbinenanlage mit Abwärmeverwertung durch den nachgeschalteten Dampfprozess. Der Dampferzeuger wird in diesem Falle als Abhitzekeessel bezeichnet. Häufig sieht man eine geringe Zusatzfeuerung ($\beta \approx 0,3$) vor, um die Temperaturen des Gasturbinenabgases von etwa 500 auf 700 bis 800 °C zu erhöhen.

Dies führt zur Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung. Bei maximaler Zusatzfeuerung ($\beta \approx 2$ bis 3) will man im Dampferzeuger möglichst viel Brennstoff verbrennen, weswegen hier auch zusätzlich Luft zugeführt wird. Der Grenzfall ($\beta \approx \infty$) entspricht der reinen Dampfkraftanlage.

Man bestimmt nun den Gesamtwirkungsgrad des Gas-Dampf-Kraftwerks, der durch

$$\eta := \frac{|P_{GT}| + |P|}{\dot{m}_B^G H_u^G + \dot{m}_B H_u}$$

Definiert ist. Er hängt vom Wirkungsgrad

$$\eta_{GT} := \frac{|P_{GT}|}{\dot{m}_B^G H_u^G}$$

der Gasturbinenanlage, vom thermischen Wirkungsgrad

$$\eta_{th} := \frac{|P|}{\dot{Q}}$$

der Wärmekraftmaschine (Dampfprozess) sowie vom Verhältnis

$$\eta_A := \frac{\dot{Q}}{\dot{Q} + \dot{m}_A [h_A(t_A) - h_A(t_0)]}$$

ab, das als Ausnutzungsgrad des Abhitzekessels bzw. Dampferzeugers bezeichnet wird. Zur Vermeidung von Korrosionen liegt die Abgastemperatur t_A über der Bezugstemperatur t_0 , bei der Brennstoff und Luft zugeführt werden. Es tritt ein merklicher Abgasverlust auf; η_A erreicht meist nur Werte um 0,7. Eine Leistungsbilanz für das aus Gasturbinenanlage und Dampferzeuger bestehende System liefert die Beziehung

$$\dot{m}_B^G H_u^G + \dot{m}_B H_u = |P_{GT}| + \dot{Q} + \dot{m}_A [h_A(t_A) - h_A(t_0)],$$

woraus für den Wirkungsgrad des Gas-Dampfturbinenkraftwerks

$$\eta = \eta_A \eta_{th} + \frac{\eta_{GT}}{1 + \beta} (1 - \eta_A \eta_{th})$$

folgt. Im Grenzfall $\beta \approx \infty$ erhält man $\eta = \eta_A \eta_{th}$, also den Wirkungsgrad eines

Dampfkraftwerks, wenn man beachtet, dass dann η_A mit dem Kesselwirkungsgrad η_K übereinstimmt.

Bild 53 zeigt die thermischen Wirkungsgrade bei Nennlast der betrachteten Kraftwerkstypen abhängig von der Leistung. Die Dampfkraftwerke wurden in Anlagen mit und ohne Zwischenüberhitzung aufgeteilt. Bei den Gas- und Dampfanlagen sind nur solche ohne oder mit geringer Zwischenüberhitzung dargestellt.

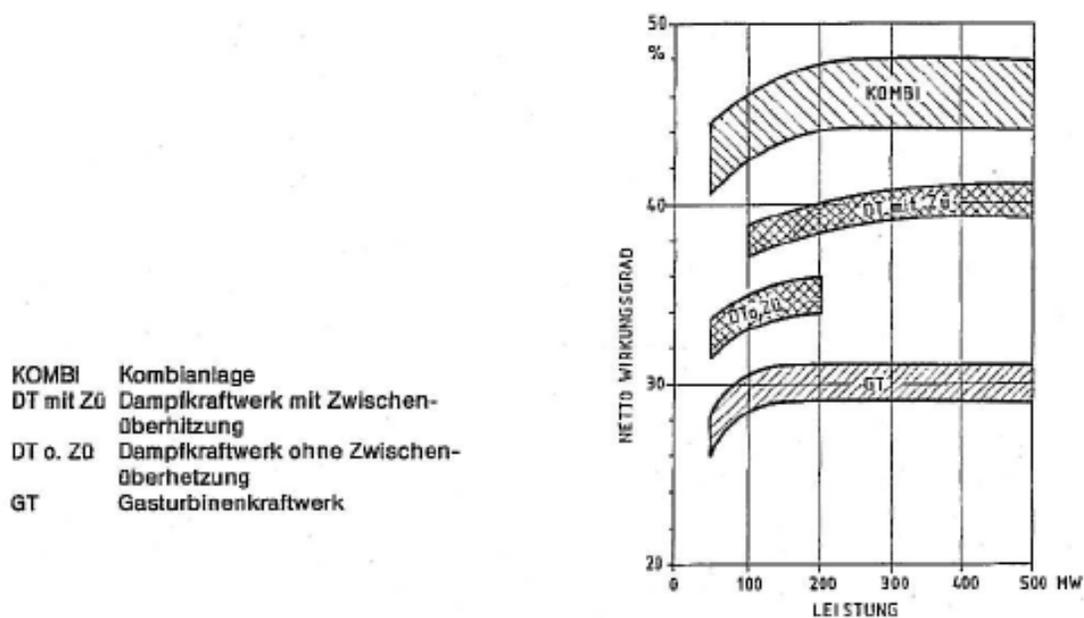


Abb. 53: Vergleich der thermischen Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerkstypen

Aus dem Diagramm ist die thermodynamische Überlegenheit der Kombianlage ersichtlich. Weit abgeschlagen sind die Gasturbinen, die selbst mit Eintrittstemperaturen von ca. 1000° C nur einen Wirkungsgrad von ungefähr 30% erreichen.

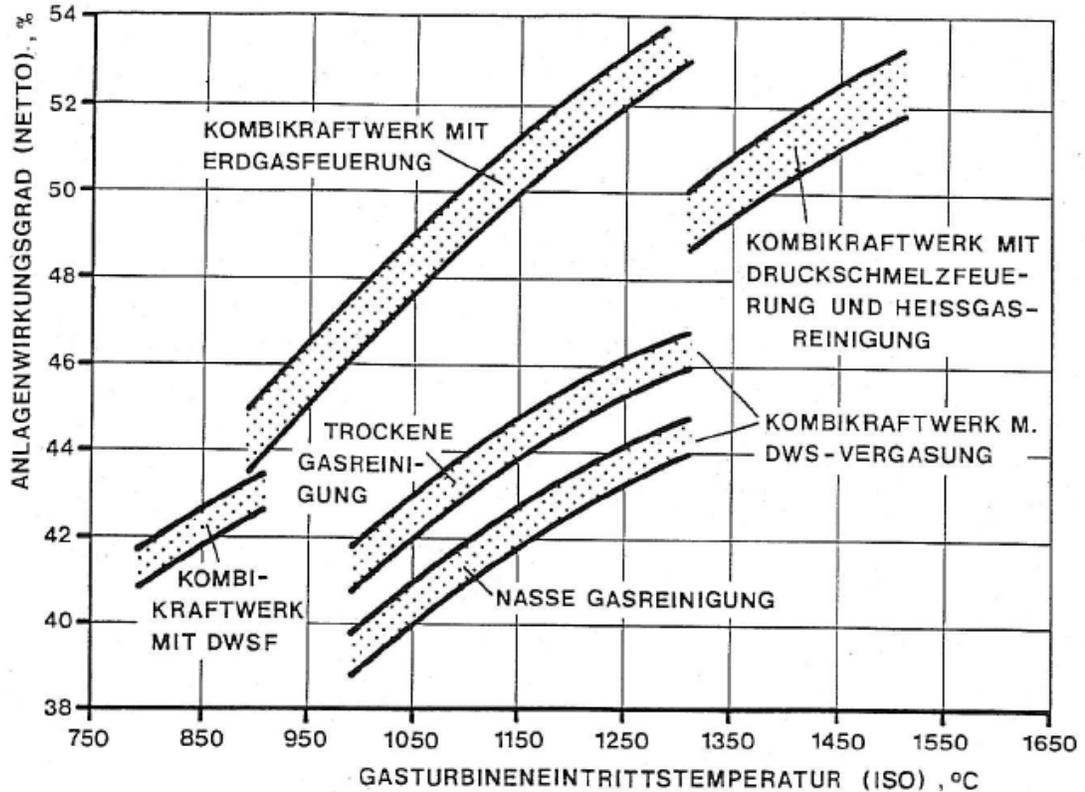


Abb. 54: Wirkungsgradvergleich neuer Kraftwerkskonzepte

Zum Betrieb eines Gas-Dampf-Kraftwerks ist neben der Kohle auch der "Edelbrennstoff" Erdgas oder Heizöl für die Gasturbine erforderlich. Es wurden in jüngster Zeit Entwicklungen eines solchen Kraftwerks allein für Kohle als Brennstoff durchgeführt. Dies gelingt durch die Kombination des Kraftwerks mit einer Kohlevergasungsanlage, die das Gas zum Betrieb des Gasturbinenteils liefert. Durch den Einsatz der Kohlevergasung hofft man außerdem, den Ausstoß der Schadstoffe SO_2 , NO_x und Staub wirkungsvoller begrenzen zu können als durch die Abgasentschwefelung- und Entstickungsanlagen in den zur Zeit betriebenen Kohlekraftwerken

3.5 Kraft-Wärme-Kopplung

Ein noch größeres Potential zur Verbesserung der Brennstoffausnutzung als Prozesskombinationen besteht darin, normalerweise in getrennten Anlagen ablaufende Prozesse zur Erzeugung unterschiedlicher Endprodukte in einer Anlage so zu koppeln, dass bei vorgegebenem Brennstoffeinsatz die Summe der verwertbaren Endprodukte ein Nutzen-Maximum ergibt. Das klassische Beispiel einer solchen energetisch vorteilhaften Koppelproduktion in einer Anlage ist die gleichzeitige Erzeugung von mechanischer Arbeit oder Strom sowie von Nutzwärme in der Kraft-Wärme-Kopplung.

Die praktische Realisierung dieser fast idealen Brennstoffnutzung wird allerdings dadurch eingengt, dass nicht immer gleichzeitig der Bedarf für die Produkte Strom und Nutzwärme in dem durch die optimale Prozessführung vorgegebenen festen Verhältnis besteht.

Thermodynamische und technische Grundlagen der Wärmeauskopplung (WA) aus Kondensationskraftwerken

Die kombinierte Erzeugung von elektrischer Energie und Heizwärme durch die Nutzung der bei der Stromerzeugung zwangsläufig anfallenden Abwärme führt in der Regel zu Gesamtwirkungs- oder Nutzungsgraden, die deutlich über denen der getrennten Erzeugung liegen und liefert dadurch einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung. Bei Kondensationskraftwerken, die zur Stromerzeugung errichtet wurden und dabei auch über 1.000 MW installierte elektrische Leistung aufweisen können, bewirkt die Auskopplung eines Teils der riesigen Abwärmemenge zu Heizzwecken nur eine geringe Steigerung des Gesamtwirkungs- oder -nutzungsgrades, obwohl die Fernwärmesysteme deutscher Großstädte damit vollständig versorgt werden könnten. Der Gesamtwirkungsgrad von Kondensationskraftwerken mit Wärmeauskopplung ist daher keine geeignete Größe für eine qualitative Bewertung der darin stattfindenden Kraft-Wärme-Kopplung. Aus diesem Grund ist eine gedankliche

Trennung der gekoppelten und der ungekoppelten Elektroenergieerzeugung in Form der so genannten Kondensations- und Gegendruckscheibe vorzunehmen. Die Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Kondensationskraftwerk beschränkt sich daher ausschließlich auf die Gegendruckscheibe.

Bei der getrennten Erzeugung von Elektroenergie oder Wärme wird der Nutzen ins Verhältnis zum primärenergetischen Aufwand gesetzt. Die Elektroenergieerzeugung und die Wärmeerzeugung werden mit dem elektrischen Wirkungsgrad η_{el} und dem thermischen Wirkungsgrad η_{th} bewertet.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{H}_{Br}} \quad \eta_{th} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{H}_{Br}} \quad \text{mit } \dot{H}_{Br} = \dot{m}_{Br} \cdot H_u$$

Im Unterschied zur getrennten Erzeugung von Elektroenergie und Wärme besteht bei Kraft-Wärme-Kopplung das Problem, dass die Brennstoffenergie aufgrund fehlender physikalischer Zusammenhänge nicht eindeutig den Produkten zugewiesen werden kann. Zur Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung bedarf es daher weiterer Kennzahlen. Zur Anwendung kommen dabei in der Regel der Gesamtwirkungsgrad (total) der Gegendruckscheibe, definiert als die Summe der ausgekoppelten Wärme und der gekoppelt erzeugten Elektroenergie im Verhältnis zur Brennstoffenergie der Gegendruckscheibe, und die Stromkennzahl, die die Koppelprodukte Strom und Wärme ins Verhältnis setzt.

$$\eta_{total} = \frac{P_{el,KWK} + \dot{Q}_H}{\dot{H}_{Br,GD}} \quad \sigma = \frac{P_{el,KWK}}{\dot{Q}_{H,KWK}}$$

Darüber hinaus ist die Stromverlustkennziffer s eine weitere wichtige Kenngröße der Kraft-Wärme-Kopplung. Sie gibt an, wie die elektrische Leistung durch Auskopplung von Heizwärme gegenüber der Kondensationsleistung abnimmt und kann zur Beurteilung der Qualität der Wärmeauskopplung hinzugezogen werden.

$$s = \frac{\Delta P_{el}}{Q_H}$$

Die Verläufe der Stromverlustkennziffern eines GUD- und eines Dampfkraftwerkes sind beispielhaft in Bild 55 dargestellt.

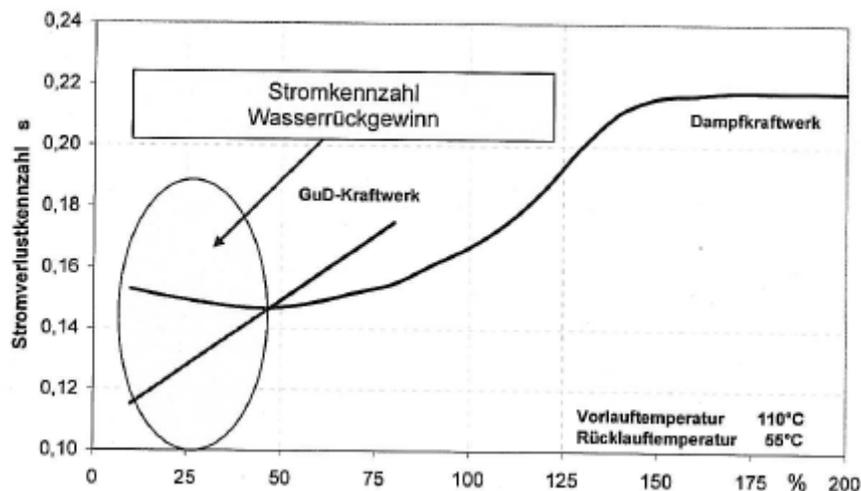


Abb. 55: Stromverlustkennziffer über dem Verhältnis Q_H/P_{el} //Kail 1999

Beim GUD-Kraftwerk steigt die Stromverlustkennzahl über dem Lastverhältnis streng monoton an. Ab dem Zuschaltzeitpunkt der Zusatzfeuerung hat die Stromverlustziffer eine andere Qualität, da die zusätzlich ausgekoppelte Wärme die Stromerzeugung nicht mehr vermindert. Die Stromverlustkennziffer verliert an dieser Stelle ihre Aussagekraft.

Der Verlauf der Stromverlustkennziffer des Dampfkraftwerkes kann auf Änderungen der Verluste durch Wärmeauskopplung, in der Vorwärmstrecke und der Dampfturbine zurückgeführt werden. Mit Verlusten sind keine energetischen, sondern exergetische Verluste gemeint, die in den Heizkondensatoren und der Vorwärmstrecke im Wesentlichen aus den Temperaturdifferenzen zwischen primär- und sekundärseitigem Stoffstrom bei der Wärmeübertragung resultieren.

$$\dot{E}_V = \dot{Q}_H \cdot T_U \cdot \frac{T_p - T_s}{T_p \cdot T_s}$$

In Bild 56 ist das Verhältnis von Exergieverlusten E_V zur Exergie der ausgekoppelten Heizwärme E_H über dem Verhältnis von Heizwärme- zu elektrischer Leistung dargestellt. Darin wird deutlich, dass die Auskopplung mittlerer Heizwärmeleistungen qualitativ am besten ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei kleinen Heizwärmeleistungen nur der unterste Heizkondensator betrieben wird (einstufige Aufheizung) und bei großen Heizwärmeleistungen die Grädigkeiten der Wärmeübertrager groß sind. In beiden Fällen ist die mittlere Temperaturdifferenz der Stoffströme größer als bei mittleren Heizwärmeleistungen.

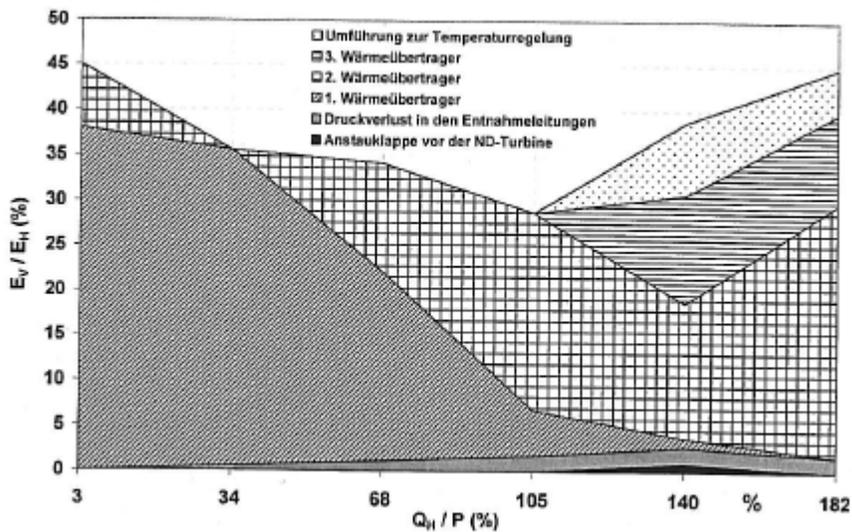


Abb. 56: Spezifische Exergieverluste in den einzelnen Komponenten über dem Verhältnis Q_H/P_{el} //Kail 1999

Der jeweils nächst höhere Heizkondensator wird immer dann zugeschaltet, wenn die Höhe des Dampfdrucks der darunter liegenden Anzapfung nicht mehr ausreicht, um die gewünschte Vorlauftemperatur einzustellen. Sind alle Heizkondensatoren in Betrieb, kann bei weiter steigender Heizwärmeleistung die Vorlauftemperatur durch Anstauen

des Dampfdrucks an geeigneter Stelle eingehalten werden. Die Exergieverluste durch Druckverluste in den Leitungen und der Anstauklappe sowie durch Mischung von Heizwasserströmen zur Regelung der Vorlauftemperatur sind vergleichsweise gering und haben deshalb nur einen untergeordneten Einfluss auf die Stromverlustkennzahl.

Mit zunehmender Heizdampfentnahme fallen die Dampfdrücke an den ersten Anzapfungen zur Speisewasservorwärmung, so dass die letzten Vorwärmer größere Aufwärmspannen leisten müssen. Durch die mit den Aufwärmspannen steigenden mittleren Temperaturdifferenzen steigen auch die Exergieverluste, wodurch der Verlauf der Aufwärmspannen die Stromverlustkennzahl beeinflusst.

Neben den Veränderungen der Verluste in den Heizkondensatoren und der Vorwärmstrecke führt die Entnahme von Heizdampf durch die Verringerung der weiterströmenden Dampfmenge zu einer Abnahme der Leistung des Niederdruckteils der Turbine und zu einem Absinken des Drucks hinter den Entnahmen. Der Wirkungsgrad des Niederdruckturbinenteils fällt in Abhängigkeit vom Verhältnis der entnommenen zu der ansonsten den Turbinenteil durchströmenden Dampfmenge ab.

Bild 57 zeigt, wie sich Turbinenwirkungsgrad und -leistung verhalten, wenn die gesamte den Niederdruckteil durchströmende Dampfmenge zur Heizwärmeauskopplung entnommen werden kann. Zu erkennen ist auch, dass die Abnahme des Drucks im Niederdruckteil zu einer Leistungssteigerung im Mitteldruckteil der Turbine führt, während der Hochdruckteil von der Dampfentnahme weitestgehend unbeeinflusst bleibt.

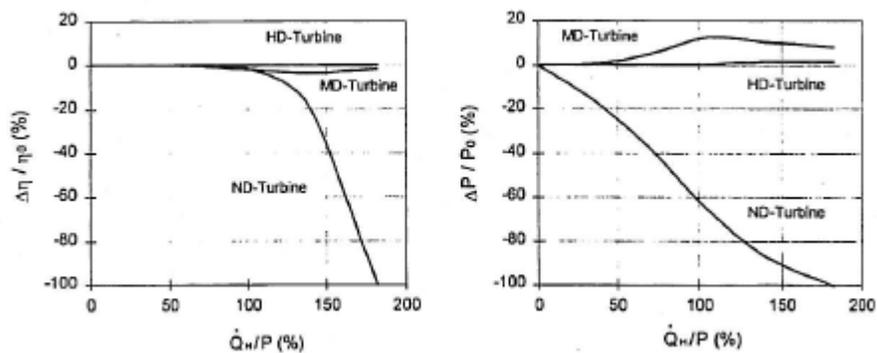


Abb. 57 : Relative Wirkungsgrad- und Leistungsänderung der Turbine über dem Lastverhältnis \dot{Q}_H/P_{el} //Kail 1999

Reichen die Druckniveaus der Entnahmen für die geforderte Vorlauftemperatur nicht aus, wird der Dampf vor dem Niederdruckteil angestaut. Das Anstauen von Dampf entspricht einer isenthalpen Drosselung, wodurch das Enthalpiegefälle der Niederdruckstufe verkleinert wird. Das Anstauen bewirkt somit einen Stromverlust in der Niederdruckturbine, die zur Kondensationsscheibe gehört. Der Stromverlust ist jedoch ebenfalls der Wärmeauskopplung anzulasten. Die Überlagerung der beschriebenen Effekte führt letztlich zu dem in Bild 57 dargestellten Verlauf der Stromverlustkennzahl.

Obwohl die Verlustmechanismen beim GUD- und beim konventionellen Dampfkraftwerk gleich sind, beginnt die Stromverlustkennzahl des GUD-Kraftwerks im Vergleich zum Dampfkraftwerk bei niedrigeren Werten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Heizwärme bei kleinen Leistungen überwiegend aus Abgaswärme gewonnen wird, die anderenfalls ungenutzt an die Umgebung abgeführt werden würde, und beim GUD-Kraftwerk die optimalen Entnahmedrücke gewählt werden können, da auf die Vorwärmstrecke, die es beim GUD-Kraftwerk nicht gibt, keine Rücksicht genommen werden braucht.

Stromverlustkennzahl

Auf die physikalische Bedeutung der Stromverlustkennzahl soll zunächst näher eingegangen werden. In Bild 58 ist der Punkt der Dampfentnahme mit E und der Punkt, in dem die Masseströme aus HEIKO und Kondensator wieder zusammengeführt werden, mit EV bezeichnet. Während der Dampf bei der Kondensationsfahrweise die Strecke TA –KA-EV durchläuft und dabei die elektrische Arbeit W erzeugt, geht der Entnahmedampf unter Abgabe der Wärme Q den direkten Weg von E nach EV und verursacht dadurch in der Turbine den Verlust an elektrischer Arbeit W_v .

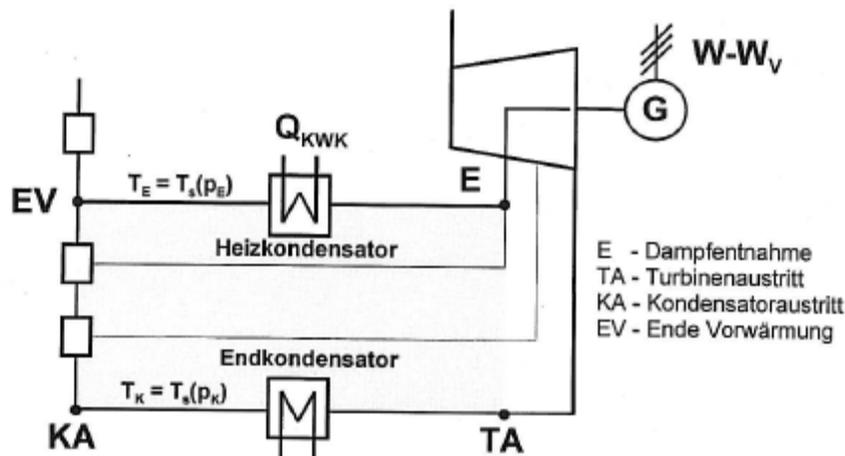


Abb. 58 : Kaltes Ende eines Entnahme-Kondensationskraftwerks

Die Stromverlustkennzahl entspricht demnach dem elektrischen Wirkungsgrad, mit dem die ausgekoppelte thermische Energie hätte in Elektroenergie transformiert werden können.

$$s = \frac{W_v}{Q_{KWK}}$$

Da die Punkte E, TA, KA und EV die Eckpunkte eines Carnot-Prozesses zwischen den Temperaturen $T_s(p_E)$ und $T_s(p_K)$ sind, bietet es sich an, die Stromverlustkennzahl als

Funktion des Carnot-Wirkungsgrades und eines Gütegrades, der die Abweichung des realen Prozesses vom Carnot-Prozess berücksichtigt, zu approximieren.

$$s = \nu \cdot \frac{T_E - T_K}{T_E}$$

Darin bedeuten:

$T_E = T_s(p_E)$ Temperatur gesättigten Dampfes beim Entnahmedruck p_E in K

$T_K = T_s(p_K)$ Temperatur gesättigten Dampfes beim Kondensationsdruck p_K in K

$\nu =$ Gütegrad

Obwohl der Turbinenwirkungsgrad den größten Einfluss auf den Gütegrad hat, ist der Gütegrad jedoch nicht mit dem Turbinenwirkungsgrad identisch, sondern beinhaltet auch alle anderen dissipativen Vorgänge wie Kondensatvorwärmung, Erhitzung usw. In der Praxis nimmt der Gütegrad Werte zwischen 0,7 und 0,85 an und wird von Baehr /Baehr 1989/ repräsentativ mit 0,78 bewertet.

Unter der Voraussetzung, dass der Gütegrad als konstant betrachtet wird, ist die Stromverlustkennzahl nur noch von den Temperaturen T_E und T_K abhängig, die mit der Wasserdampf tabel zu bestimmen sind. Zum Zwecke einer einfacheren Handhabung wird empfohlen, die approximierten Stromverlustkennzahl in einem Diagramm entsprechend Bild 59 darzustellen, so dass der Anwender den für seine Anlage zutreffenden Wert direkt ablesen kann.

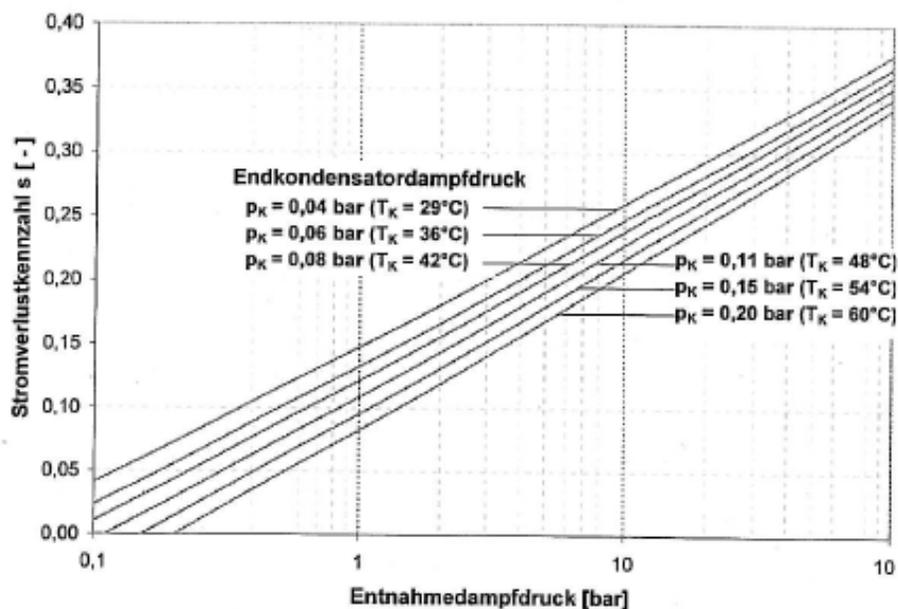


Abb. 59: Approximierte Stromverlustkennzahl in Abhängigkeit von Entnahme- und Kondensationsdampfdruck

Aus Bild 59 wird ersichtlich, dass der spezifische Stromverlust mit steigendem Entnahmedruck zu- und mit steigendem Kondensationsdruck abnimmt.

Die Exergieverluste bei der Heizwärmeauskopplung sind auf die zur Wärmeübertragung in den Heizkondensatoren erforderlichen Temperaturdifferenzen zwischen Entnahmedampf und Heizwasser zurückzuführen. Diese Temperaturdifferenzen werden von der Aufwärmspanne des Heizwassers und der Grädigkeit zur Kondensationstemperatur des Entnahmedampfes bestimmt

Aufgrund der hohen Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf erfolgt die Erwärmung des Fernheizwassers zumeist auf mehrere Stufen verteilt.

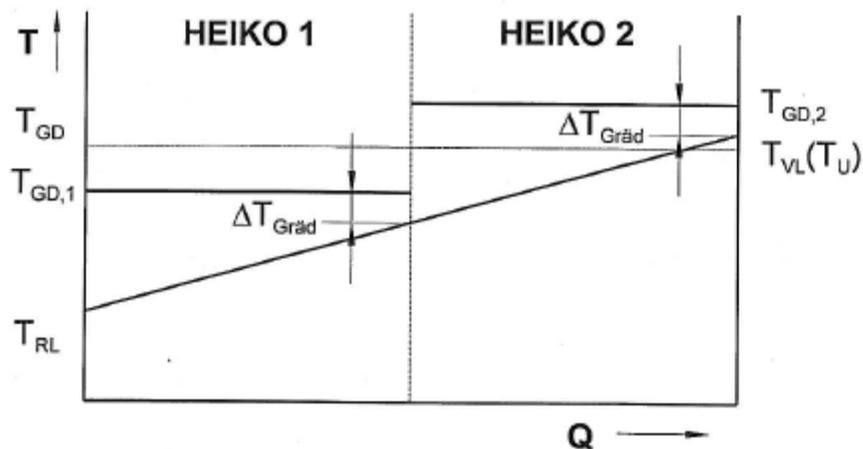


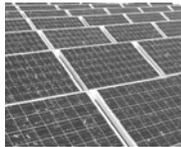
Abb. 60: T-Q-Diagramm einer zweistufigen Wärmeauskopplung

Die mittlere Stromverlustkennzahl ergibt sich aus den gewichteten Stromverlustkennzahlen der einzelnen Entnahmen.

Steht nur eine Entnahme zur Verfügung, muss diese so ausgelegt sein, dass der Wärmebedarf und die maximale Netzvorlauftemperatur damit realisiert werden kann, so dass die Entnahme auf einem entsprechend hohen Temperaturniveau bei einem entsprechend hohen spezifischen Stromverlust erfolgt. Mit zunehmender Anzahl von Entnahmen kann die Entnahmekondensationstemperatur der Vorlauftemperatur der jeweiligen Stufe angepasst werden. Die Wärmeauskopplung erfolgt aus diesem Grund zweckmäßig in den unteren Stufen mit geringen Vorlauftemperaturen.

Bei der Auskopplung von Wärme aus großen Kraftwerken ist es in der Regel notwendig, diese Wärme über entsprechend große Transportleitungen (Wärmeschienen) zu den Verbrauchsschwerpunkten (z. B. Städten) zu transportieren. Die dabei auftretenden Transportverluste beeinträchtigen natürlich den Gesamtwirkungsgrad dieser Energieumwandlung. Aus diesem Grund werden in zunehmendem Maße Wege gesucht, eine dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung aufzubauen, in der verbrauchsnahe Wärme und Strom erzeugt wird. Diese Erzeugungsanlagen werden im Allgemeinen unter dem Sammelbegriff Blockheizkraftwerke (BHKW) zusammengefasst. Als BHKW-Technik kommen sowohl Gas- bzw. Ölmotoren als auch Brennstoffzellen,

Stirlingmotoren oder Mikroturbinen in Frage. Da diese Anlagen eng mit der Fernwärmeversorgungsstruktur zusammenhängen, werden sie im Kapitel Fernwärme behandelt.



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

3. Stromversorgung

3.1 Standbeine der konventionellen kommunalen Stromversorgung

3.2 Kraftwerkstechnik: Wärmekraftwerke

3.2.1 Physikalische Grundlagen

3.2.2 Dampfkraftwerke, Grundlagen

II. Technik der kommunalen Versorgung

3. Stromversorgung

3.1 Standbeine der konventionellen kommunalen Stromversorgung

Die Stromversorgung gehört zum Kernbereich kommunaler Unternehmensleistungen. Sie teilt sich in drei Hauptbereiche auf¹⁶:

- die Stromerzeugung
- die Stromverteilung
- die Elektrizitätsanwendung

Die Stromerzeugung wird in vielen Fällen nicht von den kommunalen Versorgungsunternehmen selbst betrieben, sondern der Strom wird von Lieferanten der übergeordneten Ebene (Regionalunternehmen, Verbundunternehmen) geliefert.

Vor der Deregulierung des Europäischen Energiemarktes (1996) wurde die Lieferung von elektrischer Energie meist auf der Basis langfristiger Lieferverträge zwischen Kraftwerksbetreibern und Versorgungsunternehmen geschlossen. Durch den neu entstandenen Wettbewerbsmarkt werden Stromlieferungen heute auf der Basis wettbewerbsorientierter Beschaffungen kurz- bzw. mittelfristig vereinbart. Der Preis der Energielieferung orientiert sich nach dem Prinzip von Angebot und Nachfrage, der Handelsplatz ist die Strombörse (z. B. EEX Leipzig).

¹⁶ Prof, Dr. H.-J. Koglin: Einführung in die Energietechnik. Überblick über die elektrische Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Vorlesung am Lehrstuhl für Energieversorgung der Universität des Saarlandes

Exkurs börsenorientierter Stromhandel

Beim börsenorientierten Stromhandel bieten die Kraftwerksbetreiber die von ihnen darstellbaren Strommengen an der Börse an, die Stromhändler fragen die von ihnen benötigten Strommengen ebenso an der Börse an, aus dem Verhältnis von Angebot und Nachfrage ergibt sich der aktuelle Preis. Man unterscheidet kurzfristige Liefermengen (Spot) und langfristige Liefermengen (forward). Ebenso wird unterschieden zwischen Spitzenlastmengen (peak) und Grundlastmengen (base). Da Strom keine speicherbare Ware ist, die bei Bedarf auf Lager gelegt werden kann, sondern quasi immer „just in time“ produziert und verbraucht werden muss, müssen die Nachfrager nicht nur die benötigte Menge, sondern auch den Zeitpunkt der jeweiligen Nutzung angeben (Lastprofile). Dies bedingt sowohl bei den Marktteilnehmern als auch bei der Börse selbst eine sehr kurze Reaktionszeit, so dass diese wirtschaftlichen Transaktionen nahezu ausschließlich über das Internet abgewickelt werden.

Neben Strom werden an den Börsen auch Emissionszertifikate gehandelt.

Exkurs Emissionshandel

Die zunehmende Bedeutung des Klimawandels und hier insbesondere der Ausstoss von CO₂ aus Kraftwerken und Industrieanlagen haben dazu geführt, dass der Staat versucht, den CO₂-Ausstoss zu reduzieren. Ein Instrument dazu ist u. a. der „Emissionshandel“. Industrieanlagen und Kraftwerke müssen für die CO₂-Mengen, die sie durch die Verbrennung fossiler Energie erzeugen, sogen. „Emissionszertifikate“ (Berechtigungsscheine) erwerben. In einem ersten Schritt wurden zunächst den bestehenden Kraftwerken und Industrieanlagen kostenlos Emissionszertifikate in Höhe ihrer bisherigen Emissionen zur Verfügung gestellt. Wenn ein Kraftwerk nunmehr mehr Strom als bisher erzeugen will, muss es sich für diese Mehrmengen entsprechende CO₂-Zertifikate kaufen. Andererseits können Kraftwerksbetreiber, denen es gelingt, durch Effizienzsteigerung in der Stromerzeugung Emissionen einzusparen, die zugehörigen Emissionszertifikate über die Börse verkaufen. Durch eine sukzessive

Reduktion der Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Emissionszertifikate (nationaler Allokationsplan) wird so eine allmähliche Reduktion der CO₂-Emissionen erreicht.

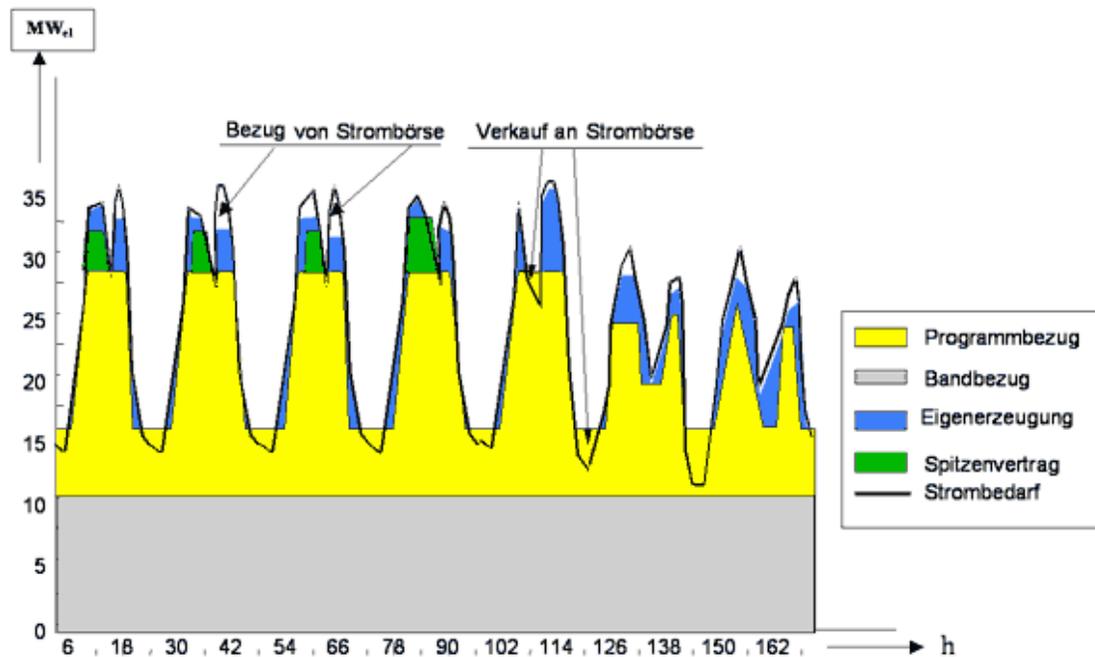


Abb. 20: Strombörse

Große Verbundunternehmen mit ihren großen Kraftwerkskapazitäten sorgen mit großen Leistungseinheiten für die Deckung der Grundlast des Strombedarfs mit den Energieträgern Braunkohle, Kernkraft und Wasserkraft.

Regionale und kommunale Stromversorger, die die Endkunden direkt beliefern und die Lastschwankungen auffangen müssen, sind deshalb für die Deckung des sich zeitlich ändernden Mittellast- und Spitzenlastbereichs zuständig. Mittellast- und Spitzenlaststrom wird in thermischen Kraftwerken aus den Energieträgern Steinkohle und Erdgas gewonnen. Öl als Brennstoff für Spitzenlastkraftwerke wird aus Ressourcen- und Umweltgründen zunehmend verdrängt.

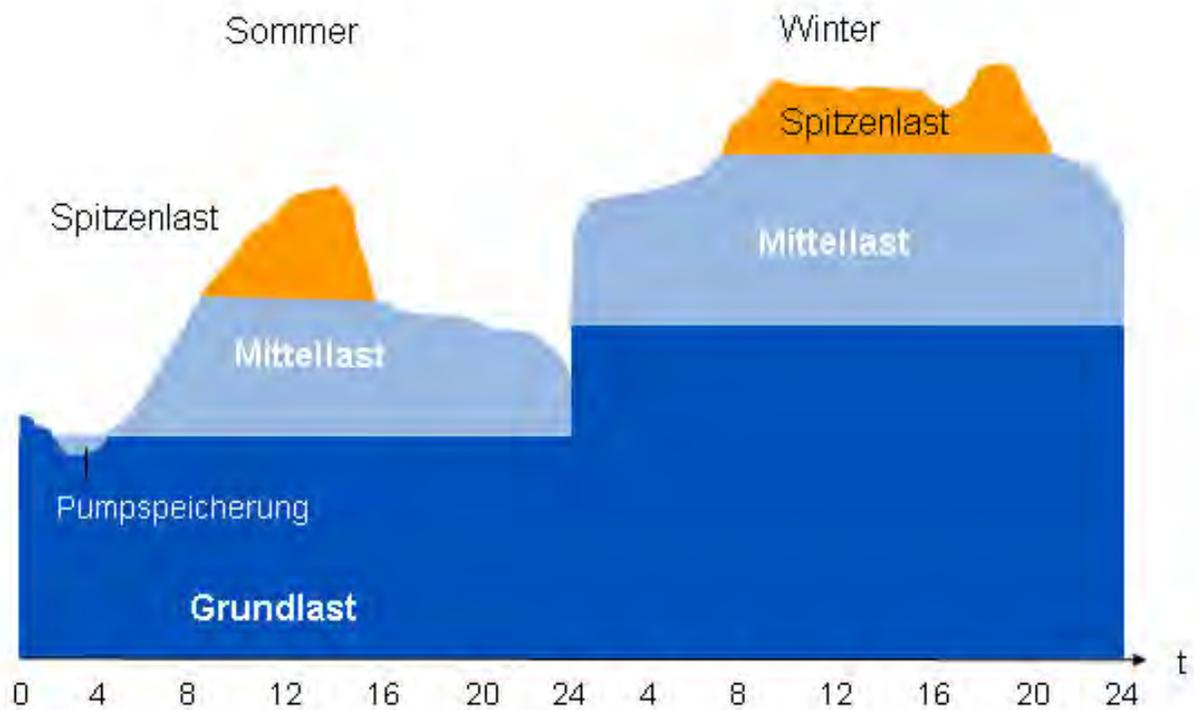


Abb. 21: Lastgang

Große kommunale Unternehmen (z.B. HEW und Stadtwerke München) können auch Beteiligungen an Kernkraftwerken haben, um den großen Grundlastbedarf ihres Versorgungsgebiets zu decken.

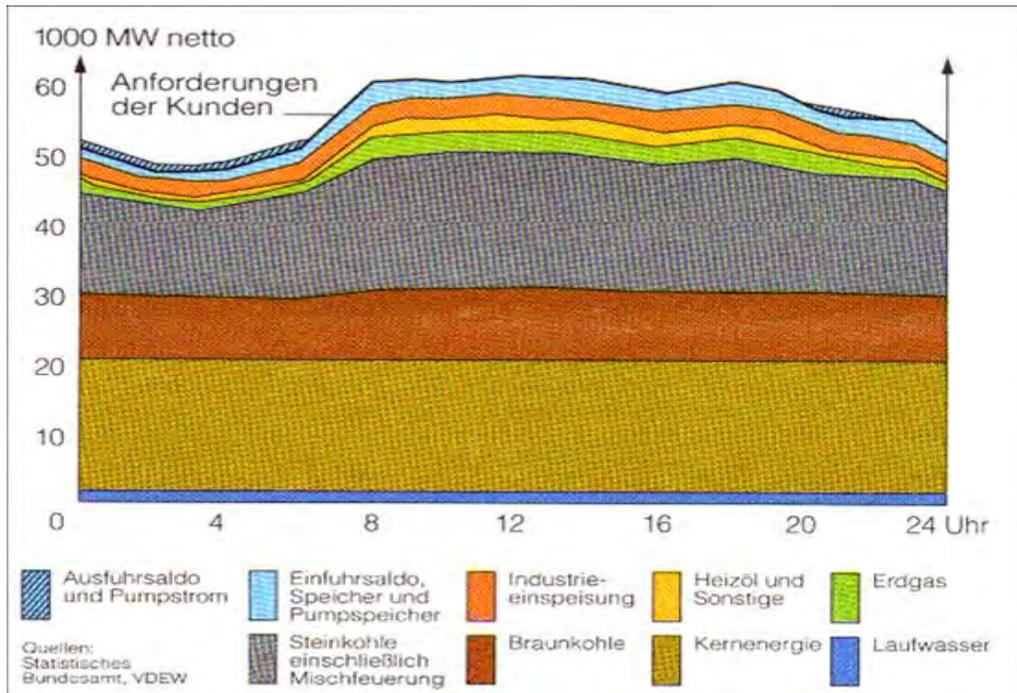


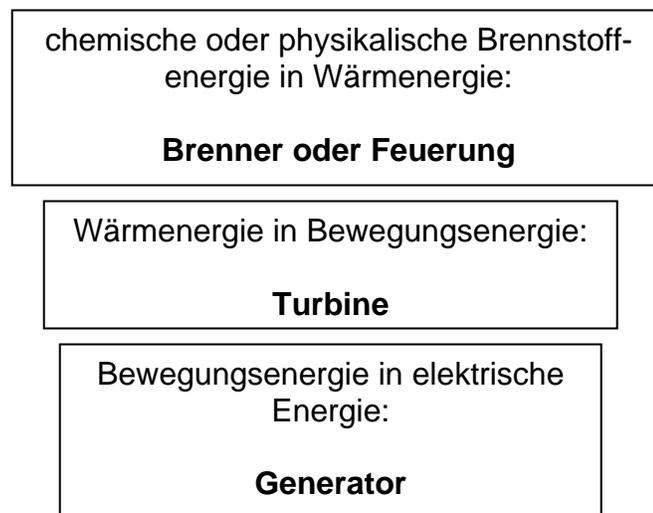
Abb. 22: Stromverbrauch Deutschland an einem Januartag

3.2. Kraftwerkstechnik; Wärmekraftwerke

Alle Kraftwerkstypen, die den Umwandlungsweg über die Wärmeenergie beschreiten, werden thermische Kraftwerke oder Wärmekraftwerke genannt.

Für die Energieumwandlungskette in thermischen Kraftwerken benötigt man verschiedene Anlagenteile und Maschinen:

Umwandlungskette:



Im Kraftwerkspark kommunaler Versorger dominieren aus den obengenannten Gründen die thermischen Kraftwerke, die mit Kohle oder Gas betrieben werden. Sie können in dem Leistungsbereich, der für örtliche Versorger interessant ist (ab ca. 5 MW elektrischer Leistung) gebaut und wirtschaftlich betrieben werden. Des Weiteren können thermische Kraftwerke gleichzeitig zur Versorgung mit Wärme über die sog. Kraft-Wärme-Kopplung dienen.

3.2.1 Physikalische Grundlagen der thermischen Kraftanlagen

Thermische Kraftanlagen gehorchen den Gesetzen der Thermodynamik bzw. nutzen thermodynamische Prinzipien aus.

Die thermodynamischen Prinzipien sind in den zwei Hauptsätzen der Thermodynamik zusammengefasst:

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz)

- sagt aus, dass Energie nicht erzeugt oder verbraucht, sondern nur von einer Energieform in die andere umgewandelt werden kann
- gilt für geschlossene Systeme, die keine Wechselwirkung mit der Umgebung haben, so dass keine Energie aus- oder eintreten kann.
- teilt die Energie innerhalb eines geschlossenen Systems in Arbeit und Wärme auf. Das Verrichten von Arbeit und das Übertragen von Wärme sind zwei unterschiedliche Arten, Energie über die Systemgrenze zu transportieren. Das Prinzip von der Erhaltung der Energie führt schließlich zu einer Energiebilanz, welche die Änderung der im System gespeicherten Energie (innere Energie) gegen die Energie aufrechnet, die während des Prozesses als Arbeit oder als Wärme (äußere Energie) die Systemgrenze überschreitet.

Die Zahl der möglichen Umwandlungen von einer Energieform in die andere ist groß. Dabei werden bestimmte Umwandlungsrichtungen bevorzugt, manche treten überhaupt nicht auf. Meist läuft die Energiewandlung eines geschlossenen Systems so ab, dass der Endzustand eine minimale potentielle Energie besitzt¹⁷.

Jede Form von Arbeit wandelt sich früher oder später in „ungeordnete“ kinetische Energie und damit in thermische Energie um. Es existiert also eine „Irreversibilität“ der thermischen Energie, die **im 2. Hauptsatz der Thermodynamik** beschrieben ist.

- Unter Irreversibilität versteht man, dass ein System, in dem ein Prozess abgelaufen ist, nicht wieder in seinen Anfangszustand gebracht werden kann, ohne dass Änderungen in der Umgebung zurückbleiben.

¹⁷ Th. Bohn, W. Bitterlich: Grundlagen der Energie- und Kraftwerkstechnik Band 1 der Handbuchreihe Energie. Technischer Verlag Resch, Gräfelting / Verlag TUV Rheinland Köln. 1982

- Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel. Reversible Prozesse sind nur idealisierte Grenzfälle irreversibler Prozesse.
- Es gelingt nicht, die z.B. durch Reibungsarbeit erhaltene thermische Energie wieder vollständig in Arbeit zurückzuführen.
- Die Vorzugsrichtung der Energieumwandlung bewirkt, dass Wärme nicht aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen kann.

Ein Maß für den Beitrag des irreversiblen Anteils der Energieumwandlung ist die Entropie S .

$$dS_w \equiv \frac{dW_{\text{diss}}}{T}$$

Die Entropie wird bestimmt durch die Reibungsarbeit dW_{diss} , die durch einen irreversiblen Prozess in innere Energie überführt wird, und der Systemtemperatur T . Je höher die Systemtemperatur T , desto geringer ist die Entropie und desto mehr geordnete Energie kann durch Umwandlung aus thermischer Energie gewonnen werden.

Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie

Nach dem ersten Hauptsatz kann bei keinem thermodynamischen Prozess Energie erzeugt oder vernichtet, sondern nur von einer Energieform in die andere umgewandelt werden. Die Bilanzgleichungen des 1. Hauptsatzes enthalten jedoch keine Aussage darüber, ob eine bestimmte Energieumwandlung überhaupt möglich ist. Hierüber gibt der 2. Hauptsatz Auskunft, der ein allgemeiner Erfahrungssatz über die Richtung ist, in der thermodynamische Prozesse ablaufen. Das erkennt man deutlich bei adiabaten Systemen, also Systemen ohne äußere Energiezufuhr. Im Idealfall ist die Entropie eines adiabaten Vorgangs gleichbleibend, im realen Fall steigt sie wegen unvermeidlicher Verluste. Geringer werden (was z.B. einer Abkühlung unter die Umgebungstemperatur ohne äußere Energiezufuhr entspräche) kann sie auf keinen Fall.

Ein Beispiel für einen Wärme-Kraft-Prozess mit adiabaten Bestandteilen ist der

Carnot-Prozess.

Wärme-Kraft-Prozesse dienen dazu, aus Wärmeenergie nutzbare mechanische Arbeit bereitzustellen. Dazu verwendet man Wärme-Antriebsanlagen, zu denen auch die Hauptkomponenten (Kessel, Turbinen) thermischer Kraftwerke zur Stromerzeugung gehören. Der theoretischen Umwandlung und der technischen Realisierung liegen - Kreisprozesse zugrunde, die mit Hilfe eines flüssigen Arbeitsmediums (z.B. Wasser) durchgeführt werden, das zum großen Teil in einen gas- oder dampfförmigen Zustand umgewandelt werden muss.

Ein wichtiger Prozess ist der Carnot-Prozess. Im idealen Fall ist er ein verlustfreier Kreisprozess mit zwei isentropen (d.h. ohne Entropieänderung) und zwei isothermen Zustandsänderungen, der im Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Er ist damit ein reversibler Prozess und besteht aus vier Teilprozessen:

- der adiabaten Verdichtung (1-2), ohne äußere Energiezufuhr, bei der durch Verringerung des Volumens sich die Temperatur des Arbeitsmediums auf einen Maximalwert erhöht,
- der isothermen Entspannung (2-3), bei der sich durch äußere Energiezufuhr q_m die Entropie und damit die innere Energie und das Volumen erhöht,
- der adiabaten Entspannung (3-4), bei der sich ohne Energieaustausch das Volumen weiter erhöht und die Temperatur absinkt,
- der isothermen Verdichtung (4-1), in der Nutzenergie abgegeben wird. Die innere Energie (Entropie) sinkt damit, und wegen der gleichbleibenden Temperatur zieht sich das Arbeitsmedium auf ein kleineres Volumen zusammen.

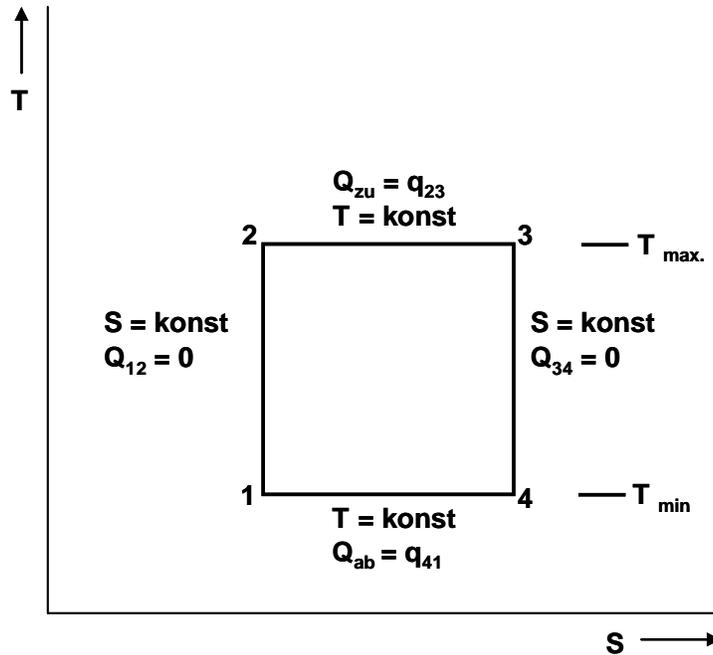


Abb. 23: Carnot-Prozess

Die dem Kreisprozess als Wärme zugeführte Energie wird nur zu einem Teil in Nutzarbeit umgewandelt, ein Teil muss wiederum als Wärme an die Umgebung abgeführt werden. Dies wird besonders anschaulich, wenn man den Carnot-Prozess im T-s-Diagramm des Arbeitsmittels (Bild 23) darstellt. Die Zustandslinien der vier Teilprozesse schließen ein Rechteck ein. Die Fläche unter der oberen Isotherme T_{\max} stellt die zugeführte Wärme

$$q_{\text{rev}} = (q_{23})_{\text{rev}} = \int_2^3 T ds = T_{\max} (s_2 - s_3)$$

dar.

Die Fläche unter der unteren Isotherme T_{\min} , bedeutet die abgegebene Wärme

$$(q_0)_{\text{rev}} = (q_{41})_{\text{rev}} = \int_4^1 T dS = T_{\min} (s_1 - s_4) = -T_{\min} (s_3 - s_2)$$

Die Nutzarbeit des Carnot-Prozesses wird nach dem 1. Hauptsatz für Kreisprozesse

$$-(w_t)_{\text{rev}} = q_{\text{rev}} - |(q_0)_{\text{rev}}|,$$

die durch die von den Zustandslinien eingeschlossene Rechteckfläche dargestellt.

Man kennzeichnet den in Arbeit umgewandelten Teil der zugeführten Wärme durch den thermischen Wirkungsgrad des Kreisprozesses.

Er ist als das Verhältnis der gewonnenen Nutzarbeit ($-w_t$) zur zugeführten Wärme definiert

$$\eta_{\text{th}} = -w_t / q$$

und hängt bei einem reversiblen Carnot-Prozess nur von den beiden Temperaturen T_{\max} und T_{\min} ab.

$$\eta_{\text{th}} = \eta_{\text{C}} = (-w_t)_{\text{rev}} / q_{\text{rev}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

Der thermische Carnot-Wirkungsgrad η_{C} kann den Wert eins nie erreichen, denn die Temperatur T_{\min} , der Wärmeabgabe kann nicht unter die Umgebungstemperatur $T_u \cong 290 \text{ K}$ sinken. Obwohl der Carnot-Prozess reversibel ist, gelingt es nicht, die dem Kreisprozess als Wärme zugeführte Energie vollständig in Arbeit umzusetzen.

Der Carnot-Prozess erreicht von allen thermischen Kreisprozessen den

höchstmöglichen thermischen Wirkungsgrad zwischen gegebenen Temperaturgrenzen (T_{\min} , und T_{\max}) und wird deshalb oft zur Beurteilung der Güte anderer Kreisprozesse benutzt, obwohl er in der Praxis kaum durchführbar ist.¹⁸

Exergie und Energie

Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik gibt es also zwei Energieklassen: Energien, die sich in jede andere Energieform umwandeln lassen, deren Transformierbarkeit durch den 2. Hauptsatz also nicht eingeschränkt wird, und Energien, die nur in beschränktem Maße umwandelbar sind. Zu den unbeschränkt umwandelbaren Energien gehören die mechanischen **Energieformen und die elektrische Energie**. **Die nur** beschränkt umwandelbaren Energien sind die innere Energie und die Energie, die als Wärme die Systemgrenze überschreitet. Die unbeschränkt umwandelbaren Energieformen sind, wie noch genauer ausgeführt werden wird, technisch und wirtschaftlich wichtiger und wertvoller als die Energieformen, deren Umwandelbarkeit der 2. Hauptsatz empfindlich beschneidet. Alle unbeschränkt umwandelbaren Energien, deren Umwandlung in jede andere Energieform nach dem zweiten Hauptsatz gestattet ist, werden mit dem Begriff „Exergie“ zusammengefasst.

Der Einfluss der Umgebung auf die Energieumwandlungen

Die Umwandlung von Wärme in Arbeit beim Carnot-Prozess und die Umwandlung von innerer Energie in Arbeit sind Beispiele dafür, dass die Verwandlung beschränkt umwandelbarer Energien in Exergie nicht nur von der Energieform selbst und von deren Eigenschaften des Energieträgers abhängt: Die Umsetzung der beschränkt umwandelbaren Energien in Exergie wird auch von den Eigenschaften der Umgebung beeinflusst. Beim Carnot-Prozess muss die Abwärme q_0 an einen Energiespeicher möglichst niedriger Temperatur T_{\min} abgegeben werden. Dies ist aber unter irdischen Bedingungen die „Umgebung“, nämlich die Atmosphäre oder das Kühlwasser aus

¹⁸ Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 15. korrigierte und ergänzte Auflage. Springer-Verlag 1983

einem Fluss oder See. T_{\min} kann also nicht niedriger als die Umgebungstemperatur T_u sein. Bei der Umwandlung der inneren Energie eines geschlossenen adiabaten Systems ist es der Umgebungsdruck p_u , welcher der Expansion des Systems eine Grenze setzt, so dass seine innere Energie unter irdischen Bedingungen nicht beliebig verkleinert werden kann.

Umkehrschluss:

Es ist unmöglich, die in der Umgebung gespeicherte innere Energie durch eine Wärmekraftmaschine in Arbeit zu verwandeln. Eine solche Maschine hat Wilhelm Ostwald als perpetuum mobile 2. Art bezeichnet. Es widerspricht nicht dem 1. Hauptsatz - eine derartige Maschine würde perpetuum mobile 1. Art genannt -, verstößt aber gegen den 2. Hauptsatz. Die innere Energie der Umgebung lässt sich somit nicht in Exergie, also in unbeschränkt umwandelbare Energie transformieren. Die Umgebung ist zwar ein Energiespeicher riesigen Ausmaßes, aber sie enthält nur Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt.

Die innere Energie der Umgebung und die Energie, die als Wärme bei Umgebungstemperatur von der Umgebung aufgenommen oder abgegeben wird, haben ihre Umwandlungsfähigkeit in Exergie vollständig verloren.

Definition:

- **Exergie** ist Energie, die sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform umwandeln lässt.
- **Anergie** ist Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt.

- **Energie:**

Jede Energie besteht aus Exergie und Anergie, wobei einer der beiden Anteile auch Null sein kann

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Der 1. Hauptsatz in seiner Formulierung als Erhaltungssatz der Energie macht dann die Aussage:

Bei allen Prozessen bleibt die Summe aus Exergie und Anergie konstant.

Die gilt wohlgermerkt nur für die Summe aus Exergie und Anergie, nicht jedoch für Exergie und Anergie allein. Über das Verhalten von Exergie und Anergie bei reversiblen und irreversiblen Prozessen gelten vielmehr folgende allgemeingültige Aussagen des 2. Hauptsatzes:

1. Bei allen irreversiblen Prozessen verwandelt sich Exergie in Anergie
2. Nur bei reversiblen Prozessen bleibt die Exergie konstant.
3. Es ist unmöglich, Anergie in Exergie zu verwandeln.

Exergie und Anergie der Wärme und die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit

Um die Größen Exergie und Anergie anwenden zu können, muss man die Exergie- und Anergie-Anteile der verschiedenen Energieformen kennen. Es ist bereits bekannt, dass die elektrische Energie und die unbeschränkt umwandelbaren mechanischen Energieformen nur aus Exergie bestehen. Von den beschränkt umwandelbaren Energieformen berechnet man den Exergie- und Anergie-Anteil der Wärme sowie die Exergie und Anergie der Energie, die von einem Stoffstrom als Energieträger mitgeführt wird.

Die Exergie der Wärme ist der Teil der Wärme, der sich in jede andere Energieform, also auch in Nutzarbeit umwandeln lässt. Um sie zu berechnen, denkt man sich die

Wärme einer Kraftmaschine zugeführt, deren Arbeitsmedium einen Kreisprozess durchläuft. Die Exergie der Wärme erhält man als die Nutzarbeit, ihre Anergie als die Abwärme des Kreisprozesses. Die Nutzarbeit des Kreisprozesses stimmt jedoch nur dann mit der Exergie der zugeführten Wärme überein, wenn

1. der Kreisprozess reversibel ausgeführt wird (anderenfalls verwandelt sich die Exergie in Anergie, und die Nutzarbeit ist kleiner als die zugeführte Exergie) und wenn
2. die Abwärme des Kreisprozesses nur bei der Umgebungstemperatur T_u abgegeben wird, so dass sie nur aus Anergie besteht und genau der Anergie der zugeführten Wärme entspricht.

Man bezeichnet den Exergieanteil der Wärme dQ mit dE_Q , ihren Anergieanteil mit dB_Q , so dass

$$dQ = dE_Q + dB_Q$$

gilt.

Ebenso wie Q_{12} sind $(E_Q)_{12}$ und $(B_Q)_{12}$ Prozessgrößen und keine Zustandsgrößen. Exergie und Anergie der Wärme hängen außer von T_u vor allem davon ab, wie groß die Temperatur T des Systems ist, das die Wärme aufnimmt oder abgibt. Der auftretende Faktor

$$\mu_c = 1 - \frac{T_u}{T}$$

stimmt mit dem Wirkungsgrad eines Carnot-Prozesses überein, der zwischen den Temperaturen T und T_u verläuft.

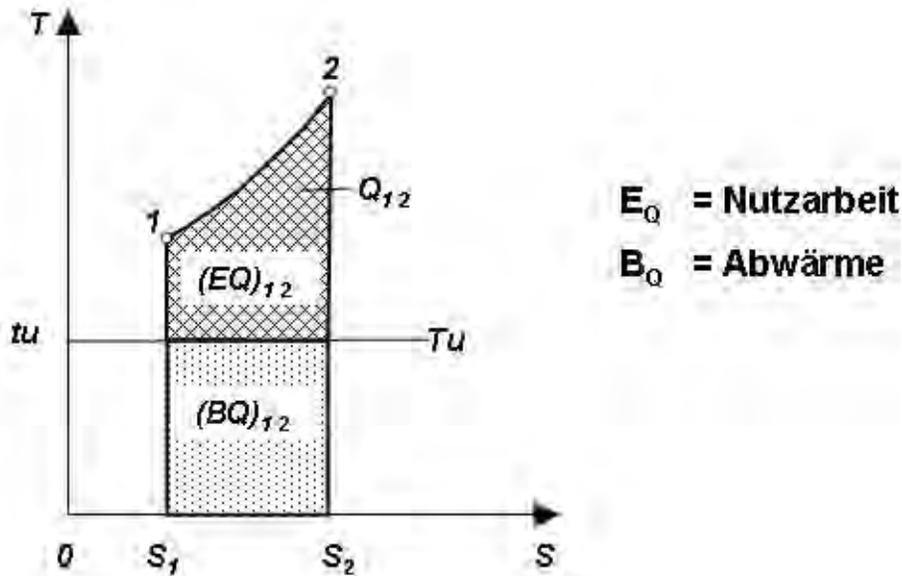


Abb. 24: Veranschaulichung der Exergie und Anergie der Wärme Q_{12} im T-S- Diagramm des Energieträgers. Es gilt: $Q_{12} = (E_Q)_{12} + (B_Q)_{12}$

Man bezeichnet daher η_c als Carnot-Faktor und erhält das Ergebnis: Die Exergie der Wärme ist die mit dem Carnot-Faktor multiplizierte Wärme. Der Carnot-Faktor und damit die Exergie der Wärme sind umso größer, je höher die Temperatur T und je niedriger die Umgebungstemperatur T_u sind. Dies zeigt auch Tabelle 1, die Werte von η_c für verschiedene Celsius temperaturen t und t_u enthält.

Tabelle 1: Werte des Carnot-Faktors $\eta_c = 1 - T_u/T$ für Celsius temperaturen t und t_u

T_u	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C
0°C	0,2680	0,4227	0,5234	0,5942	0,6467	0,6872	0,7455	0,7855	0,8146
20°C	0,2144	0,3804	0,4885	0,5645	0,6208	0,6643	0,7268	0,7697	0,8010
40°C	0,1608	0,3382	0,4536	0,5348	0,5950	0,6414	0,7082	0,7682	0,7874
60°C	0,1072	0,2959	0,4187	0,5051	0,5691	0,6185	0,6896	0,7496	0,7739

3.2.2 Dampfkraftwerke

In den meisten größeren Kraftwerksanlagen ist zwischen der Feuerung und der Turbine zur Übertragung der Wärmeenergie eine weitere Stufe zwischengeschaltet: Der **Dampfkreislauf**. Das bedeutet, dass die durch das Verbrennen des Brennstoffs freigesetzte Wärmeenergie zunächst einen Wärmeträger, meistens Wasser, in einem **Kessel (Dampferzeuger)** erhitzt und verdampft. Der Dampf wird mit hohem Druck (bei modernen Anlagen bis 115 bar) und hoher Temperatur (bis 535 °C) in die **Dampfturbinen** eingeleitet, die dadurch in eine Drehbewegung versetzt werden. Der Dampf gibt also seine Energie durch die Drehung an der Dampfturbine ab, der Druck und die Temperatur werden dadurch gesenkt. In der letzten Stufe wird dem Dampf im Kondensator soviel Wärmeenergie entzogen, dass er wieder zu Wasser kondensiert. Das Wasser (Kondensat) wird über die **Speisepumpe** dem Dampfkreislauf wieder zugeführt, wo es im Kessel erneut erhitzt und verdampft wird.

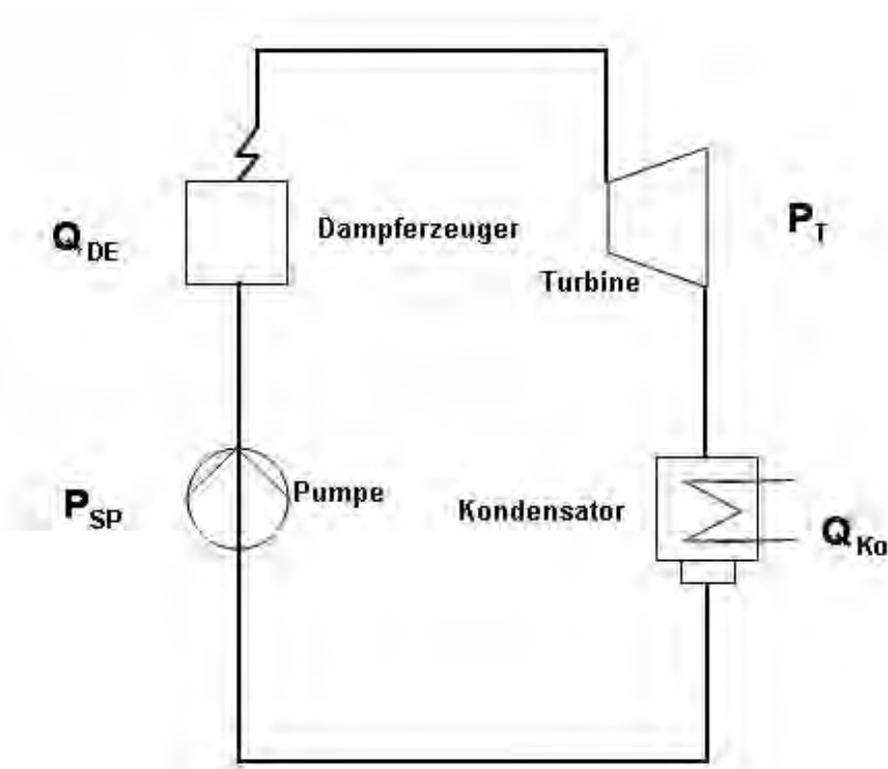


Abb. 25: Schaltplan einer einfachen Kondensations-Dampfturbinenanlage

Kraftwerke mit Dampfkreisläufen heißen Dampfkraftwerke. Nach diesem Prinzip sind die meisten der gegenwärtigen großen Kraftwerke aufgebaut. Dampfkraftwerke werden mit den Brennstoffen Stein- und Braunkohle, Öl und Kernspaltmaterial betrieben.

Kraftwerkswirkungsgrade¹⁹:

Allgemein ist der Gesamtwirkungsgrad eines Wärmekraftwerks

$$\eta = \frac{-P}{\dot{m}_B H_u} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_B H_u} \frac{-P}{\dot{Q}} = \eta_K \eta_{th}$$

der die Nutzleistung P (mechanische Turbinen-Wellenleistung) des Kraftwerks mit der zugeführten Brennstoffleistung $\dot{m}_B H_u$ vergleicht. \dot{m}_B ist der Massenstrom, H_u der untere Heizwert des eingesetzten Brennstoffs, und \dot{Q} der Wärmestrom, den das Arbeitsfluid der Wärmekraftmaschine (z.B. eine Dampfturbine) empfängt.

Der Dampferzeuger- oder Kesselwirkungsgrad η_K liegt bei großen Kohlekraftwerken über 0,92. Der thermische Wirkungsgrad η_{th} , wird durch den 2. Hauptsatz begrenzt; für den idealen Fall, dass der Wärmekraftprozess reversibel ist (keine Entropieänderung) ist der thermische Wirkungsgrad gleich dem Carnot-Faktor, so dass gilt:

$$\eta_{th} = \frac{-P}{\dot{Q}} = 1 - \frac{T_0}{T_m}$$

Der thermische Wirkungsgrad hängt von der mittleren Temperatur T_m , bei der das Arbeitsmedium (Dampf) die Wärme aufnimmt, und von der Temperatur T_0 , bei der es die Abwärme abgibt, ab.

Allerdings ist der Prozess nicht reversibel, und damit ist der thermodynamische 2. Hauptsatz nicht korrekt berücksichtigt. Der mit der Primärenergie eingebrachte

¹⁹ H.-D. Baehr: Thermodynamik, 6. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg. New York, London, Paris Tokyo 1988

Exergiestrom $\dot{m}_B e_B$ verringert sich durch den großen Exergieverlust bei der Verbrennung, was in Bild 26 durch A symbolisiert ist. Im Dampferzeuger gibt das Verbrennungsgas den Wärmestrom Q mit dem Exergiestrom

$$\dot{E}_Q^* = \eta_c^* \dot{Q}, \text{ mit } \mu_c^* = 1 - \frac{T_u}{T_m^*}$$

ab.

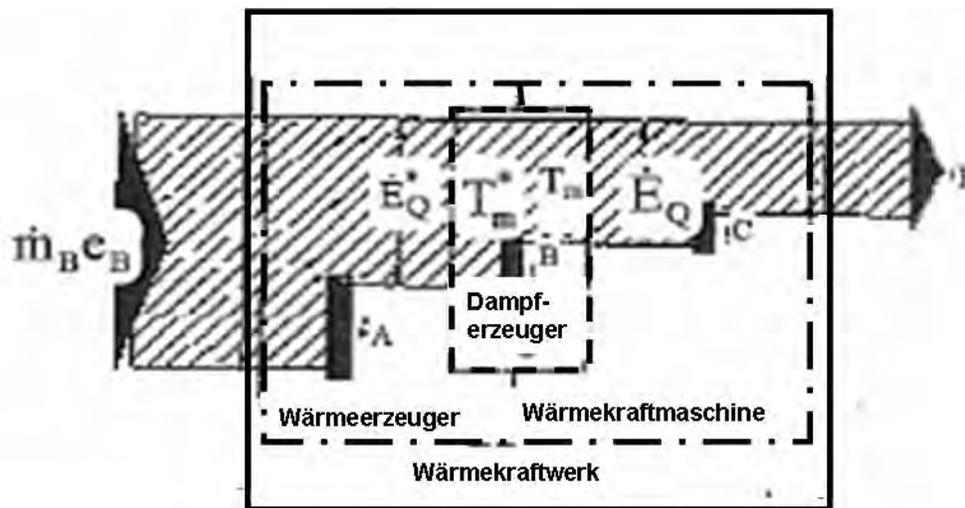


Abb. 26: Schema des Exergieflusses in einem Wärmekraftwerk

Exergieverluste

A bei der Verbrennung,

B beim Wärmeübergang im Dampferzeuger,

C in der Wärmekraftmaschine

Hierbei ist T_m^* , die thermodynamische Mitteltemperatur des Verbrennungsgases im Dampferzeuger. Da zum Wärmeübergang zwischen Verbrennungsgas und Arbeitsdampf des Wärmekraftwerks am Wärmetauscher ein Temperaturunterschied vorhanden sein muss, empfängt der Wärmekraftmaschine (Dampfturbine) zwar den selben Wärmestrom Q , aber bei einer niedrigeren thermodynamischen mittleren Temperatur

$T_m < T_m^*$. Somit ist der von der Dampfturbine aufgenommene Exergiestrom

$$\dot{E}_Q = \eta_c \dot{Q}, \text{ mit } \mu_c = 1 - \frac{T_u}{T_m}$$

wegen des Exergieverlustes im Dampferzeuger kleiner als bzw. B in Abb. Schema 26.

Der Exergieverlust von E_Q auf E_Q im Dampferzeuger wird auch durch den Temperaturverlauf des Arbeitsfluids in der Wärmekraftmaschine (Dampfturbine) bestimmt. Er kann also nicht einem der beiden Teilsysteme (Wärmeerzeuger und Wärmekraftmaschine) allein zugeordnet werden, sondern wird durch die Prozessführung in beiden Systemen „verschuldet“. Dagegen sind die in der Wärmekraftmaschine auftretenden Exergieverluste, C in Bild 26, allein diesem Teilsystem zuzurechnen.

Man definiert nun drei exergetische Wirkungsgrade, um die drei in Bild 26 durch A, B und C symbolisierten Exergieverluste zu erfassen. Es sind dies der exergetische Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers

$$\zeta_{WE} := \frac{\dot{E}_Q^*}{\dot{m}_B e_B} = \frac{\dot{E}_Q^*}{\dot{Q}} \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_B H_u} \frac{H_u}{e_B} = \eta_c^* \eta_K \frac{H_u}{e_B},$$

der Wirkungsgrad des Dampferzeugers

$$\zeta_{DE} := \frac{\dot{E}_Q}{\dot{E}_Q^*} = \frac{\eta_c}{\eta_c^*}$$

und der exergetische Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine

$$\zeta_{WKM} := \frac{-P}{\dot{E}_Q} = \frac{-P}{\dot{Q}} \frac{\dot{Q}}{\dot{E}_Q} = \frac{\eta_{th}}{\eta_c},$$

wobei η_{th} der anfangs definierte thermische Wirkungsgrad für reversible Prozesse ist.

Das Produkt der drei Wirkungsgrade ergibt den exergetischen Gesamtwirkungsgrad

$$\zeta = \frac{-P}{\dot{m}_B e_B} = \zeta_{WE} \zeta_{DE} \zeta_{WKM}$$

des thermischen Kraftwerks. Jeder dieser Wirkungsgrade würde den Idealwert eins erreichen, wenn die Prozesse in dem betreffenden Teilsystem reversibel abließen.

Ein Ziel der technischen Entwicklung thermischer Kraftwerke war und ist die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades

$$\eta = \zeta \frac{e_B}{H_u}$$

durch das Verringern von Exergieverlusten.

Exergiediagramm einer einfachen Dampfkraftanlage

Wie gezeigt, treten bei einer einfachen Dampfkraftanlage große Exergieverluste bei der Verbrennung und beim Wärmeübergang vom Verbrennungsgas zum Wasserdampf auf. Diese Verluste erscheinen im Produkt

$$\zeta_{WE} \zeta_{DE} = \eta_C \eta_K \frac{H_u}{e_B}$$

aus dem exergetischen Wirkungsgrad ζ_{WE} des Wärmeerzeugers (Feuerung) und ζ_{DE} des Dampferzeugers (Wärmeübergang).

Bei der Dampferzeugung tritt das Arbeitsmedium vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über, so dass nicht mehr der Carnot-Prozess als Vergleichsprozess gelten

kann, da er nur für Gase gilt. Die Änderung des Aggregatzustandes wird im **Clausius-Rankine-Prozess** berücksichtigt. Auch für diesen Prozess lässt sich, analog zu Bild 24, ein T-S-Diagramm angeben.

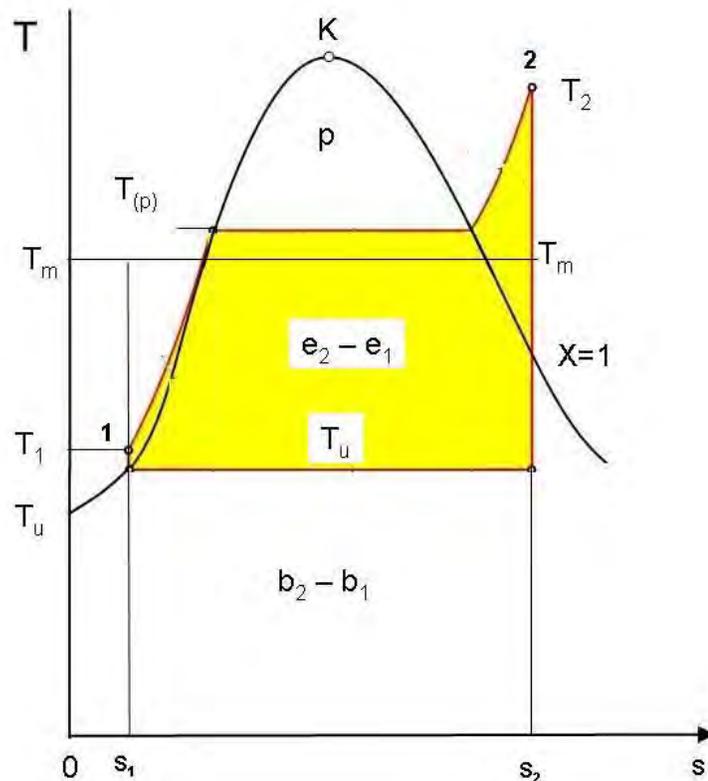


Abb. 27: Einfacher Dampfprozess (Clausius-Rankine-Prozess) im T-S-Diagramm
Exergiezunahme $e_2 - e_1$ und Anergiezunahme $b_2 - b_1$

Im Gegensatz zum Carnot-Prozess wird die Energie nicht bei gleichbleibender Temperatur dem Prozess zugeführt, sondern das Arbeitsmedium wird bei der Energieübertragung erwärmt. Dabei bleibt der Druck im Dampferzeuger (der Kesseldruck) annähernd konstant - der Druckabfall beim Durchströmen des Dampferzeugers wird vernachlässigt. Dadurch treten neben den isentropen Zustandsänderungen **isobare Zustandsänderungen** auf.

- Das Kesselwasser wird zunächst bis zur Siedetemperatur $T=T(p)$ erwärmt, die vom Kesseldruck abhängig ist.
- Während des Verdampfens nimmt das Arbeitsmedium Energie auf („Verdampfungsenthalpie“), wobei die Temperatur auf dem Siedepunkt verharrt (waagerechte Linie). K bedeutet der kritische Punkt, an dem die Dichte von Wasser und Wasserdampf gleich wird und der Unterschied zwischen der dampfförmigen und der flüssigen Phase verschwindet.
Dieser Punkt liegt bei $p_k = 220,45 \text{ bar}$, $t_k = 373,86 \text{ °C}$ und der kritischen Dichte $v_k = 0,00311 \text{ m}^3/\text{kg}$.
- Nach dem vollständigen Verdampfen wird der Arbeitsdampf bis auf die „Frischdampftemperatur“ T_2 überhitzt.
- Der überhitzte Dampf wird in der Turbine bis in den Nassdampfbereich entspannt (isentropische Expansion).
- Unter Wärmeabgabe wird der aus der Turbine austretende Dampf im Kondensator isobar und isotherm kondensiert. Dabei wird Wärme an das Kühlwasser abgegeben.
- Zum Schließen des Kreises wird das Kondensat wieder auf Kesseldruck gebracht.

Der exergetische Wirkungsgrad des Prozesses hängt vom Carnot-Faktor η_c und damit von der thermodynamischen Mitteltemperatur T_m ab sowie der Umgebungstemperatur T_u ab. Die thermodynamische Mitteltemperatur

$$T_m = \frac{Q_{12}}{s_2 - s_1}$$

muss möglichst hoch werden, um hohe exergetische Wirkungsgrade

$$\zeta_{WE} \zeta_{DE} = \left(1 - \frac{T_u}{T_m}\right) \eta_K \frac{H_u}{e_B}$$

zu erreichen. Da die Speisewassertemperatur (T_1 in Bild 27) festliegt - sie ist nur wenig größer als die Kondensationstemperatur $T_0 \approx T_u$ -, gibt es zwei Möglichkeiten, um T_m zu vergrößern:

Die Steigerung der Frischdampf­temperatur T_2 und das Anheben des ganzen Temperaturniveaus durch Erhöhen des Kesseldrucks p .

Die Frischdampf­temperatur T_2 wird durch die Werkstoffe des Dampferzeugers begrenzt. Bei Verwendung von ferritischem Stahl liegt die obere Grenze bei $t_2 = 565^\circ\text{C}$. Setzt man den wesentlich teureren austenitischen Stahl ein, so lässt sich t_2 auf 600°C und auch darüber steigern. Dieser Weg wurde in verschiedenen Anlagen beschr­itten, doch haben sich dabei keine wirtschaftlichen Vorteile ergeben, so dass man heute meistens höchste Frischdampf­temperaturen von 525 bis 550°C antrifft.

Bei festen Werten von T_1 und T_2 lässt sich T_m durch Erhöhen des Kesseldrucks p steigern, Für jede Frischdampf­temperatur T_2 findet man einen Maximalwert von T_m bei einem optimalen Kesseldruck P_{opt} , der mit größer werdendem T_2 rasch ansteigt. In Tabelle 2 sind diese Optimalwerte und die sich dabei ergebenden Carnot-Faktoren $\eta_c = 1 - (T_u/T_m)$ zusammengestellt.

Tabelle 2:

Optimale Frischdampfdrücke p_{opt} , bei denen die thermodynamische Mitteltemperatur T_m und der Carnot-Faktor $\eta_c = 1 - (T_u/T_m)$ maximale Werte annehmen, in Abhängigkeit von der Frischdampf­temperatur t_2 ($t_1 = 30^\circ\text{C}$, $t_u = 15^\circ\text{C}$)

t_2 in °C	P_{opt} in bar	T_m in K	η_c
400	187,4	522,2	0,448
450	241,9	534,1	0,461
500	303,4	546,0	0,472
550	373,5	558,1	0,484
600	454,7	570,4	0,495
650	549,4	582,9	0,506
700	660,4	595,8	0,516
750	790,8	608,9	0,527
800	942,4	622,1	0,537

Selbst bei diesen hohen Kesseldrücken nehmen der Carnot-Faktor und damit die exergetischen Wirkungsgrade ζ_{WE} , ζ_{DE} überraschend niedrige Werte an. Mit $\eta_K = 0,92$ und $H_u/e_B = 0,95$ ergibt sich z. B. für $t_2 = 550$ °C.

$$\zeta_{\text{WE}} \cdot \zeta_{\text{DE}} = \eta_K \frac{H_u}{e_B} \eta_c = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 0,484 = 0,42.$$

In diesem niedrigen exergetischen Wirkungsgrad kommen die hohen Exergieverluste des Dampferzeugers und der Feuerung zum Ausdruck:

1. der Exergieverlust der Verbrennung (etwa 30%)
2. der Exergieverlust der Wärmeübertragung (etwa 25%)
3. der Exergieverlust durch das Abgas und die Abstrahlung (etwa 5%).

Der Dampferzeuger erweist sich somit als Quelle großer Energieverluste, was im hohen energetischen Kesselwirkungsgrad η_K überhaupt nicht zum Ausdruck kommt. Nicht die in η_K fehlgeleiteten Energien machen den wesentlichen Verlust aus, sondern die irreversiblen Prozesse der Verbrennung und der Wärmeübertragung wandeln etwa

die Hälfte der eingebrachten Brennstoffexergie in Anergie, die für die weiteren Energieumwandlungen **nicht nur verloren geht**, sondern sogar einen **Ballast** darstellt, der schließlich an die Umgebung abgeführt werden muss.

Alle Maßnahmen zur Verbesserung der einfachen Dampfkraftanlage sollten also vor allem die großen Exergieverluste im Dampferzeuger bekämpfen.



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

II. Technik der kommunalen Versorgung

1. Wasserversorgung

- 1.1. Anforderungen an die kommunale Wasserversorgung**
- 1.2. Der Wasserkreislauf**
- 1.3. Gefährdung der Wasserversorgung**
- 1.4. Ökologische Wasserwirtschaft**
- 1.5. Wasserbestandteile und Qualitätsanforderungen**
- 1.6. Wassergewinnung**
- 1.7. Wasseraufbereitung**
- 1.8. Wasserspeicherung und –verteilung**
- 1.9. Wasserverbrauch, Wasserdienste**
- 1.10. Die wichtigsten gesetzlichen Grundlagen**

II. Technik der kommunalen Versorgung

1. Wasserversorgung

1.1 Anforderungen an die kommunale Wasserversorgung

Die Kommunen müssen von den Wasserversorgungsunternehmen für die Deckung des Haushalts- und Industriebedarfs mit Trinkwasser hoher Qualität versorgt werden.

Das Trinkwasser soll

- jederzeit
- in ausreichender Menge
- angenehm im Geschmack
- appetitlich im Aussehen
- in hygienisch einwandfreiem Zustand

zur Verfügung stehen.

Dafür sind folgende Vorgaben vom Versorger zu erfüllen:

- Nach der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) ist das Wasserversorgungsunternehmen verpflichtet, das Wasser unter dem Druck zu liefern, der für eine einwandfreie Deckung des üblichen Bedarfs in dem betreffenden Versorgungsgebiet erforderlich ist⁹.

⁹ ~ J. Mutschmann, F. Stimmelmayer: Taschenbuch der Wasserversorgung, 13. Auflage 2002. Franckh-KosmosVerlag
Stuttgart

- Die Wasserversorgung soll so ausgebaut werden, dass die Deckung des gegenwärtigen und künftigen Bedarfes gesichert ist. Auf einen sparsamen Umgang mit Trink- und Brauchwasser soll hingewirkt werden.
- Für die Trinkwasserversorgung soll vorrangig Grundwasser herangezogen werden.
- Grundwasservorkommen und andere Wasservorkommen, die sich für die Trinkwasserversorgung eignen, sollen durch Schutzmaßnahmen gesichert werden.
- Örtliche Versorgungssysteme sollen errichtet beibehalten und ggf. saniert werden, soweit eine einwandfreie Wasserversorgung mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand gewährleistet werden kann; anderenfalls sollen sie an leistungsfähige Anlagen angeschlossen oder zu Gruppen zusammengefasst werden.

Die einwandfreie Wasserversorgung der Allgemeinheit ist im Allgemeinen nur durch eine öffentliche, zentrale Wasserversorgungsanlage erreichbar. Alle Anwesen einer Kommune haben das Anschlussrecht an die Wasserversorgung, im Allgemeinen aber auch die Anschlusspflicht.

Öffentliche Wasserversorgungen liefern Trinkwasser, dessen zulässige Zusammensetzung und Qualität in der Trinkwasserverordnung festgelegt ist (Kap. 1.5.3).

In Einzelfällen gibt es getrennte Versorgungsnetze für Trinkwasser und Brauchwasser (d.h. Wasser, das keine Trinkwasserqualität besitzt, aber für einen beabsichtigten Zweck den Anforderungen genügt), um den Trinkwasserverbrauch und evt. den Aufbereitungsaufwand einzuschränken.

Doppelte Netze werden jedoch aus seuchenhygienischen und Wirtschaftlichkeitsgründen in der öffentlichen Wasserversorgung nicht eingesetzt: Die Gefahr einer gesundheitlichen Beeinträchtigung bei Verwechslungen der Wasserart ist zu groß, die Kosten für den Unterhalt eines doppelten Netzes zweifacher Ausführung aller Betriebsmittel und Armaturen sowie die verdoppelten Netzverluste sind nicht vertretbar. Daher konzentriert man sich in der kommunalen Wasserversorgung auf den möglichst sparsamen Umgang mit Trinkwasser bei Gewinnung, Verteilung und Verbrauch,

weiterhin auf die Gewährleistung eines möglichst hohen Qualitätsstandards. Die Bemühungen um Verbrauchssenkung sind erfolgreich: Die Wasserabgabe der Saarbrücker Stadtwerke ist in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken¹⁰.

1.2 Der Wasserkreislauf¹¹

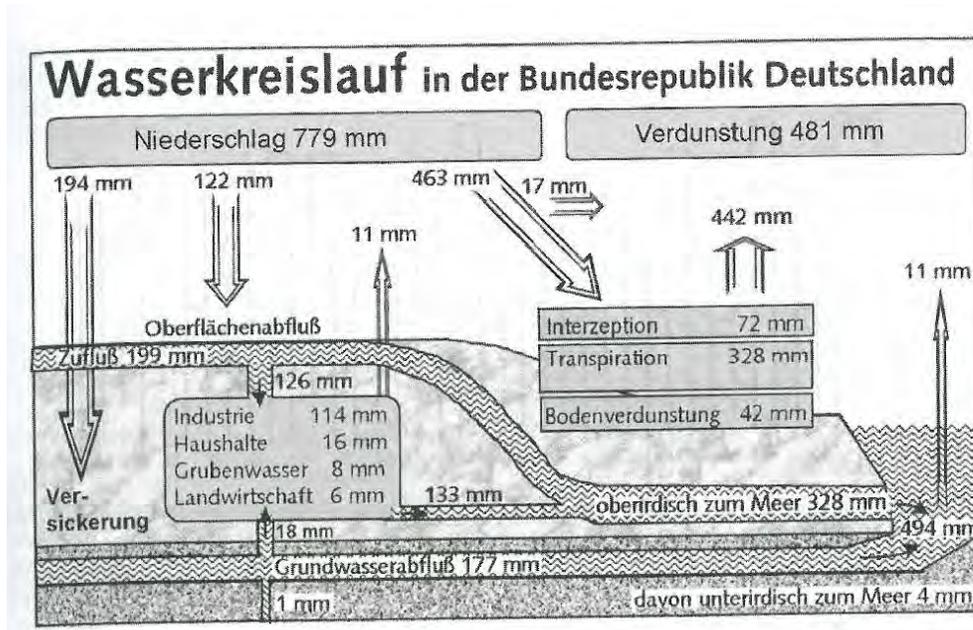


Abb. 10: Wasserbilanz der Bundesrepublik Deutschland 1961 bis 1999
(nach Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie)

1.3 Gefährdungen der Wasserversorgung

Das in der Natur vorkommende Wasser ist kein chemisch reines H₂O. Auf seinem Weg durch die Atmosphäre, durch den Boden und die Wasser führenden Gesteinsschichten nimmt das Wasser Bestandteile auf, die jedem Wasser je nach seiner Herkunft ein bestimmtes, eigenes Gepräge geben. So unterscheiden sich bereits natürliche Grundwässer in Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen ihres Vorkommens außerordentlich stark (Kap. 1.5.1. 1).

¹⁰ Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft Saarbrücken. Geschäftsbericht 1986 - 1995

¹¹ J. Mutschmann, F. Stimmelmayer: Taschenbuch der Wasserversorgung, 13. Auflage 2002. Franckh-KosmosVerlag Stuttgart

Verschmutzungsproblematik

Leider kommen immer häufiger anthropogene Belastungen hinzu, die sich im Oberflächenwasser schon seit langem in dem Gehalt an fäkalischen Keimen, organischen Stoffen aller Art, Nährstoffen u.a. negativ auswirken.

In neuerer Zeit sind darüber hinaus die Belastungen des Grundwassers mit Nitraten, Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln, Chlorkohlenwasserstoffen, aber auch mit Arsen und Aluminium hinzugekommen. Sie stellen viele Wasserversorgungsunternehmen vor Probleme und zwingen sie zu kostenaufwendigen Verfahren.

Die wesentlichen Ursachen für eine Zunahme der Probleme sind:

- Landschaftsverbrauch: Der Boden wird durch Hoch- und Tiefbaumaßnahmen versiegelt.
 - ⇒ Aufkonzentration der Wasserbelastung mit Oberflächenschmutz infolge der kleinen Abflussflächen
- Der natürliche Wasserkreislauf wird gestört: Flussbegradigungen und Kanalisierungen, die die Abflussgeschwindigkeit erhöhen und eine Filterwirkung verhindern
- Gefährliche und nicht abbaubare Schadstoffe, wie CKW, Salzen, und Schwermetallverbindungen, werden eingeleitet.
- Das Grundwasser wird mit Schadstoffen infolge Überdüngung kontaminiert.

1.4 Ökologische Wasserwirtschaft

„Jeder Kubikmeter Wasser, der der Natur entzogen wird, ist ein Eingriff in ein ökologisches Gleichgewichtssystem“ (Saarbrücker Zukunftskonzept Wasser)

- Es gilt zunächst das Vermeidungsprinzip.

- Bei Wasserverbrauch mit unvermeidlichen Belastungen ist durch technische Maßnahmen dafür zu sorgen, dass die Belastungen rückgängig gemacht werden und unbelastetes Wasser in den Kreislauf rückgeführt wird.
- Der Begriff „unbelastetes Wasser“ ist durch Definition von maximalen Inhaltsstoffkonzentrationen gesetzlich geregelt, z.B. der Trinkwasserverordnung.

Verhältnis von **Ökonomie und Ökologie:**

Die steigenden Aufwendungen für die Bereitstellung einwandfreien Trinkwassers erhöhen den Wasserpreis.

Auch technische Maßnahmen zur Wasserreinigung machen die Wassernutzung teurer.

Durch die Vermeidung von Einleitung verschmutzten Wassers in den Kreislauf werden aber gesellschaftliche (volkswirtschaftliche) Kosten wie z.B. gesundheitliche Beeinträchtigungen vermieden.

Vermeidung von Wasserverbrauch (latente Beschaffung) senkt die Wasserkosten und den Reinigungsaufwand.

Betriebswirtschaftlich wird sich ein Gleichgewicht zwischen den Vermeidungskosten (Mehraufwand für Wasser sparende Einrichtungen) und den Wasser-Reinigungskosten einstellen.

1.5 Wasserbestandteile und Qualitätsanforderungen¹²

Inhaltsstoffe natürlicher Wässer (neben H₂O):

- suspendierte Stoffe (größere Partikel) mineralischer Herkunft (Sande, Tone) oder organischer Art (Pflanzenreste, Algen, Bakterien, Urtierchen), können durch Filtration entfernt werden

- kolloide Stoffe (im Bereich des lichtmikroskopischen Auflösungsvermögens): Kieselsäure, Silikate, Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen, organische Stoffe (Huminstoffe), Bakterien. Sie können nicht durch Filterung entfernt werden, sondern müssen durch Flockung (Anlagerung an größere Teilchen) beseitigt werden.

- molekular gelöste Stoffe (≤ 1 nm):
 - Nichtelektrolyte: O₂, N₂, CO₂, H₂S, CH₄ und organische Verbindungen
 - Elektrolyte (vorwiegend aus der Lösung von Kochsalz, Gips und Kohlensäure):
 - * Kationen: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, in geringen Mengen K⁺, Fe⁺, Mn²⁺, NH₄⁺, sowie die toxischen Schwermetalle Pb²⁺, Cd²⁺, Hg²⁺
 - * Anionen: Hydrogencarbonat HCO₃⁻, Chlorid Cl⁻, Sulfat SO₄²⁻, Nitrat NO₃⁻, in geringen Mengen Hydroxid OH⁻, Carbonat CO₃²⁻, Nitrit NO₂⁻, Phosphat PO₄³⁻ Hydrogenphosphat HPO₄³⁻ und Dihydrogenphosphat H₂PO₄⁴⁻

¹² KJ Soin & A. Baur, G. Dietze, W. Müller, D. Weideling: Handbuch It Wassermeister. Oldenbourg Verlag

Zusätzliche Stoffe (Schadstoffe), die die Wasserqualität gefährden:

- Halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW etc.) von Reinigungsmitteln und industriellen Lösungsmitteln
- Nitrat in hohen Konzentrationen aus überhöhter landwirtschaftlicher Düngung. Nitrat kann im menschlichen Körper in Nitrit und weiter in krebserregende Nitrosamine umgewandelt werden.
- Pflanzenschutzmittel, die nicht oder nur unvollständig abgebaut worden sind
- Kontaminationsstoffe (z.B. Benzol, PAK = polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle) aus belasteten Böden

Parameter für die Bestimmung der Wasserqualität

- organoleptische Parameter (Prüfung mit Hilfe der menschlichen Sinne) und ihre Quantifizierungsgrößen:
 - Farbe (Quantifizierung: SAK - spektraler Absorptionskoeffizient bei 436 nm in m^2/m^3)
 - Geschmack
 - Geruch (Quantifizierung: Geruchsschwellenwert)
 - Trübung (Quantifizierung: TE/F - Trübungseinheiten, bezogen auf Formazin)
 - Bodensatz
 - Temperatur in °C
 - elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$
 - pH-Wert
 - zur Erfassung organischer Substanzen: Chemischer Sauerstoff-Bedarf (CSB) in g/m^3
 - zur Erfassung von halogenierten Kohlenwasserstoffen: adsorbierbare organische Kohlenwasserstoffe AOX in g/m^3
 - zur Erfassung von bakteriellen Krankheitserregern: die Koloniezahl für Escherichia coli und coliforme Keime

Grenzwerte für ausreichende Wasserqualität nach der Trinkwasserverordnung:

- Nitrat: 50 mg/l
- Nitrit: 0,1 mg/l
- Quecksilber: 0,001 mg/l
- PAK: 0,0002 mg/l (Summe der 6 wichtigsten Verbindungen)
- Pflanzenschutzmittel: 0,0005 mg/l (Summe)
- Färbung: 0,5 m⁴
- Trübung: 1,5 TE/F
- pH-Wert: zwischen 6,5 und 9,5

Ein weiterer Wasserbeurteilungsparameter ist die Wasserhärte (Summe der Erdalkalien). Es gilt die Formel:

$$\text{Summe Erdalkalien in mol/in}^3 \times 5,6 = \text{Härte in}^\circ\text{dH}$$

Härtebereiche nach dem Waschmittelgesetz:

Härtebereich	Härte in mol/m ³
1	bis 1,5
2	1,5 bis 2,5
3	mehr als 2,5

1.6 Wassergewinnung

Wassergewinnungsstellen:

Nach Möglichkeit werden die benötigten Trinkwassermengen aus unbelasteten Grund- und Oberflächenwasserbrunnen gewonnen.

Allgemein kann das Wasser gewonnen werden aus:

➤ Oberflächenwasser:

offenes Wasser an der Erdoberfläche, aus Flüssen, Bächen, Feuchtgebieten. Oberflächenwasser hat keine lange Verweilzeit im Schadstoff filternden Boden. Deshalb muss Oberflächenwasser in der Regel nachgefiltert werden.

➤ Grundwasser aus Quellen:

Wasser, das durch klüftige oder durchlässige Bodenschichten versickert ist und sich auf einer undurchlässigen Schicht gestaut hat. Dieses Grundwasser tritt bei Quellen an der Oberfläche aus. Eine Quelle wird in der Regel in Schachtbauwerken gefasst, wobei das zuströmende Wasser meist mit Hilfe von Sickerfassungen genutzt und dem Schachtbauwerk zugeführt wird.

➤ Grundwasser aus Brunnen:

Wasser, das nicht an die Oberfläche tritt, sondern durch bauliche Maßnahmen aus dem Boden geholt werden muss.

Flachbrunnen gewinnen das Wasser in der Regel in der Talau. Sie können geschachtet oder gebohrt (als Rohrbrunnen) ausgeführt sein.

Tiefbrunnen nutzen das Grundwasser aus tieferen Schichten (im Saarland bis 500 m) und sind Bohrbrunnen.

Bei artesischen Brunnen ist das Wasser gespannt und tritt von selbst aus dem Schacht oder der Bohrung.

In der Regel muss das Wasser jedoch hoch gepumpt werden.

Diese Brunnen oder Reservoirs sind entweder

- siedlungsnah oder
- weiter entfernt in ländlichen Gegenden gelegen.

Wassereinzugsgebiete und Wasserschutzgebiete:

Das Wasser sammelt sich aus einem Wassereinzugsgebiet um einen Brunnen oder eine Entnahmestelle. Dieses Wassereinzugsgebiet wird auf Antrag von der unteren Wasserbehörde als „Wasserschutzgebiet“ festgesetzt und steht dann unter einem besonderen gesetzlichen Schutz (Wasserhaushaltsgesetz).

Für ein kommunales Versorgungsunternehmen ideal ist die unbelastete Entnahmestelle innerhalb der kommunalen Grenzen. Dafür wird ein flächendeckender und vorsorgender Grundwasserschutz betrieben.

Nach § 19 des Wasserhaushaltsgesetzes sind alle Gebiete mit Grundwasseraufkommen, die der Trinkwassergewinnung dienen, von allen Gefahren freizuhalten. Daher werden Schutzgebiete ausgewiesen. Nach der Wasserschutzgebietsverordnung gliedern sich die Schutzgebiete in drei Zonen:

Zone I: Fassungsbereich

Bereich um die Quelle oder den Brunnen mit ca. 40 bis 50 m Durchmesser. Hier ist alles verboten, was nicht unmittelbar der Wassergewinnung dient (Betreten durch Unbefugte, Verletzung der Bodenschicht, Düngen etc.)

Zone II: Engere Schutzzone

Gebiet, in dem das Grundwasser nach dem Niederschlag die Fassung nach etwa 50 Tagen erreicht. (50 Tage: Lebenserwartung der meisten Bakterien oder Viren). Keine Baumaßnahmen und Aufgrabungen von mehr als 1 m Tiefe, Vermeiden von Tierherden und Menschenansammlungen, eingeschränkte land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung.

Zone III: Weitere Schutzzone

Gesamtes Einzugsgebiet der Wassererfassung. Vermeidung von lang anhaltenden, schwer abbaubaren Verunreinigungen des Grundwassers (Sickerwasser). Fernhalten von chemischen, radioaktiven und konzentrierten biologischen Einflüssen.

Bild 5 zeigt einen Ausschnitt der Wasserschutzonen (blau: Zone II, grün: Zone III) in und um Saarbrücken mit dem Schwerpunkt Scheidter Tal.

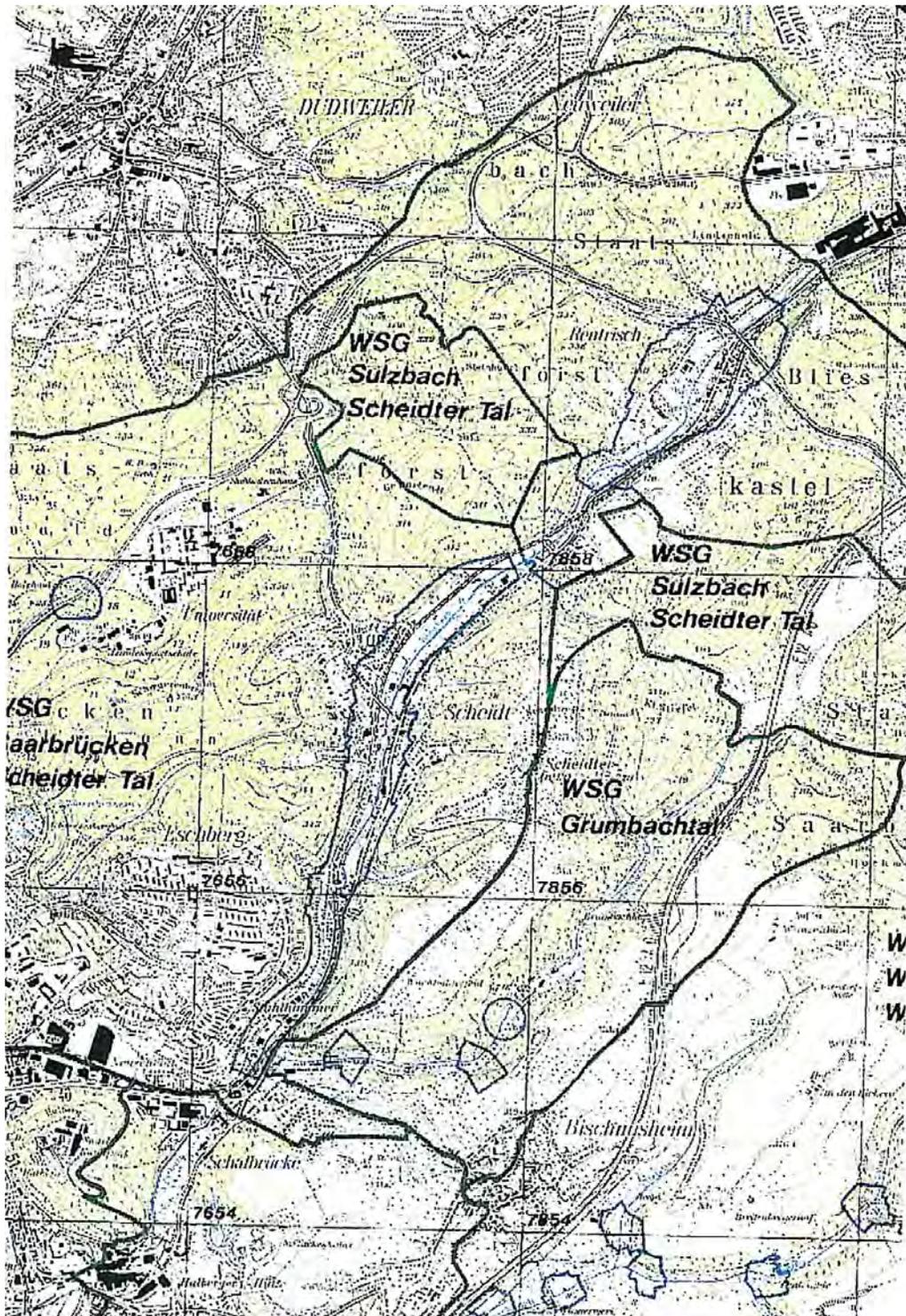


Abb. 11: Wasserschutzonen

1.7 Wasseraufbereitung:

Grundsatz:

Die einwandfreie Qualität des Rohwassers hat absolute Priorität. Keinesfalls kann die Wasseraufbereitungstechnologie das Vorsorgeprinzip im Gewässerschutz ersetzen. Die Aufbereitungstechnik soll nur zurückhaltend und bei Bedarf eingesetzt werden.

Wenn die Menge von Wasser der geforderten Qualität für die Versorgung nicht ausreicht, muss das Versorgungsunternehmen allerdings zu Aufbereitungsmaßnahmen greifen.

Ziele der Wasseraufbereitung:

- Entfernung von Verunreinigungen
- Stabilisierung (Vermeidung einer Qualitätsminderung auf dem Fließweg zum Verbraucher)
- Entfernen von Keimen, Geruch und Geschmack

Verfahrensschritte der Wasseraufbereitung:

- Rechen (bei Oberflächenwassergewinnung)
- Sandfang und Absetzbecken (bei Flusswasser oder bei einigen Quellen)
- Siebe
- Filtration (für die Entfernung sehr feiner Schwebstoffe)
- Flockung (zur Entfernung allerfeinster Teilchen - mineralische Teilchen, Kolloide, Huminstoffe, die nicht durch Filtern zu entfernen sind)
- Fällung (Entfernung gelöster vorliegender Salze wie Phosphate, Calcium, Magnesium)
- Ionenaustausch, zur Entfernung von Chlorid, Sulfat und Nitrationen mit zugegebenen Säuren

- Umkehrosmose, zur Teilentsalzung des Wassers
- Gasaustausch, zur Erhöhung des Sauerstoffanteils und Senkung des Anteils unerwünschter Gase wie Schwefelwasserstoff, Methan oder leichtflüchtiger CKW.
Üblich: Belüftungsverfahren
- Dosieren von Zusatzstoffen
- Adsorption unerwünschter organischer Verunreinigungen an Aktivkohle
- Oxidation zur Entfernung von Eisen und Mangan sowie biologisch abbaubarer Stoffe
- Bestrahlung zur Abtötung von Mikroorganismen
- Biologische Verfahren unter Einsatz von Mikroorganismen
- Mikrofiltration und Membranfiltration

Die Aufbereitung des Wassers wird in den Wasserwerken vorgenommen. Auch hier gilt der Grundsatz: Versorgung aller Bürger mit Trinkwasser höchster Qualität:

- sehr schadstoffarm
- möglichst naturbelassen
- jederzeit in ausreichender Menge

1.8 Wasserspeicherung und -verteilung

Zur kontinuierlichen Versorgung müssen die zeitlichen Schwankungen auf der Liefer- und Verbraucherseite mit Speichern ausgeglichen werden. Für die Pufferung in Speicherräumen müssen hohe Investitionen getätigt werden.

Speicherarten:

- Wasserbehälter in Hochlage zur Druckregelung (Abb. 12)
- Wasserbehälter in Tieflage (zur Mengenspeicherung)
- Durchlaufbehälter (zum Ausgleich der Liefer- und Versorgungsmengen)
- Gegenbehälter (zur Speicherung nicht benötigten Wassers)



Abb. 12: Hochbehälter Gehlenberg

Wasserverteilung:

Die Qualitätskriterien einer hochwertigen Wasserverteilung sind:

- minimale Transportverluste
- störungsfreier Betrieb
- keine Verschlechterung der Wasserqualität während des Transports

Folgende Kriterien müssen bei der Planung von Wasserverteilungssystemen beachtet werden:

- Das Wasser soll nach 7 bis 10 Tagen verbraucht sein, da es sonst aufkeimt
- die Fließgeschwindigkeiten im Ortsnetz sollen 1 m/s nicht überschreiten
- Im Brandfall muss ausreichend Wasser entnommen werden können, ohne dass der Druck in der Leitung übermäßig abfällt.
- Der Fließdruck soll an der höchsten Stelle des Versorgungsgebietes 1 bar nicht unterschreiten (für Hochhäuser sind Sondermaßnahmen erforderlich)

Komponenten:

- Leitungen: Gussrohre, Stahlrohre, Kunststoffrohre werden je nach den Anforderungen an Korrosionsbeständigkeit, Druckstabilität und Verlegbarkeit eingesetzt.
- Pumpstationen: radiale (selten radiale) Kreiselpumpen für die Förderung und Druck-erhöhungsanlagen für die fallweise Anhebung eines zu geringen Betriebsdrucks (Abb. 13)



Abb. 13: Maschinenhalle Wasserwerk Bliestal

Unterhalt und Sanierung des Wasserleitungsnetzes

Mögliche Probleme:

- Inkrustationen: Ablagerung natürlicher Inhaltsstoffe des Wassers (z.B. Eisen, Mangan und Kalk) an den Innenwänden der Wasserleitungsrohre. Bei Veränderung des Gleichgewichts zwischen Kohlensäure und Kalkanteilen können sich die Ablagerungen lösen und das Wasser trüben (Abb. 14).



Abb. 14: Stark verkrustetes Wasserrohr

Abhilfe:

- Spülungen
 - mechanische Rohrreinigung und nachträgliche Mineralstoff-Auskleidung (Bild 9), bei hartnäckigeren Inkrustationen
 - Phosphat-Silikat-Impfung, möglichst niedrig dosiert (z.B. 2 g Phosphat, 4 g Silikat pro m³), als letzte Konsequenz
- Korrosion im Rohr durch sauerstoffarmes oder chlorid- bzw. sulfathaltiges Wasser, führt zu Leckagen

Abhilfe:

- Oxidation, Ionenaustausch mit Hilfe von Kohlensäure
- Bei bleibenden Schäden: Auswechseln älterer Leitungen
- Permanente Rohrnetz-Überwachung zur Vermeidung von Rohrbrüchen und Minimierung von Wasserverlusten

1.9 Wasserverbrauch, Wasserdienste

Pro Person werden im Bundesdurchschnitt in Haushalten 130 l Trinkwasser täglich verbraucht. Wenn man Gewerbe und Industrie dazurechnet, sind es 220 l pro Person.

Der Haushalts-Tagesbedarf von 120 Litern teilt sich auf in

- 35 Liter für die Toilettenspülung
- 35 Liter für Baden und Duschen
- 17 Liter für Wäsche waschen
- 8 Liter für Körperpflege außer Baden und Duschen
- 8 Liter für Geschirrspülen
- 6 Liter für die Gartenpflege
- 3 Liter für Trinken und Kochen
- 3 für die Autopflege
- 5 Liter für sonstiges

Niedriger Wasserbrauch sichert kurz- und langfristig die Ressourcen an einwandfreiem Trinkwasser. Der rückläufige Wasserverbrauch in Saarbrücken ist eine Folge des „Saarbrücker Zukunftskonzeptes Wasser“.

Elemente des „Saarbrücker Zukunftskonzeptes Wasser“:

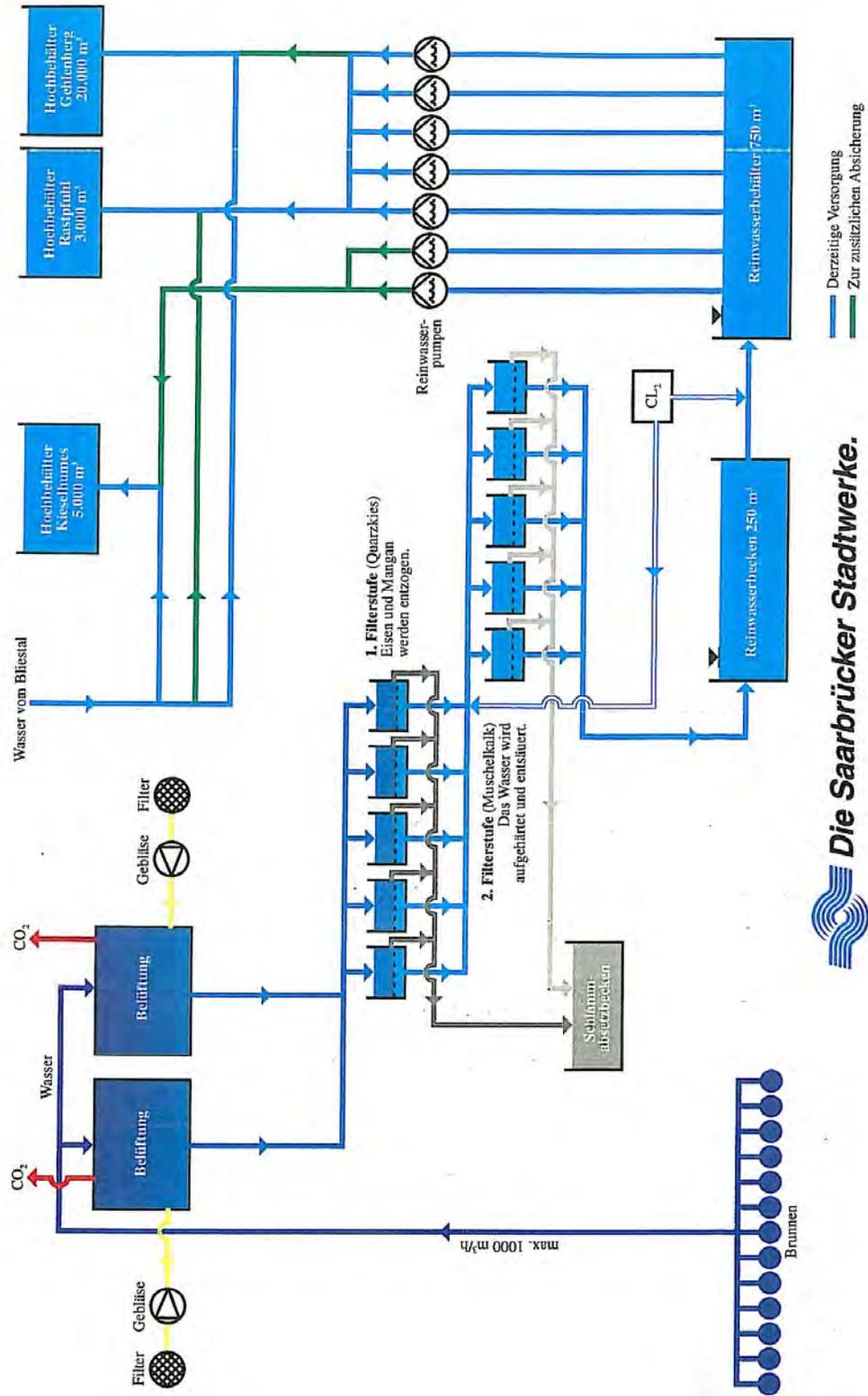
- Latente Beschaffung: Einsparen von Wasserverbrauch durch
 - rationelle Wassernutzung
 - Wasser-Mehrfachnutzung (Brauchwasser-Kreisläufe im Hausbereich, nicht im Verteilungsbereich! siehe Kapitel 1.1)
 - Nutzung von Oberflächenwasser statt hochwertigem Grundwasser in der Industrie
- Wasserdienste: Aktionen und Angebote für Gewerbe und Privathaushalte zur Unterstützung der latenten Beschaffung. Elemente der Wasserdienste:

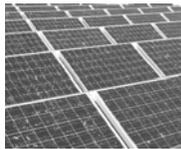
- Informationsdienste:
- Wasserkarte mit Angabe des Härtegrades, Trinkwasser-Analysen, Wasser-Direkt-Service, Informationen über Regenwasser-Anlagen etc.
- Beratungsdienste:
- Beratung von Fachleuten im Info-Center (Haus der Zukunft)
- Installationshilfen:
- Marktübersicht und Beratung für Toiletten-Spar-Spülsysteme, Einhandmischbatterien und Durchflussmengenbegrenzer
- Finanzierungshilfen:
- zinsgünstige Darlehen für sinnvolle Investitionen zum Wassersparen

1.10 Die wichtigsten gesetzlichen Grundlagen

- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz .WHG)
- die Wassergesetze (WG) der Bundesländer
- Bundesseuchengesetz
- Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz (LMBG)
- Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (TrinkwV.)
- Trinkwasser-Aufbereitungs-Verordnung
- Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (Waschmittelgesetz)

VOM ROHWASSER ZUM TRINKWASSER.





Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

III. Technik der kommunalen Entsorgung

1. Abwasserentsorgung und -reinigung

1.1 Abwasserarten und -sammlung

1.2 Aufbau und Funktion einer konventionellen kommunalen Kläranlage (KKA)

1.3 Alternativen im ländlichen Bereich

1.4 Klärschlamm

1.5 Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer

2. Abfallentsorgung

2.1 Hausmüllentsorgung

2.2 Entsorgung von organischen Abfällen und Bioabfällen

2.3 Sonderabfall-Entsorgungssysteme

3. Recyclingtechnologien

3.1 Sammel-, Trenn- und Verwertungssysteme

3.2 Recycling von Bauabfällen

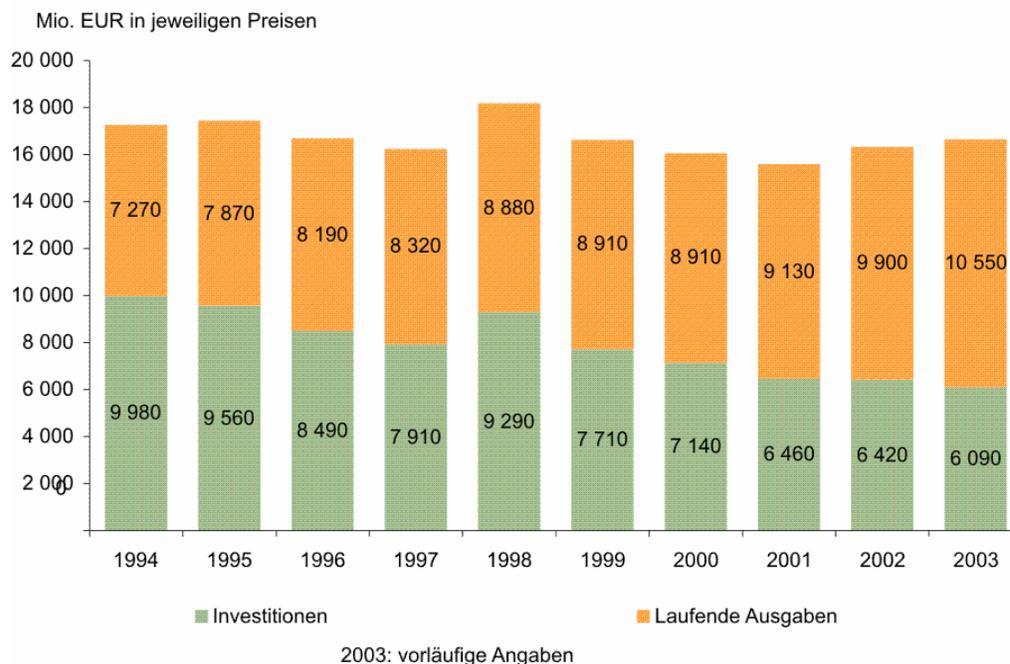
3.3 Altlastensanierung und Flächenrecycling

III. Technik der kommunalen Entsorgung

1. Abwasserentsorgung und -reinigung

Die Abwasserentsorgung und –reinigung ist mit erheblichen Investitionen und Aufwandskosten verbunden.

Geschätzte Investitionen für den Gewässerschutz in Deutschland:



Quelle: Statistisches Bundesamt, Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge

Länge und Sanierungskosten der Sammler und Kanalisationsnetze (EVS und Kommunen) im Saarland:

Öffentl. Kanalnetz (Kommunen)	ca. 4.300 km
Öffentl. Kanalnetz (AVS)	ca. 700 km
Hausanschluss- und Grundleitungen	ca. 10.000 km
Gesamtlänge	ca. 15.000 km

Sanierungsbedürftig: ca. 20% (Annahme aufgrund stichprobenartiger Untersuchungen in der BRD; im Saarland möglicherweise höher)

Sanierungskosten: ca. 600 €/lfd. Meter

1.1 Abwasserarten und -sammlung

Die öffentlichen Kanalisationen sind in erster Linie zur Entwässerung der Privathaushalte installiert, um diese Abwässer einer zentralen Reinigung zuzuführen, sie werden aber auch von gewerblichen Indirekteinleitern zum Abführen ihrer Abwässer benutzt. Deren Belastungen unterscheiden sich z. T. stark von denen der Haushaltsabwässer.

Bei der Abwassererfassung muss unterschieden werden, ob die Niederschlagswässer in einer Mischkanalisation gleichzeitig mit den häuslich-industriellen Abwässern erfasst oder ob die Niederschlagswässer in Trennkanalisation separat aufgefangen werden.

Mischkanalisation

Die alten Kanalisationssysteme bestehen fast ausschließlich aus Mischwassererfassung. Damit ist der Abwasseranfall in der kommunalen Kläranlage (KKA) den niederschlagsbedingten Schwankungen unterworfen. Bei besonders ergiebigen Regenereignissen kurz und heftig oder lang andauernd, können Kanalisation und Kläranlage hydraulisch überfordert sein. KKA mit Mischkanalisation haben deswegen i. d. R. Möglichkeiten, bei starken Regenfällen einen Teil des Wassers in Regenrückhaltebecken zu puffern und nach Ende des Regenereignisses (oder Tauprozesses) allmählich abzuarbeiten.

Trennkanalisation

In Neubaugebieten ist man inzwischen weitgehend zur Trennkanalisation übergegangen. Die Niederschlagswässer werden in einer zweiten Kanalisation getrennt von den Abwässern abgeführt. Dadurch ist die KKA entlastet und kann sich auf einen niederschlagsunabhängigen Abwasserstrom einstellen. Die Niederschlagswässer werden direkt in die Vorfluter eingeleitet, ggf. nach mechanischer Reinigung. Auch bei der Sanierung alter Mischsysteme versucht man zunehmend Oberflächenwässer und sogen. „Fremdwässer“ (Quellen, Entwässerungsgräben) aus dem Kanalsystem herauszunehmen.

1.2 Aufbau und Funktion einer konventionellen kommunalen Kläranlage (KKA)

Entsprechend der Verschiedenheit der im Abwasser enthaltenen Schmutzstoffe (grobe Feststoffe, absetzbare Stoffe, suspendierte Schwebstoffe, gelöste organische und anorganische Stoffe) erfolgt die Reinigung in mehreren Stufen (Rechen, Sandfang, Vorklärbecken, Ölabscheidung, Belebtschlamm, Tropfkörper). Im Wesentlichen muss das Abwasser entschlammt und von seinen fäulnisfähigen Stoffen befreit werden bevor es in den Vorfluter gelangt

Vor dem Einlaufbauwerk, das den Rechen (und ggf. Siebe) enthält, ist ein Regenüberlauf dargestellt. Ziel dieser Anlage ist, die KKA bei starken Niederschlagsereignissen vor hydraulischer Überlastung zu schützen und damit dem Austrag von Schmutzfrachten zu verhindern. Man unterscheidet:

Regenüberlaufbecken (RÜB), die nur den ersten besonders stark verschmutzten Teil des Wassers bei Starkregen abfangen. Ist die Kapazität des RÜB erschöpft, fließt das Mischwasser ungeklärt in den Vorfluter.

Regenrückhaltebecken (RRB) sind so dimensioniert dass sie einen Starkregen vollständig aufnehmen können. Bei RRB und RÜB wird das gepufferte Regenwasser in der Kläranlage abgearbeitet.

Regenklärbecken (RKB) werden bei Trennkanalisation eingesetzt, wenn das getrennt abgeleitete Regenwasser vor Einleiten in den Vorfluter vorgereinigt werden soll.

Mechanischer Anlagenteil zur Abscheidung fester Stoffe

- Rechen und Siebe zur Entfernung der Grobstoffe (Schutz der folgenden Anlagenteile vor Betriebsstörungen)
- Sandfang zur Beseitigung schnell absetzbarer mineralischer Bestandteile (z.B. Sand)
- Absetzbecken: Im Vorklärbecken scheiden sich organische suspendierte Stoffe durch Sedimentation oder Aufschwimmen ab. Im Nachklärbecken, das zur Trennung des Belebtschlammes vom gereinigten Abwasser dient (und deshalb zum biologischen Teil der Anlage gerechnet wird), erfolgt die Abscheidung des Belebtschlammes in gleicher Weise.
- Flotationsstufe um Stoffe (mit Dichten nahe der des Wassers oder Emulsionen), bei denen keine Abscheidung über Sedimentation erfolgt zu beseitigen. Durch Beladung mit Gasbläschen werden diese Stoffe leichter gemacht und an die Oberfläche getragen (Flotation). Das Verfahren ist in jedem Absetzbecken der Vor- oder Nachklärung einsetzbar.

Biologischer Anlagenteil zur Verstoffwechselung von Kohlenstoffverbindungen:

Das Abbauprinzip kann vereinfacht wie folgt wiedergegeben werden:

biolog. abbaubare Stoffe + O₂ → Abbauprodukte (CO₂, Wasser) + Bakterienzuwachs

- Beim Belebtschlammverfahren befinden sich Bakterien im Belebtschlammbecken in der Schwebe. Über künstliche Belüftung erfolgt Sauerstoffeintrag und eine gleichmäßige Durchmischung von Abwasser und Bakterienmasse wird erzielt. Ins Nachklärbecken ausgetragene Bakterienmasse wird als Rücklaufschlamm in das Belebungsbecken rückgeführt.
- Beim Tropfkörperverfahren ist die für den Abbau wirksame Bakterienmasse als biologischer Rasen auf Festkörpern (Füllkörper z.B. aus Lavaschlacke oder Kunststoffeinfbauten) angesiedelt und damit immobilisiert. Das Abwasser durchströmt z.B. über einen Drehsprenger den Tropfkörper vertikal von oben nach unten.

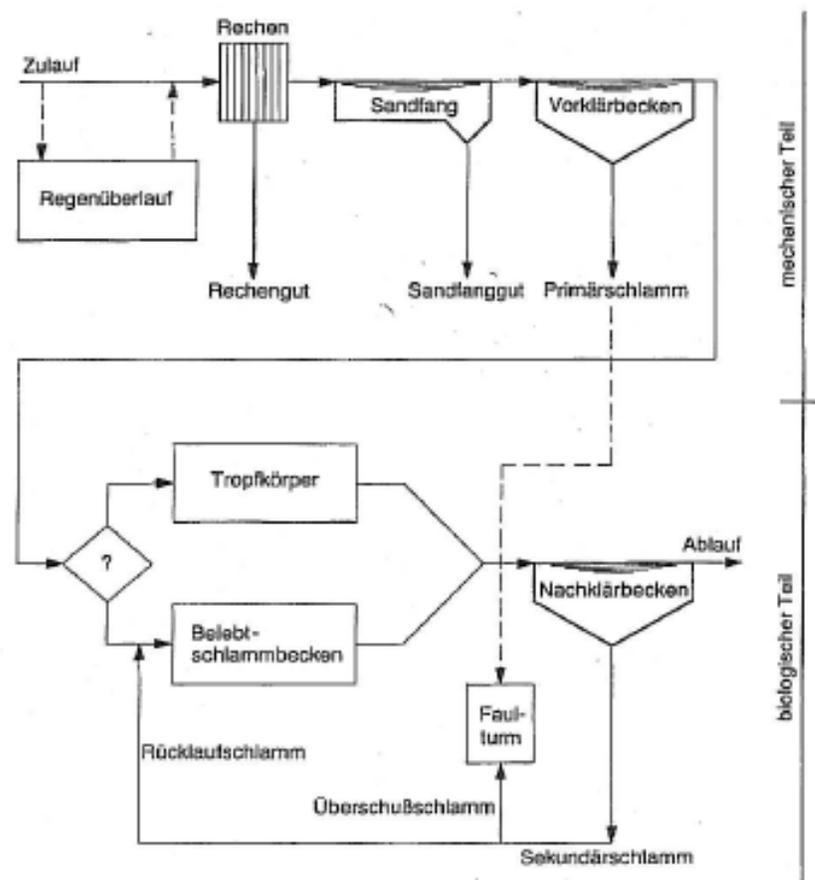


Abb. 74: Ablaufschema einer konventionellen mechanisch-biologischen kommunalen Kläranlage [Quelle: Fa Aquatec System, Gettendorf]

1.3 Alternativen im ländlichen Bereich

Im ländlichen Bereich werden auch heute noch die historischen Vorläufer zu Belebtschlamm- und Tropfkörperverfahren eingesetzt, hauptsächlich dort, wo der Flächenbedarf kein Problem darstellt, also bei besonders kleinen Entsorgungseinheiten. Es sind dies vor allem unbelüftete und belüftete Abwasserteiche und Oxidationsgräben.

Mit einem Anschlussgrad an biologische Kläranlagen von nahezu 85 % stehen im Saarland zukünftig verstärkt die kleineren Kläranlagen im dünner besiedelten, ländlichen Raum zur Planung an. Bis zu 73 kleine Anlagen mit einer Gesamtreinigungsleistung von 88.000 Einwohnerwerten hat der Entsorgungsverband Saar (EVS) in einer vorläufigen Planungsübersicht ermittelt. Die Ausbaugrößen liegen dabei zwischen 80 EW und 4.600 EW. Neben den seit vielen Jahren bewährten Teichkläranlagen kommen zukünftig im Saarland auch Pflanzenkläranlagen (für rd. 80 Einwohnerwerte) zum Einsatz.

1.4 Klärschlamm

Der kommunale Klärschlamm entsteht dadurch, dass ein Teil des leicht abbaubaren Kohlenstoffs im Abwasser in Biomasse (Bakterienzuwachs) umgesetzt wird. Die jährlich anfallende Schlammmenge betrug 1990 in den alten Bundesländern ca. 2,2 Mio. t TS.

Als Verwertungs-/Entsorgungswege stehen der Einsatz in der Landwirtschaft; im Landschaftsbau (z. B. Kompost) sowie die Verbrennung (Reststoffdeponierung nach Verbrennung) zur Verfügung.

Da das landwirtschaftliche Verwertungspotential aufgrund der Schadstoffbelastung des Klärschlammes aus Verdichtungsräumen sowie der neuen Konkurrenzsituation mit Komposten kaum steigerungsfähig erscheint und die TA Siedlungsabfall die Ablagerung organischen Materials weitgehend untersagt, muss der Verbrennungsanteil zukünftig stark zunehmen.

Verwertung des Klärschlammes in der Bundesrepublik, Stand 2002 (Quelle: BMU):

Landwirtschaftl. Nutzung	32 %
Verbrennung	27 %
Deponie	11 %
Landschaftsbau	10 %
Sonst.	20 %

Klärschlammfall im Saarland (2006):

Bei der Reinigung von ca. 1,12 Mio. EW fielen ca. 19.000 t TS (Trockensubstanz) an. Dies entspricht einem Nassschlammaufkommen von ca. 480.000 cbm. Im Endausbaustadium der saarländischen Abwasserentsorgungsinfrastruktur (Anschlussgrad von nahezu 100 %, ca. 1,35 Mio. EW) wird mit einem Aufkommen von ca. 500.000 cbm Nassschlamm bzw. 20.000 t TS gerechnet.

Klärschlammverwertung im Saarland (2006):

Landwirtschaft:	ca. 4.400 t TS
Trocknungsanlage Kraftwerk Weiher (Verbrennung):	ca. 12.200 t TS
Klärschlamm-trocknung:	ca. 2.200 t TS
Verbrennung (MVA):	ca. 220 t TS

1.5 Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer

Elimination von Phosphaten

1989 waren etwa 25 % der Bevölkerung in der BRD an eine KKA mit weitergehender P-Eliminierung angeschlossen. Dies war zu 90 % eine Elimination durch chemische Fällung (mittels Fäll- u. Flockungsmitteln wie Eisen- o. Aluminiumsalzen o. Kalk). Die

biologische P-Eliminierung ist verfahrenstechnisch aufwendiger als die Fällung und kann bei schwankender Abwasserzusammensetzung die Grenzwerte schwer einhalten. Aufgrund der verschärften Bestimmungen der Rahmen-Abwasser-VwV wird der Anschlussgrad für die weitergehende P-Eliminierung weiter steigen.

Elimination von Stickstoffverbindungen

Stickstoff ist ebenfalls ein wichtiger Nährstoff für die Gewässerbiologie, so dass seine übermäßige Einleitung (z.B. Ammoniumverbindungen aus landwirtschaftlichen und kommunalen Bereichen) zu einer starken Belastung der Gewässer führt.

Der Abbau der Hauptkomponente Ammonium erfolgt in der KKA mittels eines

- Nitrifikationsschritts (Ammoniumoxidation zu Nitrat) und eines
- Denitrifikationsschritts (Nitratreduktion zu molekularem Stickstoff).

Der Stickstoffgehalt im Abwasser wird von der EG-Abwasserrichtlinie für Kläranlagenabläufe in Abhängigkeit von deren Leistung beschränkt. Verschiedene Verfahren zur Modifizierung der konventionellen KKA auf die Erfordernisse der Stickstoffeliminierung sind in Erprobung(z. B. Denitrifikation innerhalb der Filterschicht des Sandfilters).

2. Abfallentsorgung

2.1 Hausmüllentsorgung

Hausmüll ist aufgrund seiner komplexen Zusammensetzung und infolge vorhandener Feuchtigkeit nur beschränkt lagerfähig. Die chemische Zersetzung der Abfallbestandteile unter Einfluss von Luft und mikrobiologische, anaerobe und aerobe

Vorgänge führen zum Freisetzen von methanhaltigen Biogasen, zum Auftreten von Bränden auf Deponien sowie zum Übertritt von Schadstoffen in den Boden, Grundwasser und die Umgebungsluft.

Bis Mitte der 70iger Jahre wurde Hausmüll noch vorwiegend direkt auf ungeordneten **Kleindeponien, ohne Schutzmaßnahmen**, abgelagert. Mit dem Übergang zur geordneten **zentralen Deponierung** wurde das Schutzniveau wesentlich erhöht, so dass Anforderungen bzgl. Basisabdichtung, Sickerwasserfassung und Gasfassung stärker in den Vordergrund rückten. Durch die Mitablagerung von großen Mengen Inertmaterial (z. B. Bauschutt) erfolgte eine schnelle Verfüllung des knapp werden Deponieraums, was dazu führte, dass heute Monodeponien mit angepassten Sicherheitsstandards für die jeweiligen abzulagernden Stoffe bevorzugt werden. Seit 01.06.2005 dürfen Abfälle mit mehr als 5 % Restorganik nicht mehr direkt deponiert werden.

Zum Erreichen dieses Zieles müssen die zu deponierenden Reststoffe einen Gehalt an Restorganik ("Glühverlust") einhalten, der unter 5 % liegt. Die erforderliche Inertisierung wird derzeit nur durch thermische Behandlung der Restabfälle (Müllverbrennung) erreicht. Damit wird die Verbrennung als alleiniges Behandlungsverfahren quasi vorgeschrieben. Andere Verfahren, also Endrotteverfahren mit dem Ziel des maximalen mikrobiellen Abbaues von organischer Substanz (Mechanisch biologische Behandlungsanlagen) erfüllen diese Voraussetzung bisher nicht. Mechanisch biologische Behandlungsanlagen werden jedoch in verschiedenen Versuchsvorhaben derzeit im Rahmen von integrierten Abfallkonzepten in Kombination mit der Abfallverbrennung zur Aussortierung von Wertstoffen/Störstoffen vor dem eigentlichen Verbrennungsschritt eingesetzt und bewirken eine erhebliche Mengenreduzierung des zu verbrennenden Materials.

Die Abfalldeponierung selbst wird in absehbarer Zeit nicht verzichtbar sein, weil alle Abfallbehandlungsverfahren nicht ohne eine Reststoffdeponierung auskommen.

Historische Entwicklung der Abfallverbrennung

- Der Aspekt **der Hygienisierung von Abfällen war** aufgrund der Seuchengefahr durch unkontrollierte Ablagerung und Einleitung von Abfällen und Exkrementen in Gewässer bis ca. 1930 der dominierende Aspekt.
- Mit dem Trend zur Einwegverpackung in der Wohlstandsgesellschaft rückte der Aspekt der Volumenreduktion der zu deponierenden Abfälle in den Vordergrund.
- Die einsetzende Umweltschutzgesetzgebung Anfang der 70er Jahre in der BRD (AbfG, BImSchG, TA Luft 1974 und 1986) wirkte sich auf die Abfallverbrennungstechnik aus. Die Anforderungen an die zulässigen Emissionen führten zu einer Erweiterung der Rauchgasreinigung durch nachgeschaltete Wäsche. Daraus entstand das Problem der Reststoffe aus der Abwasserbehandlung. Zur Deponieraumschonung war man bestrebt, die Schlacken möglichst schadstoffarm zu halten, um sie wiederverwerten zu können.
- Ab 1994 müssen alle MVA's die Anforderungen der **17. BImSchV** (materielle Anforderungen an Feuerungstechnik) einhalten.

Vermeiden – Verwerten - Beseitigen

Nach der zu priorisierenden Abfallvermeidung (Verhindern des Entstehens von Abfällen) ist eine möglichst weitgehende Wiederverwertung von Rohstoffen (Recycling) anzustreben. So müssen Wertstoffe aus dem Hausmüll aussortiert werden bevor dieser beseitigt werden kann. Dies beinhaltet z.B. die Getrennterfassung im Haushalt (Altglas, Altpapier, Gelber Sack) und die Erfassung des Bioabfalls. Der von den Wertstoffen befreite Hausmüll wird als Restabfall bezeichnet.

Hausmüll als Brennstoff

Hausmüll ist wegen seiner heterogenen und wechselnden Zusammensetzung sowie eines relativ geringen Heizwertes wegen hohen Inert- und Wasseranteils ein

feuerungstechnisch erheblich problematischerer Brennstoff als herkömmliche Energieträger. Bei einem Wassergehalt von 15 - 45 % liegt der Hu des Hausmülls bei 10.000 bis 3.200 kJ/kg gegenüber z. B. Steinkohle mit 28.000 kJ/kg.

Die materiellen Anforderungen an Errichtung und Betrieb von thermischen Abfallbehandlungsanlagen sind u. a. in der 17. BImSchV (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle) und der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (Anforderungen an die Qualität abzulagernder Abfälle) geregelt.

In Deutschland werden derzeit rund 58 Verbrennungsanlagen zur thermischen Behandlung von Restabfällen aus dem Siedlungsbereich und ca. 30 Anlagen für die Sonderabfallbehandlung betrieben. Damit steht eine Verbrennungskapazität für 40-50 % der derzeit anfallenden Restabfallmenge (ohne Klärschlamm) zur Verfügung.

Im Saarland fallen derzeit jährlich ca. 500.000 Tonnen Hausmüll an. Ab 1998 wird eine Verbrennungskapazität von 330.000 t zur Verfügung stehen, wobei 120.000 t auf die Müllverbrennungsanlage Neunkirchen und 210.000 t auf die Müllverbrennungsanlage Velsen entfallen. Durch konsequente Ausschöpfung der vorhandenen Abfallvermeidungs- und verwertungspotentiale soll der Restmüllanfall lt. Umweltminister um bis zu 200.000 t/a reduziert werden.

Abfallmengenentwicklung (MG)							
Jahr	Hausmüll	Sortierreste	Speremüll	Gewerbeabfälle	Schlämme	Erde/Bauschutt	Gesamt
1998	298.268	11.823	42.567	49.990	158	562	403.368
1999	297.914	14.030	44.346	57.065	822	856	415.033
2000	281.389	13.640	46.083	58.285	2.763	890	403.040
2001	250.867	19.526	44.182	63.386	4.040	1.871	383.872
2002	229.777	23.401	38.371	52.600	8.394	2.410	354.953
2003	227.713	18.817	37.970	45.582	2.314	2.678	335.074
2004	233.087	18.212	34.901	52.254	3.169	2.292	343.915
2005	230.470	10.831	35.703	74.912	2.776	2.612	357.304
2006	222.180	8.506	32.128	76.622	881	638	340.955

Inkl. ca. 2.000 Mg an gem. Bau- und Abbruchabfällen (unter 5% Restorgank) aus Vermarktung von Deponiekapazitäten

Anmerkung: Hausmüll in 2006 um 205,70 Mg höher als in der Kommunalstatistik. Abfälle von Ende Dezember 2005 wurden erst Anfang Januar 2006 abgefahren

Abb. 75: Abfallmengen im Saarland 2006

Neben den zurzeit überwiegend konventionellen Müllverbrennungsanlagen (Rostfeuerung) ist eine Vielzahl neuer thermischer Verfahren zur Abfallbehandlung in der Entwicklung. Kennzeichen aller neu entwickelten Verfahren ist die Mehrstufigkeit, d. h. eine Auftrennung der Einzelschritte der Verbrennung. Von der Mehrstufigkeit kann eine deutliche Reduzierung der Emissionswerte erzielt werden und durch die Verringerung des zu reinigenden Gasstroms die Möglichkeiten zur Energienutzung und deren Effizienz durch Erzeugung eines Brenngases verbessert werden, was sich auch in Kostensenkungen niederschlägt.

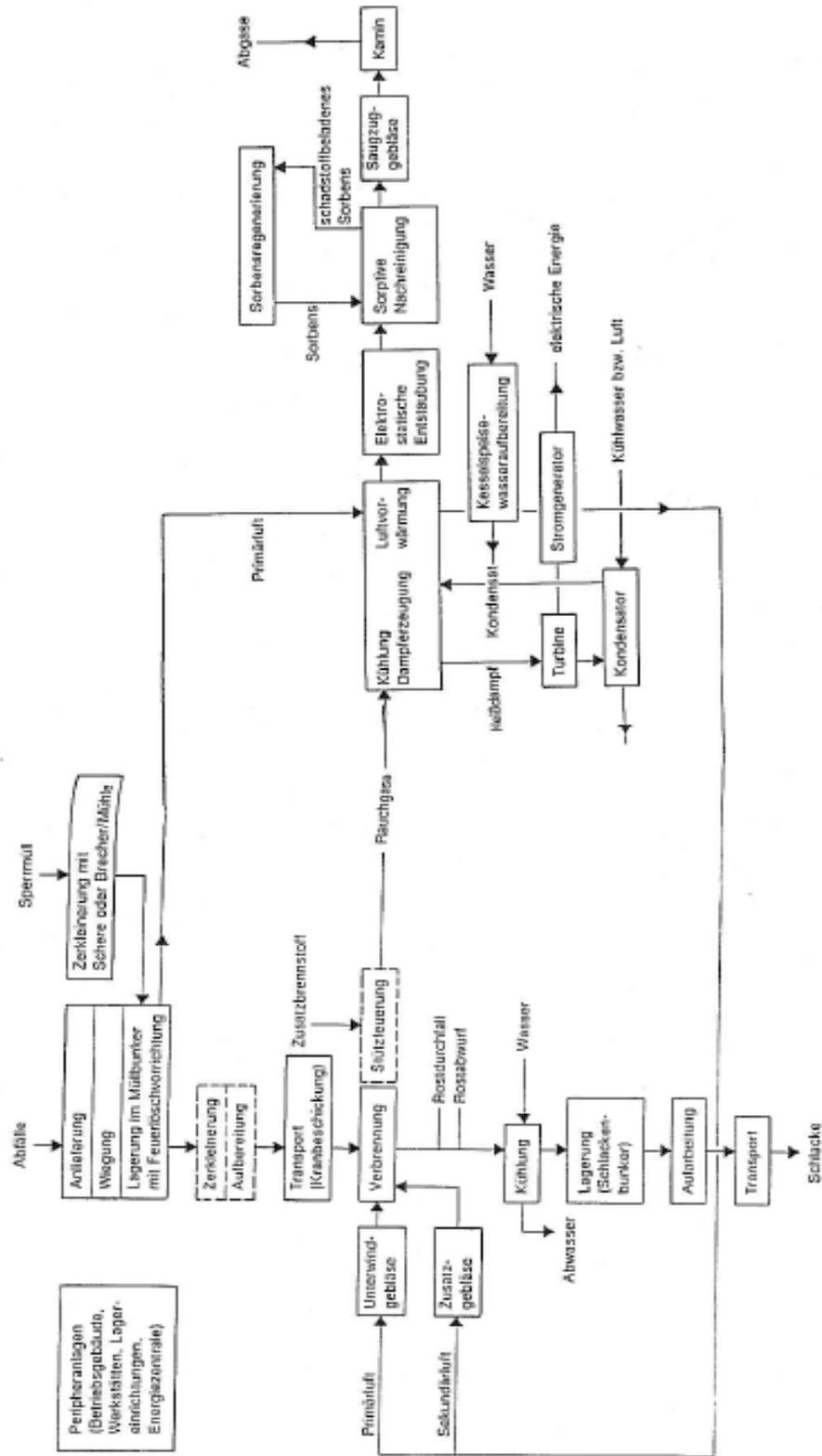


Abb. 76: Übersichtsblockdiagramm einer Abfallverbrennungsanlage zur Stromerzeugung und Rauchgasreinigung

Abbildung 76 zeigt ein Übersichtsblockdiagramm einer Abfallverbrennungsanlage mit anschließender Wärmenutzung und Stromerzeugung, unabhängig von der verwendeten Verbrennungstechnik und unabhängig von der Art des Abfalls.

Neben der konventionellen Müllverbrennung werden vier der neu entwickelten Verfahrenskonzepte kurz vorgestellt, die eine gewisse Reife erreicht haben und sich in der großtechnischen Demonstration befinden:

Konventionelle Müllverbrennung (z.B. Walzenrost)

Der Hausmüll wird aus dem Müllbunker über eine Beschickungseinrichtung auf den geneigten Walzenrost aufgegeben, der für die Durchmischung sorgt und den Müll zum Rostende transportiert. Die Müllverbrennung auf dem Rost ist dadurch gekennzeichnet, dass alle für den Verbrennungsprozess kennzeichnenden Vorgänge - Trocknung, Entgasung Gas- und Feststoffausbrand - in einem Reaktionsraum ablaufen. Dies macht die Steuerung der einzelnen Vorgänge schwierig.

Schwelbrennverfahren der Fa. KWU/Siemens

Schwelgase aus der Pyrolysetrommel, einer indirekt beheizten Drehtrommel (450 °C), werden zusammen mit den aufgemahlten Pyrolyserückständen (Koks, Filterstäuben) in einer Hochtemperaturbrennkammer mit schmelzflüssigem Ascheabzug verbrannt. Das Abgas wird nach Abwärmenutzung konventionell gereinigt. Die Müllasche fällt in der Brennkammer als inerte Schlacke an.

Wirbelschicht-Konversionsverfahren der Fa. Lurgi (WIKONEX)

Das WIKONEX-Verfahren unterscheidet sich vom Schwel-Brenn-Verfahren insbesondere im thermischen Aufbereitungsteil, wo anstelle der Pyrolysetrommel eine zirkulierende Wirbelschicht eingesetzt wird.

Noell-Konversionsverfahren

Wie beim Schwel-Brennverfahren erfolgt eine thermische Aufbereitung des Mülls in einer indirekt beheizten Drehtrommel. Im Unterschied werden dann der aufgemahlene Pyrolysekoks und das Schwelgas in einem Flugstromvergaser unter Druck bei ca. 25 bar vergast.

Thermoselect-Verfahren

Die Einsatzstoffe werden in hochverdichtetem Zustand pyrolysiert, anschließend bei sehr hohen Temperaturen mit reinem Sauerstoff vergast, wobei ein Synthesegas entsteht das anschließend verbrannt wird. Die Reinigung des Synthesegases erfolgt unter schockartiger Abkühlung von 1.200 °C auf ca. 65 °C.

Rauchgasreinigung und Reststoffproblematik bei der Abfallverbrennung

Die Eigenschaften und der Umfang der Rückstände aus der Abfallverbrennung werden ganz wesentlich von der Wahl des Verfahrens zur Rauchgasreinigung bestimmt. Wie bei allen Verbrennungsanlagen unterscheidet man primäre und sekundäre Rauchgas-minderungsmaßnahmen. Die feuerungstechnischen Primärmaßnahmen beziehen sich hauptsächlich auf die Komponenten NO₂ und CO während die sekundären Abscheidemaßnahmen hauptsächlich auf die sauren Komponenten SO₂, HF und HC₂ sowie die Stäube zielen. Letztere werden mit den bekannten Verfahren der elektrostatischen, filternden oder nassen Abscheidung aus dem Rauchgas entfernt.

Als feste Rückstände fallen bei der konventionellen Abfallverbrennung (Rostfeuerung) ca. 250 - 350 kg Schlacke pro Tonne eingesetztem Abfall an. In Abhängigkeit vom Rauchgasreinigungsverfahren kommen hierzu noch ca. 30 - 80 kg Filterstäube und Reaktionsprodukte pro Tonne eingesetzten Abfall. Die Rückstände (Schlacke) sind möglichst zu verwerten (Straßenbaumaterial usw.) und falls dies aufgrund des

Schadstoffinventars nicht möglich ist, ordnungsgemäß abzulagern (Deponie), bzw. im Fall der Filterstäube als Sonderabfall zu entsorgen.

2.2 Entsorgung von organischen Abfällen und Bioabfällen

organische Abfälle: **Oberbegriff** für Abfälle die organisch abbaubar sind: Bioabfälle, Lebensmittelreste aus der Gastronomie, Verarbeitungsabfälle aus der Lebensmittelindustrie bzw. Landwirtschaft und Viehhaltung.

Bioabfälle: **allgemeine Bezeichnung für getrennt erfasste biologisch abbaubare** organische Abfälle aus Haushaltungen. Bioabfälle bestehen insbesondere aus Gartenabfällen, Küchenabfällen und Papieren

Es gibt zurzeit zwei unterschiedliche Grundverfahren zur Entsorgung von Bioabfällen; die Kompostierung und die Vergärung.

Beiden Verfahren ist jeweils eine Aufarbeitungsstufe zur Abtrennung von Störstoffen und zur Zerkleinerung der angelieferten Bioabfälle vorgeschaltet. Die Zerkleinerung und Homogenisierung des Materials erfolgt durch Förderschnecken und Hammermühlen. Die Abtrennung von Störstoffen wird unter Verwendung von Magnetscheidern und Sieben durchgeführt.

Die Kompostierung

Bei dem Vorgang der Kompostierung wird zwischen **Vor- und Nachrotte unterschieden**. Der Prozess der Kompostierung ist ein aerober Vorgang und somit auf Sauerstoff angewiesen. Während der Vorrotte werden die leicht abbaubaren organischen Stoffe von Mikroorganismen abgebaut. Hierzu zählen Fette, Zucker, Proteine und natürliche organische Säuren. Hierbei werden durch die Stoffwechselaktivität

Temperaturen von bis zu 70 °C erreicht. Durch diese hohe Temperatur wird die Hygienisierung des Materials gewährleistet. Die Vorrotte dauert ca. acht bis zwölf Wochen.

Während der ca. zehn bis **vierzehnwöchigen Nachrotte** werden die biologisch schwer abbaubaren Stoffe abgebaut. Ein Parameter für den Reifegrad des Kompostes ist der Rottegrad. Er kennzeichnet den aktuellen Stand des Abbaugeschehens. Für den Rottegrad eines Kompostes ist die im Selbsterhitzungsversuch erreichte Maximaltemperatur kennzeichnend.

	Rottegrad	Temperaturbereich
Rohkompost	I	> 60° C
Frischkompost	II, III	40 – 60 ° C
Fertigkompost	IV, V	< 30 – 40° C

Tab. 1: Rottegrade von Kompost

Ist die Nachrotte abgeschlossen, werden über verschiedene Klassierungssiebe, meist Drehtrommelsiebe mit definiertem Lochdurchmesser, Komposte mit unterschiedlichen Korndurchmessern hergestellt. Zur Herstellung von speziellen Kultursubstraten können dem Fertigkompost Torf, Rinde, Ton oder sonstige gebrannte Komponenten zugesetzt werden.

Zur Kompostierung von Bioabfällen gibt es verschiedene Verfahren. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich in der Art der Umsetzung der einzelnen Komposthaufen (Mieten) und in der Belüftung der Mieten. Es gibt Systeme die mit einzelnen zwangsbelüfteten Rotteboxen arbeiten, wodurch die Dauer der Vorrotte verkürzt werden kann. Andere Systeme werden mit automatischen Umsetzeinrichtungen betrieben.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Rottehalle der Kompostanlage auf der Deponie des EVS in Ormesheim. In der Rottehalle wird die Vorrotte durchgeführt. Im Hintergrund der Halle ist das automatische Umsetzsystem erkennbar.

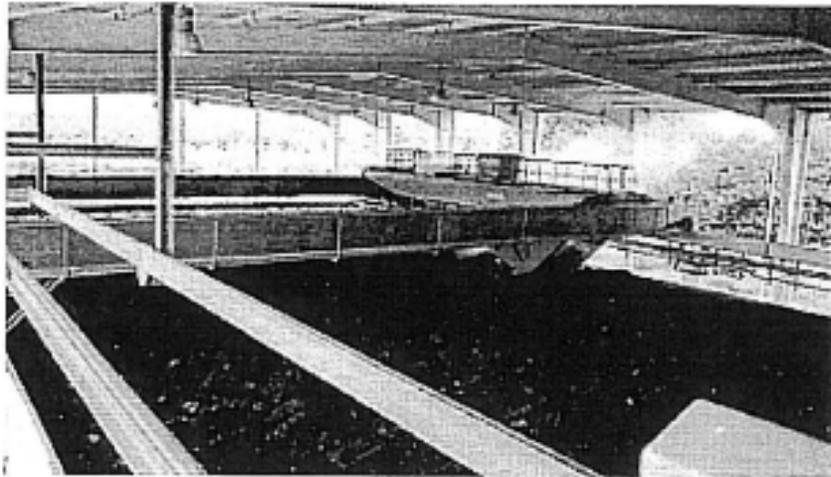


Abb. 77: Rottehalle der Kompostanlage Ormesheim/Saarland

Vergärung

Der Vergärung von Bioabfällen findet in einem vierstufigen biologischen anaeroben (ohne Sauerstoff) Prozess statt. Auf Mikroorganismen, die an der anaeroben Umsetzung der Bioabfälle beteiligt sind, hat der Sauerstoff eine toxische Wirkung. Es wird zwischen nassen und trocknen sowie einstufigen und mehrstufigen Bioabfallvergärungsanlagen mit einer thermophilen (Betriebstemperatur 40 - 70 °C) oder mesophilen (20 - 40 °C) Betriebsweise unterschieden.

Das aufbereitete Eingangsmaterial wird in den Gärreaktor eingetragen. Die Biomasse wird durch Mikroorganismen in kleinere Bestandteile zerlegt, es wird Methan (60 - 70 Vol-%), **Kohlendioxid** (30 - 40 Vol-%), Wasserstoff (< 0,5 Vol-%) und in Spuren Schwefelwasserstoff gebildet. Die Dauer der anaeroben Behandlung schwankt je nach Verfahren von fünf bis zwanzig Tagen.

Im Anschluss daran wird der Biomassebrei ausgetragen und über Schneckenpressen Zentrifugen oder Filterkammerpressen entwässert. Der entwässerte Gärrest ist mit einem Frischkompost mit dem Rottegrad II vergleichbar. Zur Ausreifung auf höhere Rottegrade (IV - V) ist in den meisten Anlagenkonzeptionen eine Nachrotte des Gärrestes vorgesehen.

Eine besondere Form der Vergärung unter Ausnutzung von Synergieeffekten ist die Co-Vergärung. Diese findet unter Mitverwendung von Anlagenteilen auf Kläranlagen statt. Hierbei werden die Faultürme der Kläranlagen als Bioreaktoren mitbenutzt. Dazu wird die Biomasse in einem Kessel zu einem Brei vermischt. Nach ca. zwei Tagen sind die hydrolisierbaren Inhaltsstoffe gelöst und es erfolgt eine flüssig-fest Abtrennung. Die flüssige Phase wird den Faultürmen zugeleitet, die feste Phase wird in einer Nachrotte weiter behandelt.

Der während des Prozesses der Vergärung entstehende durchschnittliche Methananteil von 65 % kann in einem Blockheizkraftwerk zur Energie- und Wärmeerzeugung genutzt werden.

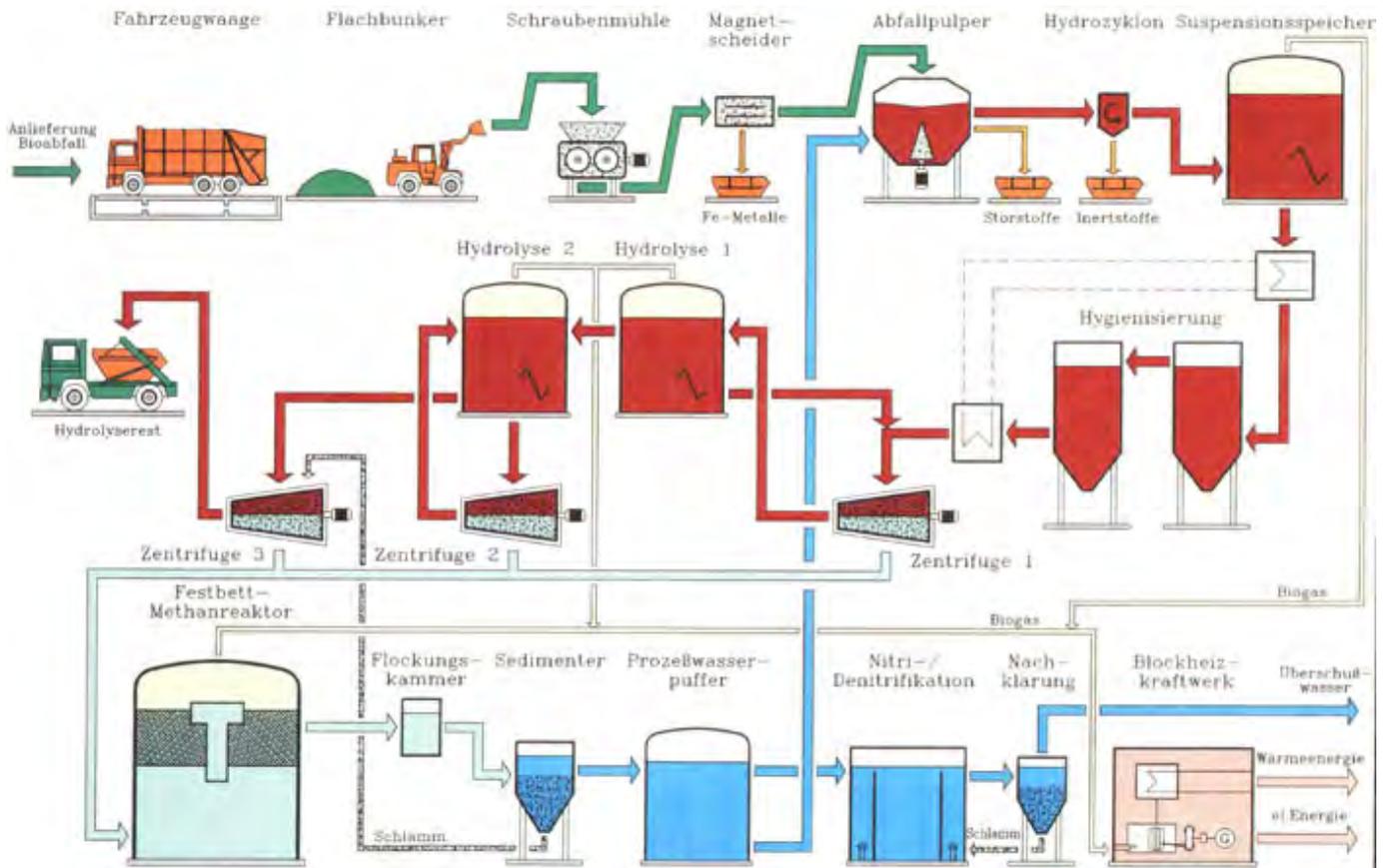


Abb. 78: Vergärungsanlage

Bei der Entsorgung von Bioabfällen kann bei Anwendung der Vergärung durch Nutzung des Biogases Energie gewonnen werden. Eine Betrachtung der Energiebilanz je Tonne Bioabfall ergibt folgende Werte in kWh/1.000 kg Bioabfall:

Kompostierung		Energie Bedarf Produktion Überschuss	Vergärung	
elektrisch	thermisch		elektrisch	thermisch
60 – 80	-		50 – 70	100 – 150
-	kaum nutzbar		150	350
-	-	80 – 100	200 - 300	

Tabelle 2: Energiebilanz bei Kompostierung und Vergärung

Mit der Entsorgung von organischen Abfällen und insbesondere der Bioabfälle aus den Haushaltungen lässt sich der Abfallberg deutlich reduzieren. Kann die Entsorgung über eine Vergärungsanlage stattfinden, so wird zusätzlich ein positiver Beitrag zur CO₂-Bilanz geleistet.

2.3. Sonderabfall-Entsorgungssysteme

Eine Abfallart mit einem hohen Schädigungspotential für den Menschen und die Umwelt sind die besonders überwachungsbedürftigen Abfälle, im Allgemeinen Sprachgebrauch auch Sonderabfälle genannt.

In der BRD wurden 2002 ca. 20 Mio t besonders überwachungsbedürftiger Abfälle behandelt bzw. entsorgt. Beim Umgang mit Sonderabfällen müssen umfangreiche Gesetzesvorschriften mit den dazu gehörigen Verordnungen beachtet werden.

Um einer missbräuchlichen Entledigung der Sonderabfälle durch den Abfallbesitzer vorzubeugen, wurden in einigen Bundesländern (vorwiegend im Süden der Bundesrepublik) Sonderabfallentsorgungsgesellschaften mit Beteiligung von Staat, Kommunen und gewerblicher Wirtschaft gegründet. Diesen Gesellschaften sind die Sonderabfälle zur Entsorgung anzudienen.

Im Saarland ist dies die SES Service-Entsorgung-Sicklelets GmbH (Remondis).

Sonderabfälle zur Verwertung können mit Zustimmung der jeweiligen Genehmigungsbehörde einem geeigneten Verwerter unter Berücksichtigung eines umfangreichen Dokumentations- und Nachweisverfahrens in Eigenregie überstellt werden.

Sonderabfälle werden:

- chemisch-physikalisch behandelt
- der Übertagesonderabfalldeponie
- der Untertagesonderabfalldeponie
- der Sonderabfallverbrennung

zugewiesen.

Chemisch-physikalische Behandlung

Diese Art der Abfallbehandlung ist immer dann notwendig, wenn ohne diese Behandlung keine Verbrennung, Deponierung oder Einleitung möglich ist. Dabei handelt es sich meistens um Verfahren wie sie zur Behandlung von Flüssigkeiten und Schlämmen auch in der industriellen Abwasserreinigung angewandt werden.

Ziel ist die Herstellung eines deponiefähigen Rückstandes bzw. eines einleitfähigen Abwassers.

Übertage-Sonderabfalldeponie

Die Grundphilosophie der Übertagedeponien ist die Errichtung eines Multi-barrierensystems. Da es nicht möglich ist, Sonderabfälle für alle Zeiten sicher von der Biosphäre fernzuhalten, ist es das Ziel mit möglichst viel Barrieren eine technisch größtmögliche Sicherheit zu erreichen und den Eintritt von Schadstoffen in die Biosphäre möglichst lange zu verzögern.

Untertagedeponie (UTD), Kavernendeponie, Bergwerksdeponie

Anforderungen an eine Untertagedeponie:

- vollständiger Einschluss der Abfälle
- dauerhafte Fernhaltung der Sonderabfälle und ihrer Immissionen von der Biosphäre

- Vermeidung von jeglichem Wasserkontakt mit den Abfällen
- Verhinderung der Schadstoffausbreitung
- Gewährleistung einer mindestens immissionsneutralen Ablagerung
- Vermeidung der Reaktionen von Abfällen untereinander und mit dem Gestein
- Vermeidung schädlicher Verunreinigungen oder nachteiliger Veränderungen der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit

Diese Anforderungen erfüllen nach bisherigen Kenntnissen nur plastische Salzgesteine.

Eine **Sonderform** der Untertagedeponie ist die **Kavernendeponie**. Diese Kavernen sind Hohlräume im Salz.

Kavernen sind undurchlässig für Gase, Flüssigkeiten und haben die Fähigkeit sich, aufgrund ihrer Plastizität, selbst abzudichten (Vermeidung von Rissbildungen). Feste Abfälle werden über eine Freifalleitung in die Kaverne geschüttet. Pumpfähige (nicht salzlösende) Materialien werden in die Kaverne gepumpt.

Ist die Kaverne gefüllt, so wird sie nach oben durch mehrere Lagen Salz, Beton und Bitumen verschlossen. Eine Rückholbarkeit der Abfälle ist praktisch ausgeschlossen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit Bergwerksdeponien einzurichten. Die einzige Realisierung einer solchen UTD befindet sich zurzeit in Herfa-Neurode (Hessen) im Zusammenhang mit den dort ausgebeuteten Salzlagerstätten.

Die UTD Herfa-Neurode ist - obwohl weltweit einzigartig - vorrangig für die Entsorgung in Hessen eingerichtet. Andere Bundesländer oder das Ausland dürfen nur bei freien Kapazitäten und mit Zustimmung des hessischen Umweltministers Sonderabfälle dort lagern.

Die Deponie wurde 1972 eingerichtet. Der Abfallbesitzer ist über ein umfangreiches Kennzeichnungs- und Verwaltungssystem jederzeit feststellbar und bleibt im Besitz der

Abfälle. Im Laufe der Zeit haben sich die Aufbereitungsverfahren für Sonderabfälle verbessert. Firmen, die früher ihre Sonderabfälle in die UTD verbracht haben, führen heute ihre Sonderabfälle **wieder aus, um** sie in einem neu- oder weiterentwickelten Verwertungsverfahren zu behandeln.

3. Recyclingtechnologien

3.1 Sammel-, Trenn- und Verwertungssysteme

Sammelsysteme werden in zwei Gruppen eingeteilt. Es wird zwischen Bring- und Holsystemen unterschieden.

Holsysteme sind Systeme bei denen der Abfall zur Beseitigung bzw. zur Verwertung vom Abfallbesitzer bereit gestellt wird und von den zuständigen Gemeinden oder Verbänden abgeholt wird. Hierzu zählen:

- öffentliche Hausmüll/Bioabfallabfuhr
- Alttextiliensammlungen
- Kühlschranksorgung
- Sperrmüllentsorgung
- Wertstoffsammlung
- Bündelsammlung
- Grünschnittsammlung
- gelber Sack bzw. gelbe Tonne

Im Bringsystem werden die Abfälle zu zentralen Einrichtungen oder Containerstandorten der Gemeinden bzw. Verbände vom Abfallerzeuger hingbracht.

Zu den Bringsystemen gehören:

- Wertstoffdepotcontainer

- Wertstoffhöfe
- Kompostieranlagen
- Sonderabfallkleinmengen

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die einzelnen Verfahrensvarianten der getrennten Sammlung:



Abb. 79: Verfahrensvarianten der getrennten Sammlung

Altpapier wird über Bündelsammlungen, Wertstoffdepotcontainer sowie über die öffentliche Hausmüllabfuhr oder über Wertstoffhöfe entsorgt. Glas wird vorwiegend in Wertstoffdepotcontainern gesammelt.

Umverpackungen und Verkaufsverpackungen mit dem Grünen Punkt werden im Holsystem über gelbe Säcke bzw. die gelbe Tonne beseitigt, oder aber in

Wertstoffhöfen abgegeben. Weiterhin finden auch Alttextilien- und Alteisensammlungen sowie saisonabhängige Grünschnittsammlungen statt.

Geringe Mengen von Sonderabfällen aus den privaten Haushaltungen werden über sogenannte Ökomobile gesammelt und der Sonderabfallentsorgung zugeführt. Kühlschränke können in eigens dafür vorgesehenen Entsorgungsfahrzeugen mit FCKW-Absaugereinrichtung entsorgt werden.

Für die Sammlung der Abfälle gibt es unterschiedliche Behältnisse und Fahrzeuge. Durch den Einsatz von neuentwickelten Behälter- und Fahrzeugtypen können die Sammelkosten gesenkt werden. Es gibt Fahrzeugtypen bei denen der Fahrer selbständig ohne seinen Sitz zu verlassen die Entleerung des passenden Behälters über einen ausgeklügelten Arm und Hebelmechanismus vornehmen kann. Dieses Verfahren wird in ländlichen Bereichen des Saarlandes zurzeit erprobt.

Weiterhin gibt es auf dem Markt Sammelsysteme welche ein Absetzen des Müllsammelcontainers im Sammelgebiet erlauben, so dass die Sammlung nach Aufladen eines leeren Sammelcontainers unverzüglich fortgesetzt werden kann.

Sonderabfallverbrennung (SAV)

Für viele Sonderabfälle, deren Deponierung weder oberirdisch noch unterirdisch durchführbar ist, bleibt nur die thermische Behandlung. Die Verbrennung kann als Vorbehandlung zur Deponierung angesehen werden, da sie eine weitgehende Eliminierung des organischen Schadpotentials und eine Volumenreduzierung mit sich bringt.

Für die SAV lassen sich vier wesentliche Ziele definieren:

- **Entsorgung** fester, insbesondere aber flüssiger und pastöser Sonderabfälle (z.B. Öl- und Farbschlämme, Abfälle aus Pharma- und Pflanzenschutzmittelherstellung)
- **Zerstörung** spezifischer organischer Schadstoffe (z. B. kontaminierte Böden, polyaromatische Kohlenwasserstoffe)

- **Nutzung des Energieinhaltes** brennbarer Stoffe (nur die konsequente Wärmenutzung in Abhitzeesseln - Temperaturreduktion von 1500 °C auf 300 °C bei 40 bar - macht die SAV zur Deponierung wirtschaftlich konkurrenzfähig)
- **Rückgewinnung** verwertbarer Komponenten (Metalle aus Verbundstoffen)

Zur Verringerung von Sonderabfällen müssen in den Produktionsprozessen die Eingangsstoffe untersucht werden. Häufig lassen sich bestimmte Hilfsstoffe (die einen Großteil der gefährlichen Sonderabfälle verursachen), wie z.B. Löse- und Schmiermittel, durch Ersatzstoffe mit einem geringeren Umweltgefährdungspotential ersetzen. Auch eine verfahrenstechnische Prozessoptimierung mit einer Kreislaufführung von bestimmten Stoffen kann dazu beitragen, Sonderabfälle zu vermeiden.



Abb. 80: Müllfahrzeug mit Seitenlader

Trennung und Verwertung von Abfällen

Durch die Einführung von Sammelsystemen für die unterschiedlichsten Abfallarten wird ein Großteil der Abfälle erst gar **nicht miteinander vermischt und** kann so direkt dem Wiederverwertungskreislauf hinzugefügt werden. Dies trifft vorwiegend auf die Materialien wie Glas, Papier, Eisenmetalle zu. Abfälle mit dem Grünen Punkt, die über die gelben Säcke oder die gelbe Tonne gesammelt werden, müssen einer Sortieranlage zugeführt werden, sofern sie denn verwertet werden sollen.

Duales System Deutschland (DSD)

Das DSD ist ein außerhalb der öffentlichen Abfallentsorgung aufgebautes, separates System zur Erfassung, Sortierung und Verwertung von gebrauchten Verkaufsverpackungen. Die Verpackungsverordnung entbindet Hersteller/Importeure und Vertreiber von der Rücknahme- und Pfanderhebungspflicht auf solche Verpackungen, wenn ein Duales System flächendeckend eingerichtet ist.

Das System wird über die Lizenz zur Nutzung des »Grünen Punktes« finanziert. Die Kosten für den Grünen Punkt werden über eine Mischkalkulation auf den Preis der Produkte aufgeschlagen und somit vom Verbraucher getragen. Der »Grüne Punkt« wird von der Gesellschaft DSD für Verkaufsverpackungen aus solchen Materialien vergeben, für deren stoffliche Verwertung Garantien vorliegen. In den Sortieranlagen des DSD erfolgt eine Sortierung in die Fraktionen Weißblech, Aluminium, Kunststoffe und Verbundmaterialien.

Wertstoffhöfe als Sammel- und Trennsystem

Wertstoffhöfe bieten eine breite Palette an getrennt erfassten Materialien an. In der Regel werden Papier, Zeitungen, Pappe, Kartonagen, Behälterglas, Aluminium, Eisenschrott, Weißblech, Buntmetalle, Textilien, Kunststofffolien, Kunststoffhohlkörper

(PS, PP, PE, PET), Styropor, Verbundverpackungen, Folien aus der Landwirtschaft, unbehandeltes Holz, Grünschnitt und Altkühlgeräte erfasst.

Als Sonderservice können Flach- und Verbundglas, Kabelreste, PVC-Bodenbeläge, Naturkorken, Altreifen, Bauschutt (in begrenzten Mengen), Elektrogeräte, Altfette, Kerzenwachs, Schuhe, Bettfedern und vereinzelt auch Altöl angenommen werden.

Die Abfälle werden in den Wertstoffhöfen sortenrein in Containern erfasst und durch den Betreiber zu den Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben gefahren.

Möglichkeiten der Verwertung

- **Altglas** Behälterglas, Glaswolle, Glaspulver, Glassand, im Straßenbau, Kachelherstellung
- **Papier und Pappe** Zeitungspapier, Wellpappe, Hygienepapier, Verpackungspapier, Wärmedämmmaterial, Kompostzuschlagstoff, Spanplattenherstellung
- **Weißblechdosen** Eisenschrott in der Metallindustrie
- **Aluminium** Herstellung von Umschmelzaluminium (Sekundäraluminium)
- **sortenreine Kunststoffe** **Umschmelzen zu neuen Produkten**
- **gemischte Kunststoffe** **chemische** Zerlegung in Grundstoffe, oder physikalische Trennung in einzelne Kunststoffarten
- **Verbundmaterialien** **bunte Trägerplatten als Ersatz von Spanplatten, Transportpaletten**

Durch die Getrenntsammlung von **Abfällen und durch verschiedene** Trennverfahren **können Rohstoffe für ein neues Produkt gewonnen werden. Bei dem Werkstoffrecycling** muss jedoch auf die ökonomische sowie die ökologische Sinnhaftigkeit geachtet werden.

3.2 Recycling von Bauabfällen

Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle werden in den Statistiken meistens zusammen mit Bodenaushub erfasst und als Bauabfälle bezeichnet.

- **Bauschutt:** mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen. Grundsätzlich sind hierzu alle Baustoffe zu zählen, die im Hoch und Tiefbau verwendet
- **Straßenaufbruch:** mineralische Stoffe, die hydraulisch, mit Bitumen oder Teer gebunden oder ungebunden im Straßenbau verwendet werden.
- **Baustellenabfälle:** nicht mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, vermischte Abfälle aus der Bautätigkeit
- **Bodenaushub:** nicht kontaminiertes, natürlich gewachsenes oder bereits verwendetes Erd- oder Felsmaterial!

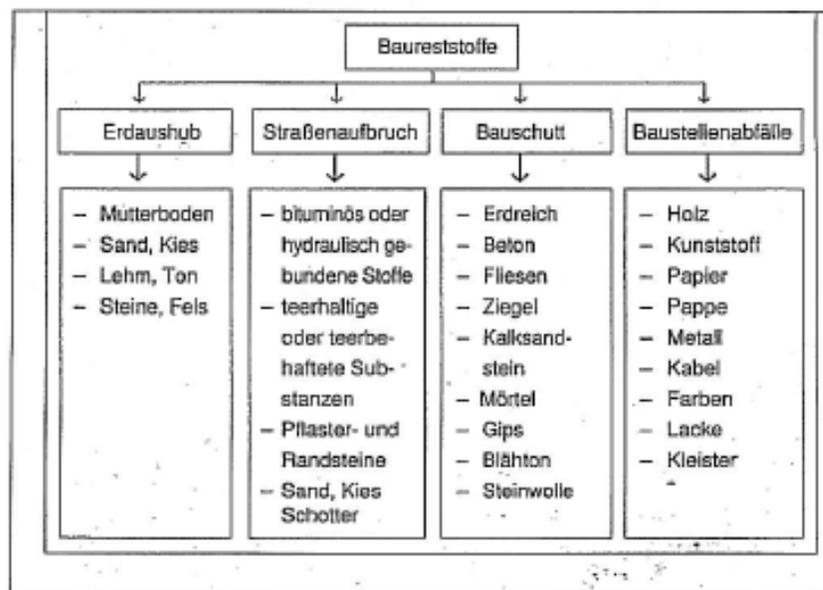


Abb. 81: Begriffliche Aufgliederung innerhalb der Bauabfälle (Baureststoffe)

Bauabfälle werden in mobilen, semimobilen oder stationären Sortieranlagen aufgearbeitet. Die Verfahrensschritte lassen sich wie folgt unterteilen:

- Vorsortierung
- Siebung
- Sichtung bzw. Stromidassierung
- maschinelle Sortierung
- manuelle Sortierung

Ziel der Aufarbeitung von Bauabfällen ist es, möglichst **reine mineralische Fraktionen** verschiedener Körnungen zum **Wiedereinsatz im Baugewerbe** zu erhalten und die **nicht mineralischen Fraktionen** einer weiteren **Verwertung** zuzuführen. Die Art und der Umfang von Baustoffrecyclinganlagen ist durch die Quantität und Qualität der Eingangsstoffe und die Qualitätsanforderungen an das Endprodukt bestimmt.

Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb von Recyclinganlagen ist eine kontinuierliche Anlieferung der Bauabfälle und eine Mindestdurchsatzmenge, die z. B. für mobile Aufbereitungsanlagen bei 5.000 bis 6.000 Tonnen pro Jahr liegt.

Zur Erzeugung von Produkten minderer Qualität, z. B. Tragschichtmaterial im untergeordneten Straßenbau, kann sich die Aufbereitung auf das Zerkleinern und die Metallabscheidung reduzieren.

Um höherwertigere Sekundärbaustoffe zu erzeugen, müssen die Aufarbeitungsschritte erweitert und an die geforderten Qualitätsvorgaben des Endproduktes angepasst werden.

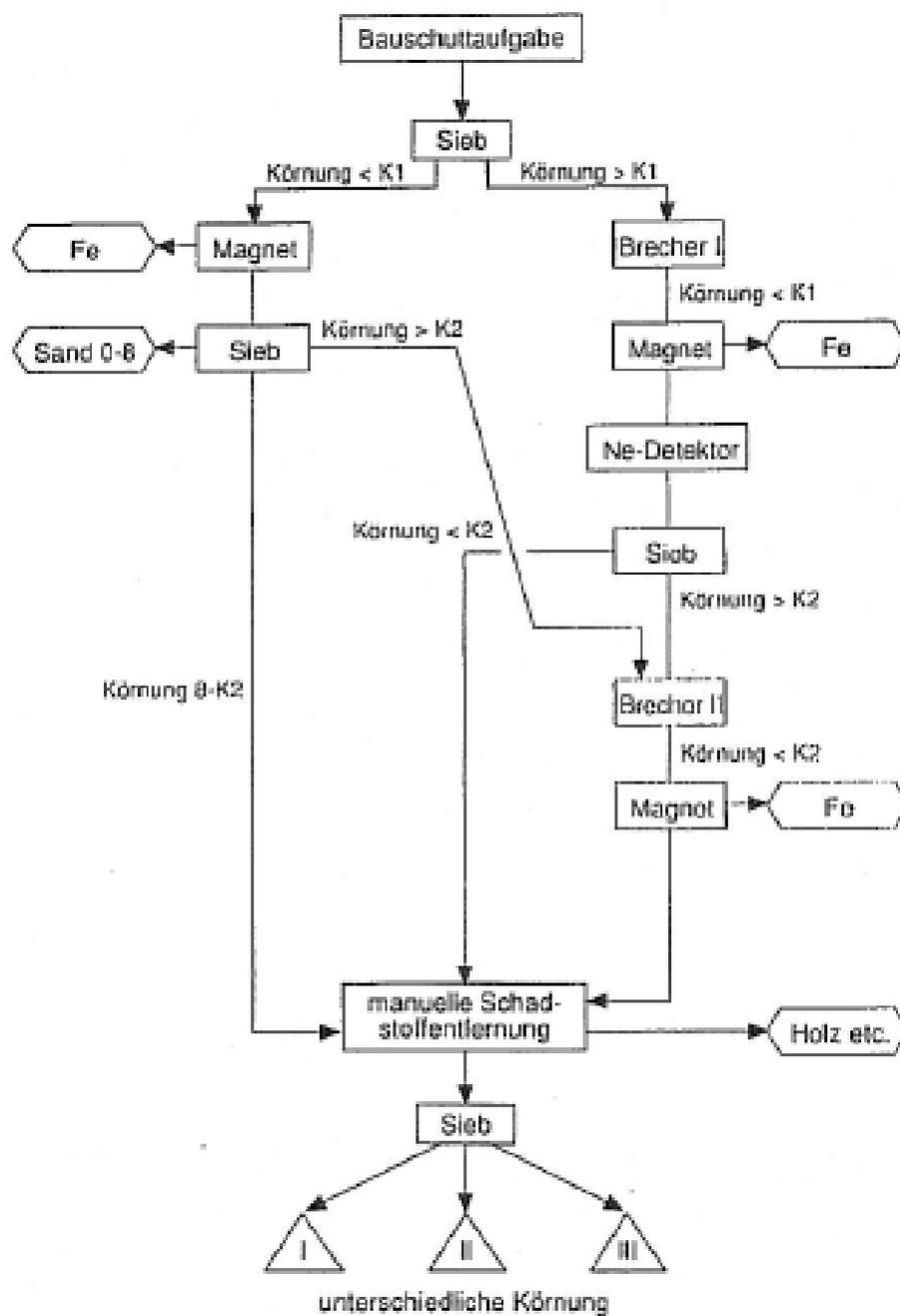


Abb. 82: Fließbild einer komplexen Bauschuttzubereitungsanlage

An Recycling-Baustoffe gibt es unterschiedliche Qualitätsanforderungen. Es gibt eine Gütegemeinschaft der Recycling-Baustoffe, die ein RAL-Gütezeichen mit drei Qualitätsklassen (I – III) an die wiedergewonnenen Baustoffe vergibt. Darüber hinaus ist ein Nachweis der Umweltverträglichkeit durch eine umwelttechnische Beurteilung der Recycling-Baustoffe zu erbringen.

Werden die oben genannten Kriterien erfüllt, so kann der recycelte Baustoff im klassifizierten Straßenbau eingesetzt werden. Baustoffe, die im klassifizierten Straßenbau eingesetzt werden, müssen jedoch die gleichen Anforderungen erfüllen wie sie von einem Primärbaustoff verlangt werden.

Im nicht klassifizierten Straßenbau (Geh-/Radwege, Parkflächen und Privatstraßen) sind darüber hinaus auch Mischmaterialien mit erhöhten Asphalt- und Ziegelanteilen einsetzbar. Diese werden bislang vorwiegend im privaten Bereich eingesetzt.

Ein weiterer Einsatzbereich für Sekundärbaustoffe ist der Garten- und Landschaftsbau. Dort besteht die Möglichkeit der Verwendung als Unterbauschicht von Parkplätzen, Schulhöfen, Sport- und Spielflächen. Hierbei werden als Nebenbestandteile Metall, Glas und Kunststoff in zerkleinerter Form toleriert.

An den Einsatz von recycelten Baustoffen beim Bau von Lärmschutzwänden werden nur geringe Anforderungen gerichtet. Hier kommen die Stoffgruppen Asphalt, Beton, Hochofenschlacke , Naturwerkssteine, Gleisschotter, Kies, Sand, Ziegel- und Mauerwerk entweder einzeln oder als Gemisch zur Anwendung.

Im Hochbau befindet sich der Einsatz von sogenanntem Betonsplitbeton mit Zuschlagsstoffen aus dem Baustoffrecycling im Erprobungsstadium. Da hier besondere Anforderungen an die Festigkeit und Langlebigkeit gerichtet sind, ist der Einsatz von Recyclingmaterialien bislang weitgehend auf den Tiefbau beschränkt.

Zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung ist es sinnvoll, schon im Stadium der Planung einer Baumaßnahme den Abbruch und den möglichen Verwertungsweg der dabei anfallenden Materialien mit einzuplanen.

3.3 Altlastensanierung und Flächenrecycling

Die mehr als 100jährige Industrievergangenheit hat zu einer hohen Beanspruchung von Flächen geführt, die entweder als Produktionsstandorte oder als Lager für Reststoffe (Deponien) genutzt wurden. Die Sanierung und Wiedernutzbarmachung solcher Flächen ist daher nicht nur allein unter dem Aspekt einer unmittelbaren Gefahrenabwehr, sondern auch unter dem Gesichtspunkt einer ökologisch verträglichen Flächennutzung zusehen, da die Wiedernutzung solcher Flächen den Neuverbrauch ökologisch wertvoller Landschaftsteile vermindert.

Unter Altlasten versteht man im allgemeinen Altstandorte (d. h. Standorte von Industrieanlagen, Produktionsanlagen u. ä.) und Altablagerungen (alte Deponien, geordnete oder auch wilde Ablagerungen von Reststoffen). Der Gesetzgeber spricht dann von einer Altlast, wenn von dem Altstandort oder der Altablagerung unmittelbare Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung ausgehen, d.h. z.B. für die Trinkwasserversorgung, für die Bevölkerung, aber auch allgemein für die Ökologie. In der Bundesrepublik Deutschland wurden bisher ca. 80.000 Altlasten lokalisiert (Saarland ca. **3.500**). Da die systematische Erfassung von Altlasten jedoch noch nicht abgeschlossen ist, gehen Experten davon aus, dass sich diese Zahl noch wesentlich erhöhen, ja u. U. sogar verdoppeln wird.

Die Bearbeitung einer konkreten Altlastenproblematik vollzieht sich in drei Schritten:

1. Lokalisierung und Analytik
2. Beurteilung des Gefährdungspotentials und Sanierungskonzeption
3. Sanierung

Lokalisierung und Analytik der Altlast

Durch geeignete analytische Verfahren (Bodenproben, Bodenluftmessungen, Grundwassermessungen etc.) wird die Art und das Ausmaß der Schadstoffbelastung des Bodens festgestellt. Dabei spielen neben der Art und Menge der einzelnen Schadstoffe auch ihre Bindung an den Boden, ihre Mobilität und die Einbringung in die einzelnen Transmissionspfade (Grundwasser, Luft etc.) eine wesentliche Rolle. Die Zahl der einzelnen Schadstoffe kann aufgrund der Komplexität industrieller Produktionen sehr groß sein, jedoch haben sich bei den meisten Schadstofffällen einige typische Altlastenschadstoffgruppen herauskristallisiert:

- aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Xylol, Toluol, ehem. Industrie, Teerfabrikation, Gaswerke, Kokereien),
- polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK (Fluorene, Anthraene, Benzopyrene etc.; Teerproduktion chemische Industrie)
- Schwermetalle (Blei, Arsen, Kadmium; Metallverarbeitung Hüttenbetriebe); chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) (Lösungsmittelindustrie, Metallverarbeitung)

Beurteilung des Gefährdungspotentials und Sanierungskonzeption

Nach Vorliegen aller notwendigen analytischen Erkenntnisse muss die Altlast hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials beurteilt und ggf. ein Sanierungskonzept erarbeitet werden. Die Beurteilung richtet sich nach der unmittelbaren Gefährdung, die für die Bereiche Luft, Boden und Wasser von den Schadstoffen ausgehen, sowie die daraus resultierenden Gefährdungen für die Bevölkerung bzw. die Ökologie. Zur Beurteilung wurde eine ganze Reihe von unterschiedlichen Schadstofflisten und Verfahrensweisen entwickelt (Hollandliste, Baden-Württemberg-Modell, Berlinliste etc.), die jedoch in der Regel nur eine erste grobe Voreinschätzung und Voreinordnung erlauben. Bei einer konkreten Sanierung muss in der Regel von allen beteiligten Behörden eine Einzelfallentscheidung getroffen werden.

Sanierung

Ergibt die Beurteilung, dass eine Gefährdung der Öffentlichkeit vorliegt, so muss diese Altlast saniert werden. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwei Verfahrensweisen: Die Sicherung und die Dekontamination.

Bei der Sicherung werden die Transmissionspfade der Schadstoffe nachhaltig unterbrochen.

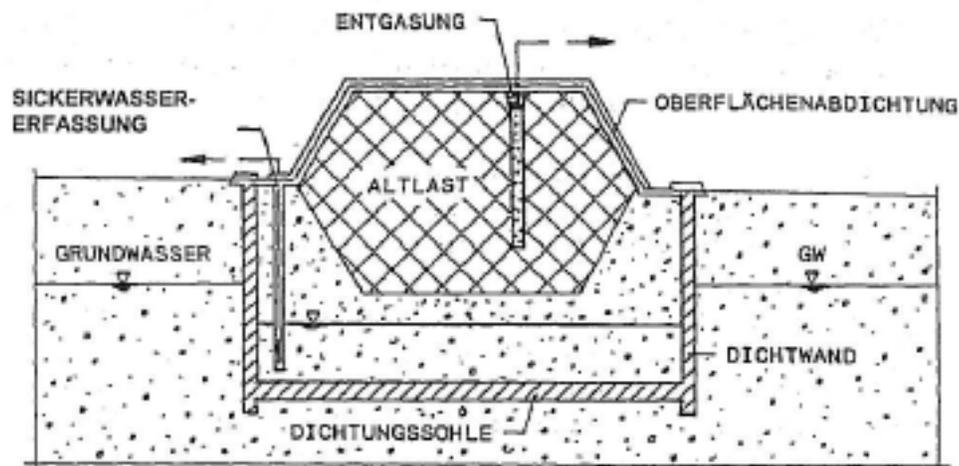


Abb. 83: Prinzip der Einkapselung (schematisch)

Dies geschieht z. B. durch Einkapseln der Altlast (s. Bild) mittels Spundwänden (Beton, Bentonit etc.) und Versiegelung der Oberfläche um das Eindringen von Oberflächenwasser bzw. Regenwasser zu verhindern. Darüber hinaus gibt es Möglichkeiten, die Schadstoffe im Boden selbst durch geeignete Zusatzstoffe, wie z.B. Bentonit, Wasserglas u.ä. zu immobilisieren. Mit der Sanierung verbunden ist immer der Aufbau einer Kontrollanalytik, die die Wirksamkeit der Sicherungsmaßnahmen über einen langen Zeitraum hinaus permanent überwacht. Sicherungsmaßnahmen können grundsätzlich auch als Zwischenlösungen durchgeführt werden, um spätere Dekontaminationen vorzubereiten. Bei der eigentlichen Dekontamination, d. h. Bodenreinigen, unterscheidet man Insitu und **Exsitu-Verfahren**. Bei **Insitu-Verfahren**

wird der Boden in seiner natürlichen Umgebung belassen (kein Bodenaustausch). Dies bedeutet in aller Regel, dass die Schadstoffe nicht vollständig entfernt werden können, sondern eine gewisse Restkonzentration verbleibt. Die wichtigsten Insitu-Verfahren sind: Bodenluftabsaugen, Grundwasserreinigung, Bodenspülung und biologische Insitu-Verfahren, bei denen dem Boden biologische Substrate, z.B. Bakterien zugeführt werden, die innerhalb der Bodens die Schadstoffe biologisch abbauen.

Bei Exsitu-Verfahren wird der Boden zunächst ausgehoben und einer nachhaltigen Bodenreinigung zugeführt. Man unterscheidet im Einzelnen folgende Verfahren:

Biologische Bodenreinigung

Eine Reihe von organischen Organismen (z.B. Bakterien) sind in der Lage, organische Schadstoffe quasi natürlich abzubauen. Das Verfahren ist im Prinzip einer Kompostierung vergleichbar, es können sowohl bereits im Boden vorhandene Bakterien durch Zusatz von Nährsubstraten angeregt werden, als auch speziell gezüchtete Bakterien zur Schadstoffbeseitigung zugesetzt werden. Diese Verfahren werden insbesondere bei Verunreinigung durch Mineröl-Kohlenwasserstoffe (Ölunfälle, Tankstellen etc.) eingesetzt.

Physikalisch-chemische Verfahren (Waschverfahren)

Bei den physikalisch-chemischen Verfahren wird der Boden durch Zufuhr von Energie aufgeschlossen (Mischer, Hochdruckstrahl etc.) und die Schadstoffe durch Wasser (ggf. mit Tensid-Zusatz) ausgewaschen. Das Waschwasser wird anschließend mit entsprechenden Klärverfahren behandelt, so dass die Schadstoffe sich in der Schlamm- bzw. Feinfraktion konzentrieren. Im Gegensatz zu biologischen und thermischen Verfahren werden die Schadstoffe hier nicht zerstört, sondern lediglich in der Feinfraktion aufkonzentriert. Diese Fraktion muss dann einer endgültigen Entsorgung (thermische oder biologische Behandlung bzw. Deponierung) zugeführt werden.

Physikalisch-chemische Verfahren finden insbesondere dort Anwendung, wo große Mengen an Boden bearbeitet werden müssen, bzw. wo die Schadstoffe auch durch die anderen Verfahren nicht nachhaltig zerstört werden können (z.B. Schwermetallverunreinigungen u. ä.).

Thermische Verfahren

Bei thermischen Verfahren werden die Schadstoffe durch Zufuhr von Wärmeenergie zerstört bzw., sofern es sich um Schwermetalle handelt, durch entsprechende Versinterung mit den Bodenpartikeln immobilisiert. Bei der Anwendung thermischer Verfahren ist neben der nachhaltigen Zerstörung der eigentlichen Schadstoffe die Neubildung von anderen Schadstoffen zu beachten (z.B. Dioxine), so dass in aller Regel aufwendige Rauchgasreinigungsverfahren notwendig sind (s. Bild 61 thermische Bodenreinigungsanlage).

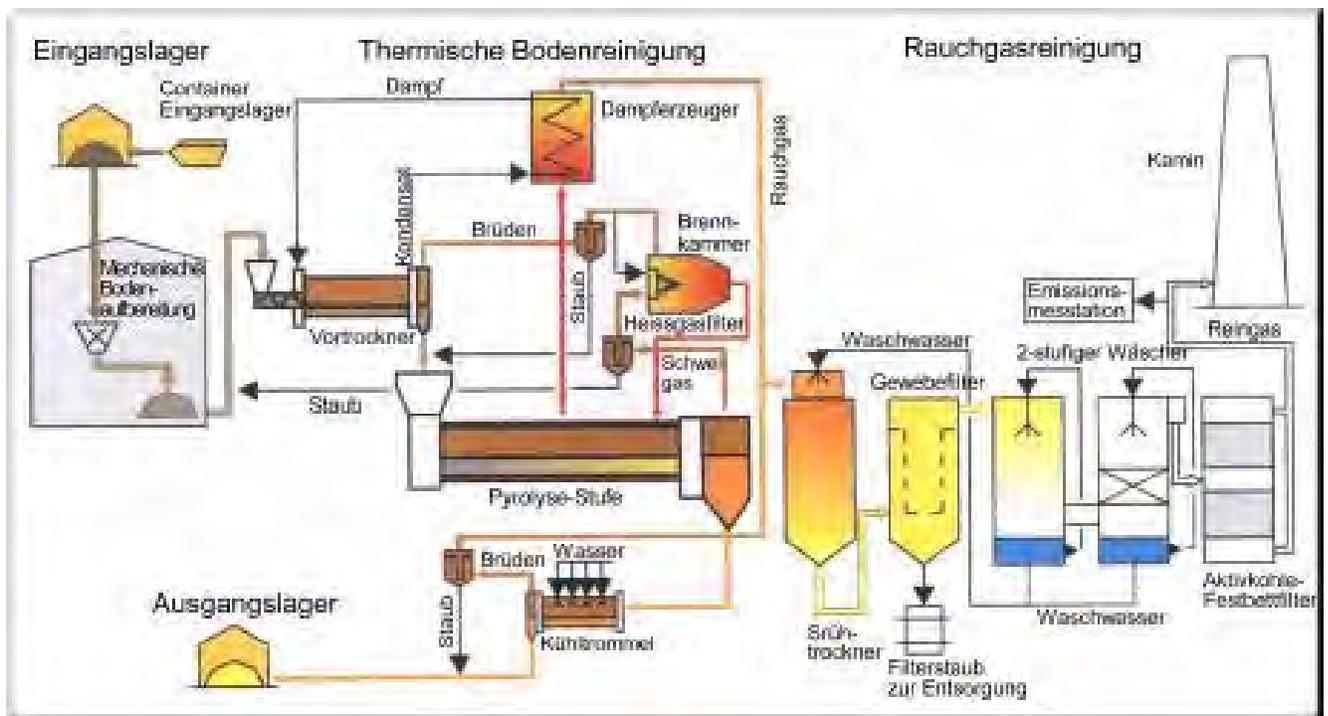


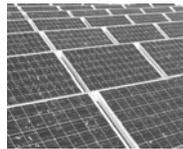
Abb. 84: Prinzipialschaltbild der thermischen Bodenreinigung

Neben den angesprochenen Verfahren zur Beseitigung der Schadstoffe gibt es naturgemäß auch noch die Möglichkeit, den kontaminierten Boden auf entsprechend zugelassenen Deponien zu lagern, dies stellt jedoch langfristig gesehen keine Lösung der Altlastproblematik, sondern lediglich eine Verlagerung der Schadstoffe dar.

Aufbereitung von alten Kohlehalden und Schlammweihern

Die Aufbereitung von alten Kohlehalden und Schlammweihern stellt einen Sonderfall des Flächenrecyclings dar, da hier keine eigentlichen Altlasten bearbeitet werden, sondern vielmehr durch den Bergbau genutzte Flächen einer anderen Wiederverwertung zugeführt werden können. Bei der untertägigen Förderung von Steinkohle entstehen neben den großen Waschbergehalten (taubes Gestein, das neben der Kohle aus der Erde gefördert wird) noch umfangreiche Kohleschlammweiher, die die Absatzprodukte bei der Kohleaufbereitung (Flotation) enthalten. Die Flächen, die durch diese Kohlehalden bzw. Schlammweiher beansprucht werden, können ohne weitere Aufbereitung nicht wiedergenutzt werden, da eine Bebauung der Kohlehalden und Schlammweiher aus bodenmechanischen Gründen nicht möglich ist. Darüber hinaus enthalten die Kohlehalden, die vor mehr als 60 Jahren errichtet wurden, in aller Regel mehr als 10 % Restkohle und neigen daher zur Selbstentzündung. Dies führt zu teilweise jahrzehntelangen Schwelbränden innerhalb der Halde bis diese ausgebrannt ist und nur noch rote Erde übrig bleibt. Da viele dieser Schlammweiher und Halden in unmittelbarer Nähe von Wohnsiedlungen und Städten liegen, stellen sie für die Gemeinden ein wertvolles Entwicklungspotential dar. Durch die Anwendung kombinierter Aufbereitungsverfahren ist es möglich, diese Deponien des Steinkohlebergbaus so aufzubereiten, dass eine Wiedernutzung möglich ist. Dazu wird der vorhandene Kohleschlamm in einer thermischen Trocknungsanlage soweit getrocknet, dass er in Kohlekraftwerken einsetzbar ist. Die in den Halden enthaltene Kohle wird durch ein mehrstufiges Waschverfahren abgetrennt und ebenfalls einer thermischen Nutzung zugeführt. Die verbleibenden Waschberge (Grobanteile und Feianteile) können durch Zusatz geeigneter Materialien, wie z.B. Kraftwerksreststoffe

(Wirbelschichtasche) soweit verfestigt werden, dass ein tragfähiger Baugrund entsteht. So konnte z.B. durch die Kombination der beiden Verfahren (Fa. NeuLand) in einer saarländischen Gemeinde ein Gebiet von ca. 300.000 m² als Gewerbefläche aufbereitet werden. Dabei wurden ca. 400.000 t Steinkohle gewonnen.



Kommunale Technik I

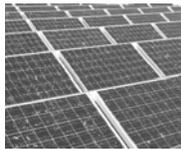
Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

IV. Ver- und Entsorgungskonzepte

- 1. Umfelddefinitionen**
 - 1.1. Versorgungskonzepte**
 - 1.2. Entsorgungskonzepte**

- 2. Versorgungskonzepte**
 - 2.1 Formulierung der Zielsetzung, Auswahl der Methoden zur Konzepterstellung und IST-Analyse des Betrachtungszeitraumes**
 - 2.2 Darstellung von Möglichkeiten zur Energieeinsparung/rationalen Energieverwendung und dem Einsatz regenerativer Energien**
 - 2.3 Ausarbeitung von Grobkonzepten und Umsetzungsempfehlungen**

- 3. Verbrauchsatlanten und Entsorgungsstrukturpläne**
 - 3.1 Wärmeetlas**
 - 3.2 Abfallatlas**



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

- 4. Energiestudien, Energiepläne**
- 5. Entsorgungskonzepte**
- 6. Umweltmanagement**
 - 6.1 EG-Öko-Audit**
 - 6.2 ISO 14000 ff. Umweltmanagement (UM) Normenreihe**
 - 6.3 Die Kommunalökologie**

1. Umfelddefinitionen

1.1 Versorgungskonzepte

Die Ver- und Entsorgungsstrukturen bilden ein wesentliches Element in der Gestaltung des Lebensraumes einer hochtechnisierten Gesellschaft. Daraus ergibt sich für Konzepte, die zukünftige Ver- und Entsorgungsstrukturen mit ihren vielfältigen Anforderungen darstellen sollen, eine zentrale Bedeutung.

Die Anforderungen an die Energieversorgung mit Strom und Wärme haben sich mit den zunehmenden Umweltbelastungen einerseits und einer sich abzeichnenden Ressourcenknappkeit bei einer Reihe von Primärenergieträgern andererseits in ihrer Gewichtung deutlich verändert. Die Grundanforderungen „sicher“ und „bezahlbar“ müssen um die Zielsetzung „umwelt-/ressourcenschonend“ erweitert werden.

An eine zukunftsweisende Konzeption für eine Energieversorgung mit Strom und Wärme werden daher heute folgende wesentliche Anforderungen gestellt:

- Die **Sicherheit** der Energieversorgung ist nach wie vor von höchster Priorität, der insbesondere in unserer hochtechnisierten und zentralisierten Gesellschaft eine zentrale Rolle zukommt. In diesem Zusammenhang sind u. a. die Bestrebungen zu sehen, eine gewisse Dezentralisierung der Energieerzeugung-/versorgung anzustreben.
- Die **Bezahlbarkeit** steht in unmittelbarem Zusammenhang sowohl mit den Anforderungen an einen Versorgungssicherheitsgrad als auch z. B. den wirtschaftlichen Bewertungskriterien von Folgekosten aus der Energieversorgung (Umweltschäden, Endlagerstätten, u. ä.).

- Die Umwelt- und Ressourcenschonung schließlich stellt eine Anforderungsgröße dar, die mit fortschreitender Zeit immer zentralere Bedeutung erhalten wird. Dies bedeutet, dass zwar zwingend notwendige Maßnahmen möglicherweise aufgeschoben werden können, diese aber zu einem späteren Zeitraum dann jedoch mit deutlich höherem technischem und wirtschaftlichem Aufwand umgesetzt werden müssen.

Energieversorgungskonzepte bilden vor diesem Hintergrund ein zentrales Instrumentarium, um alle Möglichkeiten einer sicheren, umwelt- und ressourcenschonenden Energieversorgung zeitnah und zielgerichtet zu erfassen und Realisierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Die Zielsetzung eines Energieversorgungskonzeptes muss daher

- die Neustrukturierung eines Versorgungsbereiches
- die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit einer Energieversorgung sowie
- die Reduzierung des Primärenergieverbrauches

beinhalten. Wesentliche Hilfsmittel zur Umsetzung dieser Ziele sind die klare und sinnhafte Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, die detaillierte Darstellung der bisherigen Versorgungsstruktur sowie eine detaillierte Erfassung der versorgungsrelevanten Daten.

Energieversorgungskonzepte wurden in den Jahren 1988 - 1991 in allen saarländischen Gemeinden durchgeführt. Diese Konzepte bilden eine wesentliche Grundlage als Handlungsrahmen für zukünftige Versorgungsstrukturen. Auch für die Landeshauptstadt Saarbrücken wurden eine Reihe von Versorgungskonzepten ausgearbeitet.

Die Stadtwerke Saarbrücken haben bereits 1980 mit der Konzeption des **Örtlichen Versorgungskonzeptes (ÖVK) Saarbrücken 1980 - 1995** die Grundlagen für die Verminderung der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 1995 um 15 % gelegt. Dieses Ziel ist mit den vier Standbeinen des ÖVK's Energieeinsparung, Nutzung von Abfallenergie, Nutzung von Regenerativen Energien und Einsatz von Kohle in hocheffizienten Heizkraftwerken bereits im Jahre 1990 erreicht worden. Insbesondere die verstärkte Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung hat zu diesem bemerkenswerten Erfolg beigetragen.

Mit dem nachfolgenden Saarbrücker Zukunftskonzept Energie ist die Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 um mindestens 25 %, den Empfehlungen der Enquete-Kommission folgend, festgeschrieben worden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist neben erheblichen Energieeinsparungen (latente Energiebeschaffung) der verstärkte Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auf Kohle- und Erdgasbasis (aktive Energiebeschaffung) unverzichtbar. Ebenso stellt die intensive Nutzung regenerativer Energien ein wesentliches Instrument zur CO₂-Emissionsminderung dar.

Die Saarbrücker Energiestudie 2005, im April 1994 vorgestellt, zeigt nun detailliert auf, welcher Handlungsrahmen für die Stadtwerke Saarbrücken AG bei der Umsetzung der Enqueteempfehlungen besteht und wie das Ziel der CO₂-Emissionsminderung um 25 % bis zum Jahr 2005 im Detail zu erreichen ist (siehe Pkt. 4.)

1.2 Entsorgungskonzepte

Der „Technischen Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen“ (TA Siedlungsabfall) sind im Bundesanzeiger Nr. 99 vom 29.05.1993 „Ergänzende Empfehlungen zur TA Siedlungsabfall“ beigefügt worden, die in Anlage 1 auch einen „Leitfaden für die Aufstellung eines integrierten Abfallwirtschaftskonzeptes“ enthalten.

Gem. KrW/AbfG sind Abfallwirtschaftskonzepte sowohl von größeren (abfallmengenrelevanten) Unternehmen als auch von öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (i. d. R. kreisfreie Städte und Landkreise, im Saarland: EVS) zu erstellen.

Grundlage aller Abfallwirtschaftskonzepte ist der Umgang mit den Abfällen nach einer allgemein anerkannten Prioritätenfolge:

Abfallvermeidung vor Abfallverwertung (stofflich/thermisch) vor Abfallentsorgung

Durch Abfallvermeidung kann das Abfallaufkommen nach heutigen Erkenntnissen um ca. 10 - 15 % verringert werden. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Förderung der Eigenkompostierung von Bioabfällen.

Abfallverwertung kann sowohl stofflich als auch thermisch erfolgen. Vom Gesetz her sind beide Verwertungsverfahren gleichwertig einzustufen. Das Potential für die stoffliche Verwertung kann auf bis zu 50 % des nach allen Anstrengungen zur Abfallvermeidung verbleibenden Abfallaufkommens veranschlagt werden. Die verbleibenden 50 % müssen nach den bestehenden Vorschriften spätestens zum Jahre 2005 vollständig verbrannt werden (Ausnahme: inerte Stoffe), da eine Deponierung unbehandelter, d. h. nicht schadstoffimmobilisierter Abfälle zur Vermeidung künftiger Altlasten nicht mehr zulässig ist.

Abfallentsorgung im Sinne von Deponierung betrifft ab 2005 nur noch inerte Stoffe, d. h. Abfälle, die entweder aufgrund ihrer ursprünglichen Struktur bei einer Ablagerung keine Schadstoffe freisetzen bzw. durch thermische Behandlung in einen derartigen Zustand versetzt wurden (Schlacke). Auch Verbrennungsrückstände (ca. 30 % des Inputs in einer Verbrennungsanlage) können verwertet werden, sofern sie den Anforderungen, z. B. als Massenbaustoff, entsprechen.

In der Entwicklung von Entsorgungskonzepten werden sich dabei jedoch unterschiedliche Gewichtungen einstellen, die sowohl von der Siedlungsstruktur, als

auch von politischen Rahmenbedingungen abhängig sein können (siehe Pkt. 5). Als aktuelle Problemfelder in der Kommunalen Abfallwirtschaft stellen sich z. Z. dar:

1) Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW/AbfG) und TA Siedlungsabfall (TASi)

Das KrW/AbfG entzieht den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (örE) die Abfälle zur Verwertung aus anderen Bereichen als den Haushaltungen. Die tatsächlich durch den örE abzunehmenden Abfallmengen sind schwer kalkulierbar. Es muss auch Vorsorge betrieben werden für „Abfälle zur Verwertung“, die unerwartet zur Beseitigung anfallen (können).

Die TASi fordert die 100 %-ige Behandlung der Abfälle vor Ablagerung. Damit besteht quasi ein Zwang zur Nutzung teurer Anlagen (hohe Fixkosten). Die Auslastung der Anlagen muss gesichert werden

2) Kostengünstige Entsorgung bei ungünstigen Bedingungen

Es besteht ein Spannungsfeld zwischen der Entsorgungspflicht (für Abfälle zur Beseitigung), schwer kalkulierbaren Abfallmengen (Recycling, Wettbewerb, Konjunktur) und dem Zwang (TASi) zur Nutzung relativ unflexibler Behandlungsanlagen.

2. Versorgungskonzepte

Versorgungskonzepte können nach regionalen, örtlichen/kommunalen **und objektbezogenen Energieversorgungskonzepten** unterschieden werden. Regionale, örtliche und objektbezogene Versorgungskonzepte unterscheiden sich nicht in ihrer Funktion. Sie sind vielmehr für den örtlichen Ausbau der leitungsgebundenen Energien entwickelt worden, um ein sinnvolles Zusammenwirken von Strom, Erdgas, der Nutzung des wirtschaftlichen Fernwärmepotentials auf der Basis von Kraft-Wärm-Kopplung und industrieller Abwärme sowie regenerativen Energien zu unterstützen.

Insbesondere Kommunale Energieversorgungskonzepte bilden eine wesentliche Grundlage für eine zielgerichtete Entwicklung von Städten und Gemeinden in Energieversorgung. Das nachfolgende Ablaufschema zeigt die wesentlichen Schritte bei der Erstellung eines Energieversorgungskonzeptes:

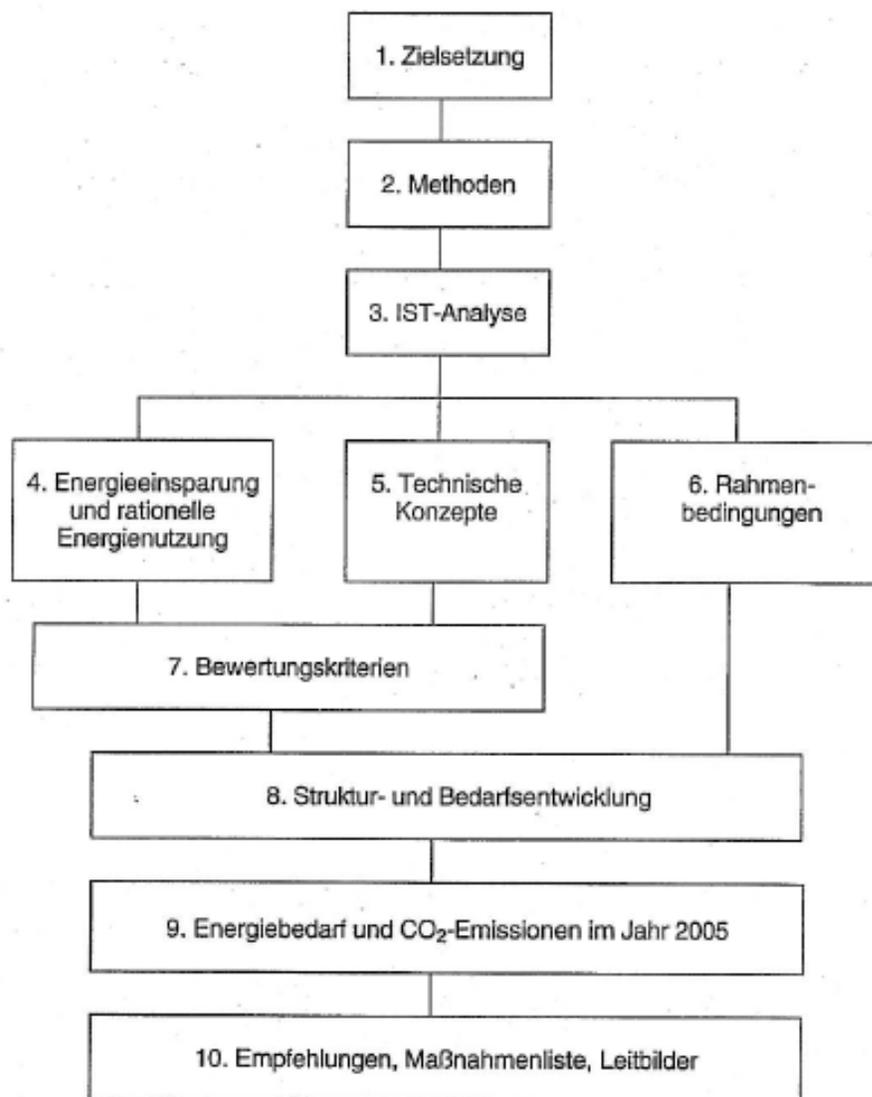


Abb. 85: Prinzipablaufschaema bei der Erstellung eines Energiekonzeptes
(Quelle: Modellstudie Energiekonzept, FH Bingen)

Der Aufbau eines Energieversorgungskonzeptes lässt sich thematisch in die drei nachfolgenden Hauptarbeitspakete gliedern:

- Formulierung der Zielsetzung, Auswahl der Methoden zur Konzepterstellung und IST-Analyse des Betrachtungsraumes
- Darstellung von Möglichkeiten zur Energieeinsparung /rationellen Energieverwendung und dem Einsatz regenerativer Energien
- Ausarbeitung von Grobkonzepten und Umsetzungsempfehlungen

2.1. Formulierung der Zielsetzung, Auswahl der Methoden zur Konzepterstellung und IST-Analyse des Betrachtungsraumes

Das Ziel eines Energieversorgungskonzeptes wird, wie bereits unter Punkt 1 dargestellt, in der Regel in der Neustrukturierung eines Versorgungsbereiches, der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit einer Energieversorgung sowie der Reduzierung des Primärenergieverbrauches bestehen.

Damit die Möglichkeiten, wie diese Ziele erreicht werden können, umfassend und fundiert dargestellt werden können, ist zunächst eine detaillierte IST-Analyse des Betrachtungsraumes (z. B. Land, Kommune, Stadt, Neubaugebiet, o. a.) bzw. des Objektes (z.B. Krankenhaus, Hallenbad, Verwaltungsgebäude, o. .a.) durchzuführen. Für Betrachtungsräume (Siedlungsgebiete) gibt es eine Vielzahl von Methoden, diese IST-Analyse zu erstellen. Dazu zählen unter anderem

- die Bestimmung des Wärme-/Strombedarfs über Durchschnittswerte
- die Siedlungszellenmethode, in der die Bebauungsstrukturen als Grundlage für die Wärmebedarfsermittlung systematisch erfasst werden.
- die gebäudescharfe, aktuelle Erhebung des Wärme-/Strombedarfs

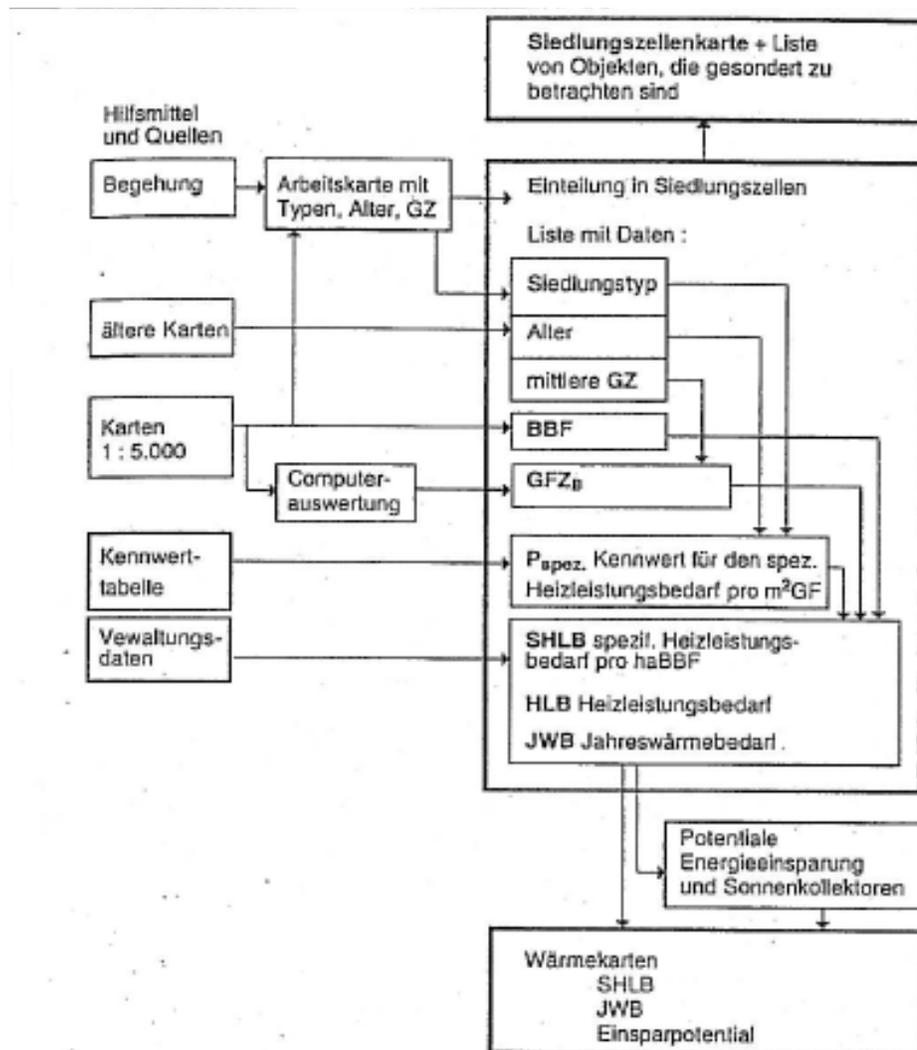


Abb. 86: Siedlungszellenmethode als Beispiel einer Methode zur Grundlagenermittlung in einem Energiekonzept
 [Quelle: Modellstudie Energiekonzept, FH-Bingen]

Die Siedlungszellenmethode als eine der gebräuchlichsten Methoden zur Ermittlung von Raumwärmebedarf im Rahmen von Energieversorgungskonzepten benötigt eine umfangreiche Siedlungstypologie. Unterschieden wird hierbei nach folgenden Siedlungstypen:

- ST 1: Ein- und Mehrfamilienhaus niedriger Dichte
- ST 2: Dorfkern und Einfamilienhaussiedlung hoher Dichte
- ST 3: Reihenhaussiedlung
- ST 4: Zeilenbebauung mittlerer Dichte
- ST 5: Zeilenbebauung hoher Dichte und Hochhäuser
- ST 6: Blockbebauung
- ST 7: Citybebauung ab Mitte 19. Jahrhundert
- ST 8: Industrie- und Lagergebäude

Wird ein Untersuchungsraum mit diesen Siedlungstypen vollständig beschrieben, so bedarf es noch einer Zuordnung spezifischer Verbrauchsgrößen für die einzelnen Gebäudetypen um eine vollständige, detaillierte Aussage über die Wärmebedarfsstruktur machen zu können.

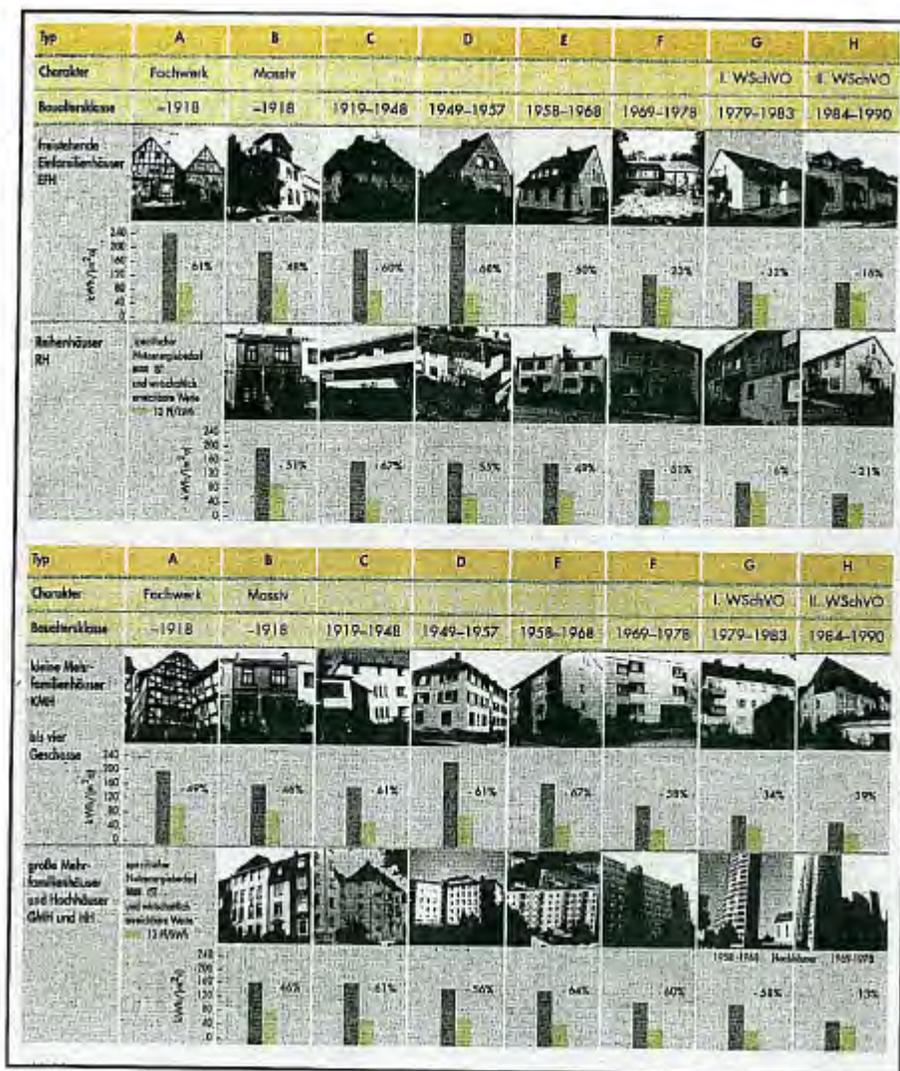


Abb. 87: Gebäudetypologie Wohngebäude;
 (Quelle: TWU „Einsparung beim Heizwärmebedarf“, 10‘ 95)

2.2 Darstellung von Möglichkeiten zur Energieeinsparung/rationellen Energieverwendung und dem Einsatz regenerativer Energien

Die Ermittlung des Potentials an Energieeinsparmöglichkeiten bzw. rationeller Energieverwendung für eine Stadt oder Region gehört zu den Standardschritten bei der Erstellung von Energiekonzepten. Mit den detaillierten Basisdaten aus IST-Analyse des Betrachtungsraums kann ein umfassender „SOLL - IST Vergleich“ durchgeführt werden,

aus dem sich unmittelbar das theoretische Energieeinsparpotential ergibt. Die Soll-Größe wird vorgegeben durch den Stand der Technik, gesetzlichen Rahmenbedingungen (z. B.: Wärmeschutzverordnung, CO₂-Emissionsminderung) oder Vorgaben, welche Verbrauchswerte zukünftig in dem Betrachtungsraum erreicht werden sollen.

Dieser zentrale Punkt eines Energieversorgungskonzeptes zeigt qualitativ und quantitativ auf, welches Energieeinsparpotential im Betrachtungsraum vorhanden ist. Wird die weitere Reduzierung von Primärenergieträgern notwendig, um die gewünschten Ziele (z.B. CO₂-Emissionsreduzierung) zu erreichen, so ist die Darstellung des Potentials notwendig, das über regenerative Energien substituiert werden kann.

Der effiziente Einsatz der verschiedenen regenerativen Energiearten setzt voraus, dass alle Möglichkeiten der Energieeinsparungen und die Verwendung der Energiearten aufeinander aufbauen und abgestimmt sind. Der Einsatz regenerativer Energien ist somit schrittweise einzuplanen. Mit jedem Schritt der Energieeinsparung bzw. der rationellen Energieverwendung sinkt der Bedarf an nichtregenerativer Primärenergie und der relative Anteil an regenerativen Energien steigt.

Nach der Identifizierung dieser Reduktionspotentiale (Energieeinsparung - Rationelle Energieverwendung - Einsatz regenerativer Energien) verbleibt ein Rest-Energiebedarf den man effizient mit dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung in Nahwärmeinseln und -netzen decken kann. Für den wirtschaftlichen Betrieb eines Nahwärmesystems mit einem Blockheizkraftwerk ist jedoch eine relativ hohe Energiedichte (und eine hohe Jahres-Volllaststundenzahl) notwendig, die nach der Reduzierung des Wärmebedarfs im Rahmen des Konzeptes seltener vorhanden sein wird als vor der Erstellung des Energieversorgungskonzeptes. Es wird also häufig schon vorweggenommen, dass Energieanlagen bei stärkerem Einsatz von regenerativen Energien unwirtschaftlich werden können.

Nachdem z.B. geeignete BHKW-Standorte identifiziert sind, kann dargestellt werden, welche Blockheizkraftwerke mit Biomasse betrieben werden können. Weitere Biomasse kann u. U. auch mangels geeigneter BHKW-Standorte z. B. für Einzel- bzw. Sammelfeuerungsanlagen zur Verfügung stehen. Weiter werden in der Regel die Möglichkeiten der solarthermischen Energienutzung, der Photovoltaik, der Windenergienutzung, und der Wasserkraftnutzung untersucht. Reicht das Potential an regenerativen Energien zur Deckung des reduzierten Energiebedarfs nicht aus (Regelfall), so greift man auf die fossilen Brennstoffe Erdgas und Öl (in dieser Prioritäten-Reihenfolge) zurück. Der Einsatz dieser Brennstoffe bestimmt den verbleibenden CO₂-Ausstoß und damit den Nachhaltigkeitsgrad der im Energieversorgungskonzept aufgezeigten Wärme- und Stromversorgung.

2.3 Ausarbeitung von Grobkonzepten und Umsetzungsempfehlungen

Das Energieversorgungskonzept beinhaltet der Bestandsaufnahme (IST-Analyse) und der Darstellung der Einsparpotentiale immer auch einen Bereich von Einzeluntersuchungen, in denen Teilkonzepte grob ausgearbeitet werden und in ihren technischen und wirtschaftlichen Hauptgrößen dargestellt werden. In Variantenrechnungen werden unterschiedliche technische Lösungen zur Umsetzung der im Energiekonzept aufgezeigten Potentiale gegenübergestellt. Neben der technischen Realisierbarkeit eines Lösungsansatzes werden insbesondere auch die betriebswirtschaftlichen Randbedingungen untersucht:

Das nachfolgende Bild 88 zeigt als Ergebnis eines Energiekonzeptes für ein Hallenbad in Saarbrücken das technische Konzept zur Realisierung einer dezentralen KWK-Anlage. Diese technische Lösung stellt das Ergebnis einer umfassenden Variantenrechnung für eine Kraft-Wärme-Kopplungsgestützte Wärmeversorgung dar. Aus diesem Diagramm sind im Einzelnen ersichtlich:

- max. Wärmebedarf des Hallenbades (800 kW)
- Jahresarbeit (1.900 MWh)

- Größe des BHKW-Moduls (190 kW_{th})
- Größe der Kesselanlage (800 kW_{th})
- Anteil des BHKW-Moduls an Leistungsbereitstellung (24 %)
- Anteil des BHKW-Moduls an der Jahresarbeit (58 %)
- Laufzeit des BHKW-Moduls (ca. 5.800 h)

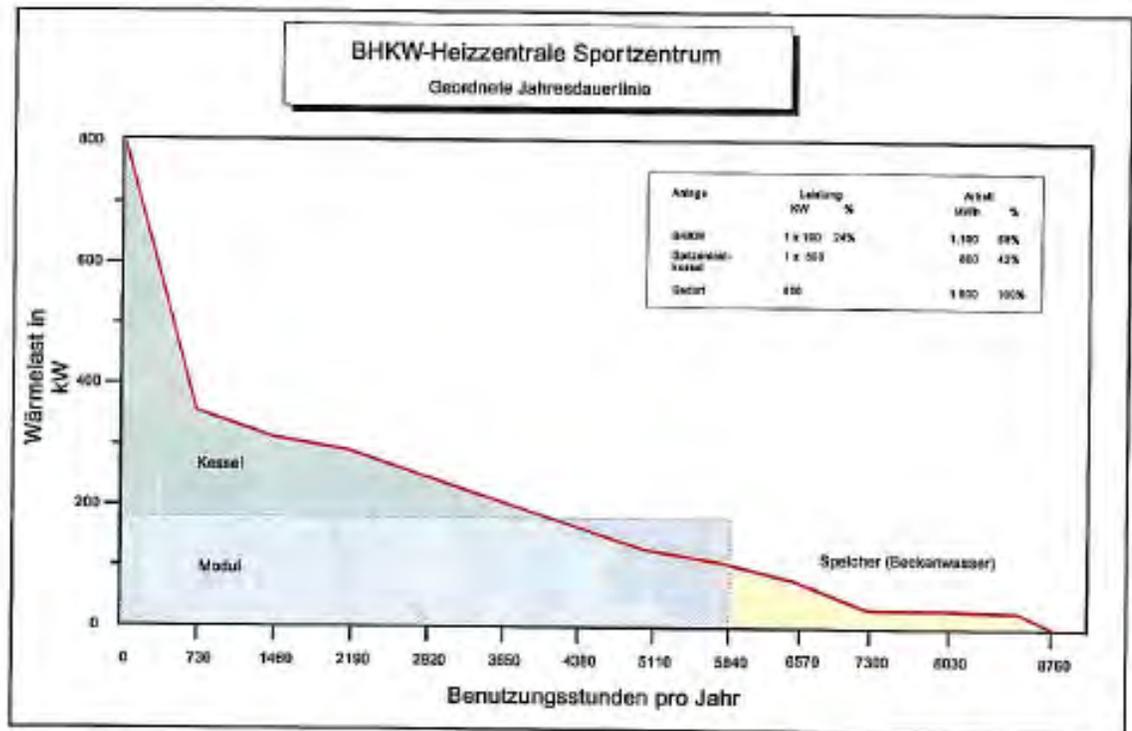


Abb. 88: Jahresdauerlinie(Wärmebedarf) mit Wärmeerzeugern BHKW und Kesselanlage

Welche Auswirkungen eine derart optimierte Versorgungslösung haben kann, zeigt die nachfolgende Tabelle. Gegenüber der ursprünglichen Versorgung des Hallenbades aus einer Kesselanlage konnte der Primärenergieeinsatz unter Berücksichtigung der Stromerzeugung in der dezentralen BHKW-Anlage um rd. 30 %, der CO₂-Ausstoß (Brennstoffwechsel von Erdgas/Kohle auf Erdgas) sogar um rd. 50 % gesenkt werden.

Emissionsdaten:		Kessel ±	BHKW +	Einsparung	Einsparung
		Kraftwerk	Kessel	absolut	in %
PE-Einsatz	MWh/a	4.092	2.894	1.199	29,3
SO ₂	kg/a	740	3	736	99,6
NO _x	kg/a	684	516	168	24,6
Staub	kg/a	64	1	62	98,2
CO	kg/a	878	354	524	59,7
CO ₂	to/a	1.087	553	534	49,2

Tabelle 3: Emissionsvergleichsberechnung aus einem Versorgungskonzept

Erst die umfassende technische und wirtschaftliche Gegenüberstellung von Versorgungslösungen Vergleich oder eine Variantenrechnung für Einzelkonzepte lässt die Erstellung von s. g. „Maßnahmen-Hitliste“ zu. Diese Hitlisten bilden die wesentliche Grundlage der abschließenden Umsetzungsempfehlungen im Rahmen eines Energieversorgungskonzeptes. Die Umsetzungsempfehlungen bilden die wesentliche Diskussionsgrundlage in den Entscheidungsgremien.

Ein besonderes Beispiel für die Durchführung und erfolgreiche Umsetzung eines Energieversorgungskonzeptes stellt die Kreisstadt St. Wendel dar. Hier wurde in den Jahren 1990/91 ein umfassendes örtliches Energieversorgungskonzept erstellt. Neben einer detaillierten IST-Analyse, der Ermittlung des Einsparpotentials im Strom- und Wärmebereich sowie den Einsatzmöglichkeiten von regenerativen Energien wurde die Rekommunalisierung der Energieversorgung für die Kreisstadt St. Wendel in der Gas- und Stromversorgung untersucht. Die Rekommunalisierung, in diesem Fall also die eigenverantwortliche Übernahme der Gas- und Stromversorgung durch die Kreisstadt St. Wendel, stellte sich in weiterführenden Untersuchungen als technisch machbar und wirtschaftlich realisierbar dar. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden im Jahre 1994 die Stadtwerke St. Wendel (SSW) gegründet. Die Stadtwerke St. Wendel haben bis heute die Stromverteilung/-versorgung der Kreisstadt St. Wendel übernommen.

Darüber hinaus wird eine Reihe von Energiedienstleistungen im Bereich der Wärmeversorgung durchgeführt

3. Verbrauchsatlant und Entsorgungsstrukturpläne

3.1 Wärmeatlas

Im Wärmeatlas werden die Zonen mit gleichen Siedlungstypen in einer hochauflösenden Karte des Untersuchungsgebietes eingetragen und als Teilgebiete definiert. Jedes dieser Teilgebiete hat Bebauung mit einheitlichen Energiekennzahlen. Die bebaute Fläche wird für jedes Gebiet zusammengefasst, und man erhält die aufsummierten Heizenergieverbräuche, aufgeteilt in Teilgebiete.

Der Versorgungsbereich der Stadtwerke Saarbrücken AU ist flächendeckend in einem Wärmeatlas erfasst. Dieses umfangreiche Zahlenwerk gibt detailliert Auskunft über Einsatzort und Größe der Energieträger Fernwärme, Erdgas und Strom.

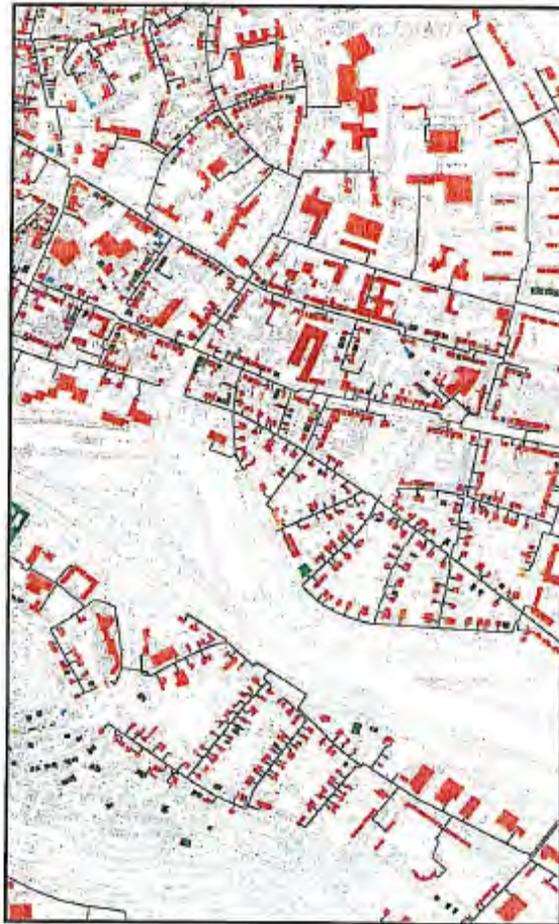


Abb. 89: Auszug aus dem Wärmeatlas der Stadtwerke Saarbrücken AU (Stand 12.96)

3.2 Abfallatlas

Aufkommen und Zusammensetzung der Abfälle in einem definierten Untersuchungsgebiet sind wesentliche Grundlagen zur Entwicklung einer bedarfsgerechten, kommunalen Abfallwirtschafts-Infrastruktur. Diese Parameter sind regional unterschiedlich, was insbesondere auf unterschiedliche Siedlungsstrukturen zurückzuführen ist. Im Saarland gibt es z. B. eine Schwankungsbreite von über 25 %.

Im Allgemeinen werden zur abfallwirtschaftlichen Grundlagenermittlung fünf verschiedene Gebietsstrukturen klassifiziert, denen sowohl unterschiedliche Abfallaufkommen

und -zusammensetzungen als auch Problemstellungen im Hinblick auf eine möglichst sortenreine Getrennterfassung zugeordnet werden können. Eine entsprechend differenzierte Betrachtung des Entsorgungsgebietes empfiehlt sich insbesondere bei der Bioabfallerhebung, z. B. als Grundlage für die Auslegung von Bioabfallverwertungsanlagen.

Folgende Gebietsstrukturen (GS) werden i. d. R. unterschieden und können z. B. in Saarbrücken lokalisiert werden:

GS 1 (City-Gebiet):

Derartige Gebiete sind gekennzeichnet durch eine hohe Bebauung mit mindestens 3 Vollgeschossen, einen hohen Anteil an Gewerbebetrieben, eine starke Behinderung durch den Verkehr, enge bauliche Verhältnisse und schwierig zu erreichende oder weit entfernte Standplätze der Abfallgefäße. Entsprechende Siedlungsstrukturen finden sich nur in einigen Straßenzügen in St. Johann.

GS 2 (geschlossene Mehrfamilienhausbebauung):

Hier findet sich eine enge geschlossene innerstädtische Bebauung mit wenig Gewerbe, mindestens 3 Vollgeschossen oder mindestens 6 Wohneinheiten je Hauseingang. Daraus resultiert eine große Behälterzahl je Ladepunkt und ein oft weiter Antransport der Sammelbehälter. Diese Bebauung ist verbreitet in den Stadtteilen Malstatt, Alt-Saarbrücken, St. Johann und Burbach sowie in den zentrumsnahen Wohngebieten von Dudweiler.

GS 3 (offene Mehrfamilienhausbebauung):

Hierbei handelt es sich um eine Wohnsiedlung mit Mehrfamilienhäusern, mindestens 3 Vollgeschossen und mindestens 6 Wohneinheiten je Hauseingang. Dadurch ergibt sich eine große Behälterzahl je Ladepunkt. Diese Wohnsiedlungen sind im innenstadtnahen

Bereich zu finden. Es handelt sich dabei teilweise um ältere Siedlungsgebiete aber auch um Geschößwohnungsbau wie Eschberg und Folsterhöhe.

GS 4 (Ein- und Zweifamilienhausbebauung):

Bei diesen Gebieten handelt es sich um Wohngebiete, die geprägt sind von Ein- und Zweifamilienhäusern und kleineren Mehrfamilienhäusern mit weniger als 3 Vollgeschossen und weniger als 6 Wohneinheiten je Hauseingang. An den Ladepunkten sind wenige Behälter aufzunehmen. Es besteht ein großer Einfluss von Gartenabfällen. Dieser Gebietstyp wird repräsentiert durch die Wohngebiete am Rand des Bezirks Mitte sowie den größten Teil der Bezirke West, Dudweiler und Halberg.

GS 5 (aufgelockerte Bebauung):

Diese Gebiete weisen eine aufgelockerte ländliche Bebauung auf mit überwiegender Ein- und Zweifamilienhausbebauung. An den Ladepunkten finden sich wenige Behälter in großen, unregelmäßigen Abständen. Diesem Gebietstyp können in nahezu allen Saarbrücker Stadtteilen in zentrumsabgelegenen Lagen Straßenzüge und einzelne Distrikte zugeordnet werden.

4. Energiestudien, Energiepläne

Energiestudien und Energiepläne dienen der mittel- und langfristigen Entwicklung der Energieversorgungsstruktur. In ihnen werden Szenarien entwickelt, die aufzeigen sollen, wie die Energieversorgung vor dem Hintergrund sich ändernder Randbedingungen auch zukünftig sicher, preiswert und ressourcenschonend dargestellt werden kann.

Als Beispiel einer umfassenden Energiestudie wird nachfolgend der Aufbau der „Saarbrücker Energiestudie 2005“, die 1993 im Auftrag der Stadtwerke Saarbrücken AG erarbeitet wurde, dargestellt. Die Veranlassung, eine umfassende Energiestudie in

Auftrag zu geben, stellt die Empfehlung der Enquete-Kommission der Bundesregierung dar, ausgehend vom Basisjahr 1987 eine CO₂-Verringerung um 25 % bis 30 % bis zum Jahr 2005 zu erreichen. Das Ziel der 25 %igen CO₂- Verringerung erfordert erhebliche Anstrengungen, wenn berücksichtigt wird, dass unter Zugrundelegung von Status-Quo-Bedingungen die energiewirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2010 nur zu einer CO₂-Reduktion von 8 % führt.

Im Vordergrund der Untersuchung stand die Fragestellung, welcher Handlungsrahmen für ein kommunales Versorgungsunternehmen zur aktiven Umsetzung der Empfehlung der Enquete-Kommission besteht und welche Konsequenzen sich aus der Realisierung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und rationellen Energieverwendung unter besonderer Berücksichtigung regenerativer Energien ergeben. Durchgeführt wurden diese Untersuchungen von den renommierten Instituten:

- DLR -Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart
- Öko-Institut e.V., Freiburg
- PROGNOSE AG, Basel/Berlin
- ZSW-Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart

Das Arbeitsprogramm für diese Untersuchungen umfasste dabei acht Teilbereiche:

⇒ **IST-Analyse für die Ausgangslage 1987**

Für das Versorgungsgebiet der Stadtwerke Saarbrücken wurde der Endenergieverbrauch nach Sektoren und Energieträgern ermittelt. Das Basisjahr 1987 entspricht den entsprechenden Studien der Enquete-Kommission, so dass eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen möglich wurde.

⇒ **Referenzszenario für das Jahr 2005**

Um eine Meßlatte für die notwendige Eingriffstiefe und die prognostizierte Wirkung der Maßnahmen der Stadtwerke Saarbrücken zu konstruieren, wurde ein Referenzszenario entwickelt, das die Entwicklung des Energiesystems unter bundespolitischen Rahmenbedingungen darstellt.

⇒ **Potentiale zur rationellem Energienutzung**

Im Vordergrund dieses Teilbereiches standen die Maßnahmen zur Energieeinsparung, also die Möglichkeiten zur Minimierung der Energienachfrage

⇒ **Potentiale für regenerative Energien**

Die Möglichkeiten des Einsatzes regenerativer Energien wurden in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht untersucht und mittels repräsentativer Nutzungssysteme dargestellt.

⇒ **Potentiale für die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung**

Die dezentrale KWK stellt neben den regenerativen Energien eine weitere Möglichkeit dar, die zuvor minimierte Energienachfrage mittels rationeller Energieversorgungstechnik zu decken. In der Untersuchung wurde das mögliche Zusammenwirken von regenerativen Energien und dezentraler KWK dargestellt.

⇒ **Einsparszenario für das Jahr 2005**

Aus dem Pool der ermittelten Ressourcen zur Energieeinsparung und rationellen Energieversorgung wurde ein Einsparszenario entwickelt und der Referenzentwicklung gegenübergestellt.

⇒ **Umsetzungs- und Marketingstrategie für das Einsparszenario**

Da sich das Einsparszenario nicht von selbst entwickelt, wurde aufbauend auf einer Hemmnisanalyse der Einsatz von Instrumenten zur Überwindung dieser Hemmnisse und Realisierung der Maßnahmen des Einsparszenarios entwickelt.

⇒ **Betriebs- und regionalwirtschaftliche Bewertung**

Der Schwerpunkt dieses abschließenden Teilkomplexes bestand in der Analyse und Bewertung der Auswirkungen auf betriebs- und regionalwirtschaftlicher Ebene, die mit der Realisierung des Einsparszenarios verbunden sind.

Die Ergebnisse der „Saarbrücker Energiestudie 2005“ zeigen, dass das Ziel der 25%igen CO₂-Reduzierung, entsprechend der Empfehlung der Enquete-Kommission, prinzipiell erreichbar ist. Dazu ist im wesentlichen eine massive Erschließung des Energieeinsparpotentials durch rationelle Energieverwendung und Einsparmaßnahmen, der verstärkte Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, u. a. durch dezentrale Blockheizkraftwerke, der Ausbau der leitungsgebundenen Energieträger Erdgas und Fernwärme sowie der deutlich verstärkte Einsatz von regenerativen Energien, z.B. solarthermischen Anlagen, Biomassenutzung notwendig. Zur Umsetzung der notwendigen Maßnahmen wären jedoch Investitionen notwendig, die die Möglichkeiten kommunaler Energieversorger bei weitem übersteigen und nur durch entsprechende politische Rahmenbedingungen möglich werden.

Doch gerade die politischen Rahmenbedingungen entwickeln sich z. Z. mit dem Vorhaben der Bundesregierung und der Europäischen Union zur Liberalisierung der Strommärkte diametral diesen Notwendigkeiten entgegen.

Die Erstellung einer umfassenden Energiestudie bzw. eines Energieplans bedeutet in der Regel einen beträchtlichen finanziellen und arbeitstechnischen Aufwand. Gelingt es diesen Aufwand bei gleichbleibender Bearbeitungstiefe soweit zu minimieren, dass sich

zukünftig Energiestudien sowohl vom finanziellen Aufwand als auch von der Bearbeitungszeit wesentlich reduzieren lassen, so werden Energiestudien zeitnaher und in einem überschaubaren finanziellen Rahmen erstellt werden können.

Vor diesem Hintergrund erarbeiten die Stadtwerke Saarbrücken, zusammen mit mehreren europäischen Partnern im Rahmen des EU-Programms „APAS“ das „**Energiepaket**“, indem eine automatisierte, rechnergestützte Ausarbeitung einer Energiestudie möglich wird. Die wesentlichen Merkmale dieses „Energiepaketes“ sind folgende:

- Die Anwendbarkeit auf einen begrenzten regionalen Raum oder für eine Kleinstadt als Zentrum einer Region muss gewährleistet sein.
- Alle in einer Region zur Verfügung stehenden regenerativen Energien sollen nach den wirtschaftlichen und infrastrukturell verfügbaren Möglichkeiten maximal genutzt werden.
- Die fossilen Energien, die zur Deckung eines Restenergiebedarfes notwendig sind, sollen bestmöglich (z.B. Kraft-Wärme-Kopplung) eingesetzt werden.
- Die konventionellen und regenerativen Energiequellen sollen optimal aufeinander abgestimmt werden.
- Die Versorgungs- und Entsorgungspunkte sollen gemeinsam betrachtet werden.
- Die Vorgehensweise muss flexibel sein, damit für unterschiedliche Strukturen auch angepasste Lösungen erarbeitet werden können.
- Das Ergebnis der Energiestudie muss auf die regionalen Bedürfnisse angepasste Finanzierungsmodelle beinhalten.

Inzwischen sind wesentliche Arbeitspunkte dieses Energiepaketes bereits rechnergestützt realisiert.

5. Entsorgungskonzepte

Im Rahmen der Erstellung von Abfallwirtschaftskonzepten ist folgende Vorgehensweise erforderlich:

1. Erfassung der vorhandenen Entsorgungsstruktur

- Sammlungs- und Transportsysteme
- Verwertungsanlagen
- Behandlungsanlagen
- Ablagerungen (Deponien)
- Abfallvermeidungsaktivitäten
- Schadstoffentfrachtung

2. Erfassung von Infrastrukturdaten

- Bevölkerungszahl und -entwicklung
- Größe und Struktur des Entsorgungsgebietes
- Bauleitplanung
- Verkehrsinfrastruktur

3. Ermittlung von Abfalldaten,

- Menge einzelner Abfallarten gem. Abfallschlüssel-Nummer
- Datenprognose (Menge, Zusammensetzung, Einflussfaktoren) für einzelne Abfallarten gem. Abfallschlüssel-Nummer

4. Aufstellung eines integrierten Abfallwirtschaftskonzeptes

- Vermeidung
- Sammlung und Transport
- Verwertungsverfahren
- Behandlungsverfahren
- Ablagerung

5. Technisch-wirtschaftlich-ökologischer Vergleich der Planungsvarianten

- Mengen und Technik
- Wirtschaftlichkeit
- Umweltaspekte

6. Vergleichende Beurteilung der Planungsvarianten

- Wertstoffmengen und -qualitäten
- Kostengesichtspunkte
- Abfallbilanz

7. Durchführung von Abfalluntersuchungen

- Abfallarten gem. Abfallschlüssel-Nummer des Hausabfalls
- Organische Abfälle
- Sperrmüll
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- Bauabfälle
- Straßenkehricht
- Klärschlamm
- Restabfall

Kommunale Abfallwirtschaftskonzepte können individuelle Besonderheiten aufweisen, die nicht immer auf andere öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger übertragbar sind. Während z. B. in aufgelockerten Siedlungsbereichen aufgrund bestehender Freiflächen bessere Möglichkeiten zur getrennten Erfassung diverser Abfallfraktionen bestehen, und dadurch in Einzelfällen überdurchschnittliche stoffliche Verwertungsquoten erzielt werden können, können dicht bebaute Wohngebiete häufig nur mit einer Grundausstattung an Erfassungseinrichtungen versehen werden.

Auch die zugrundeliegenden Leitgedanken (politische Randbedingungen) können voneinander abweichen. Während z. B. die Stadt Münster (Bild 90) eine Kommunale Abfallwirtschaft anstrebt, die ohne Verbrennung der Abfälle die abfallrechtlichen Vorgaben erfüllen soll, ist bei der Masse der Entsorgungsträger eine klassische Verbrennungsanlage (ggf. als Mitnutzung) fester Bestandteil des Konzeptes.

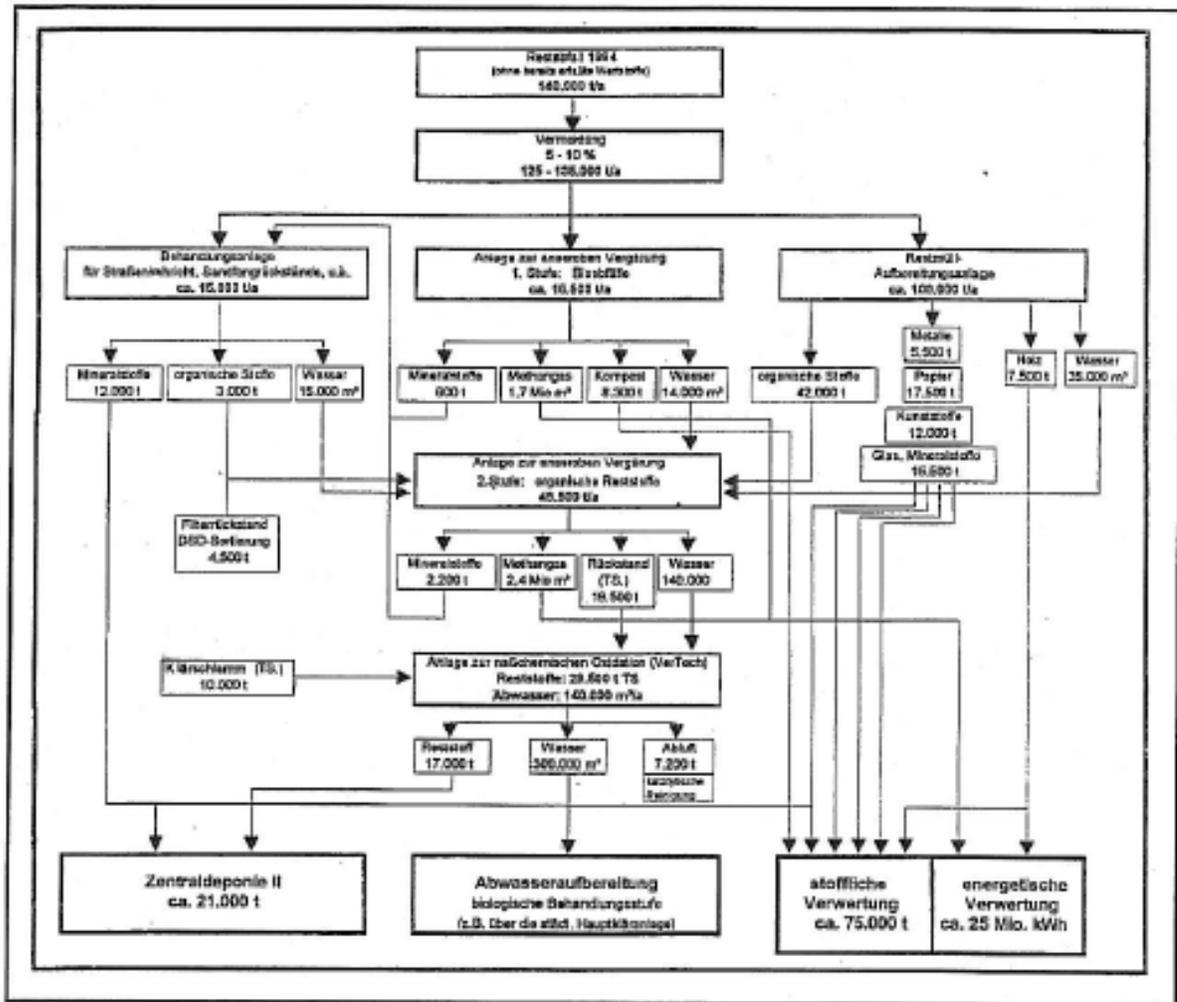


Abb. 90: Abfallkonzept der Stadt Münster (ohne Verbrennung)

Demgegenüber sieht z. B. das Augsburger Konzept (Bild 91) eine integrierte Abfallverwertungsanlage (Gesamtdurchsatz 370.000 Jahrestonnen Abfall) vor, die neben einem Abfallheizkraftwerk (225.000 Jato Restmüll, 49.000 Jato (Feuchtmasse) Klärschlamm, 750 Jato Krankenhausabfall) verschiedene vor- und nachgeschaltete Aufbereitungsanlagen beinhaltet:

- Sortieranlage (DSD- (18.000 Jato) und Gewerbeabfall (32.000 Jato)
- Kompostierungsanlage (53.000 Jato)
- Schlackenaufbereitungsanlage (70.000 Jato).

In dieser Abfallverwertungsanlage werden aus dem Abfall ca. 100.000 t/a zurückgewonnen.

Damit dieses Aufbereitungs- und Verwertungskonzept funktioniert, wurde ein dementsprechendes Erfassungssystem installiert, das folgende Sammelsysteme nutzt:

- Grüne Tonne (Papier)
- Gelbe Tonne (DSD-Abfälle)
- Braune Tonne (Bioabfall)
- Graue Restmülltonne
- Glascontainer
- Wertstoffsammelstellen.

Zusätzlich werden Sperrmüll- Elektronikschrott und Problemmüllsammelungen durchgeführt.

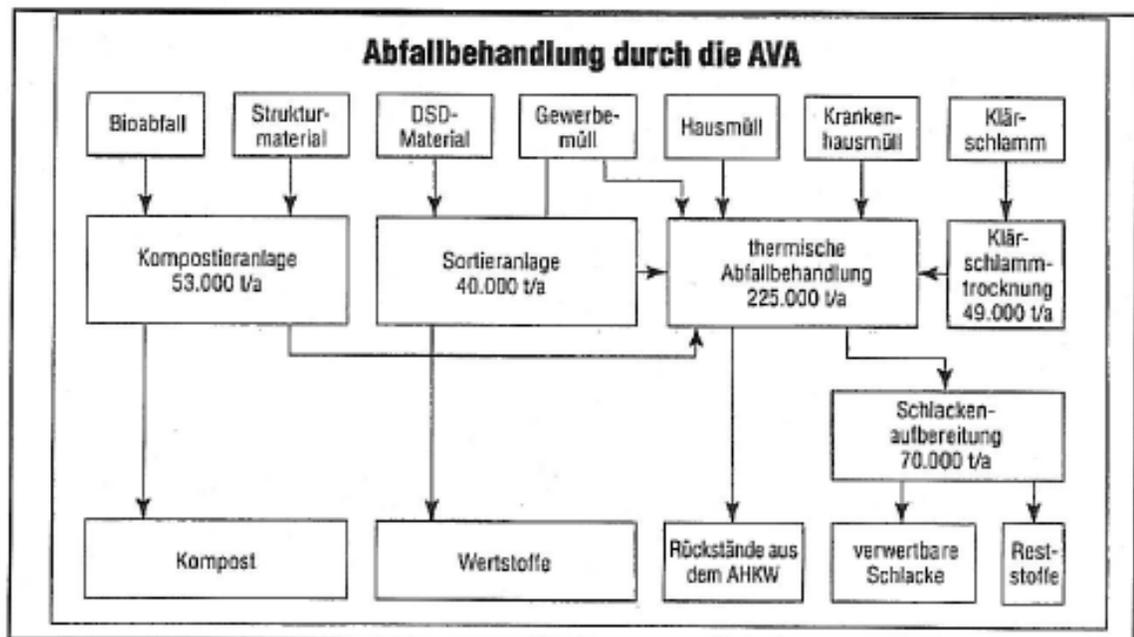
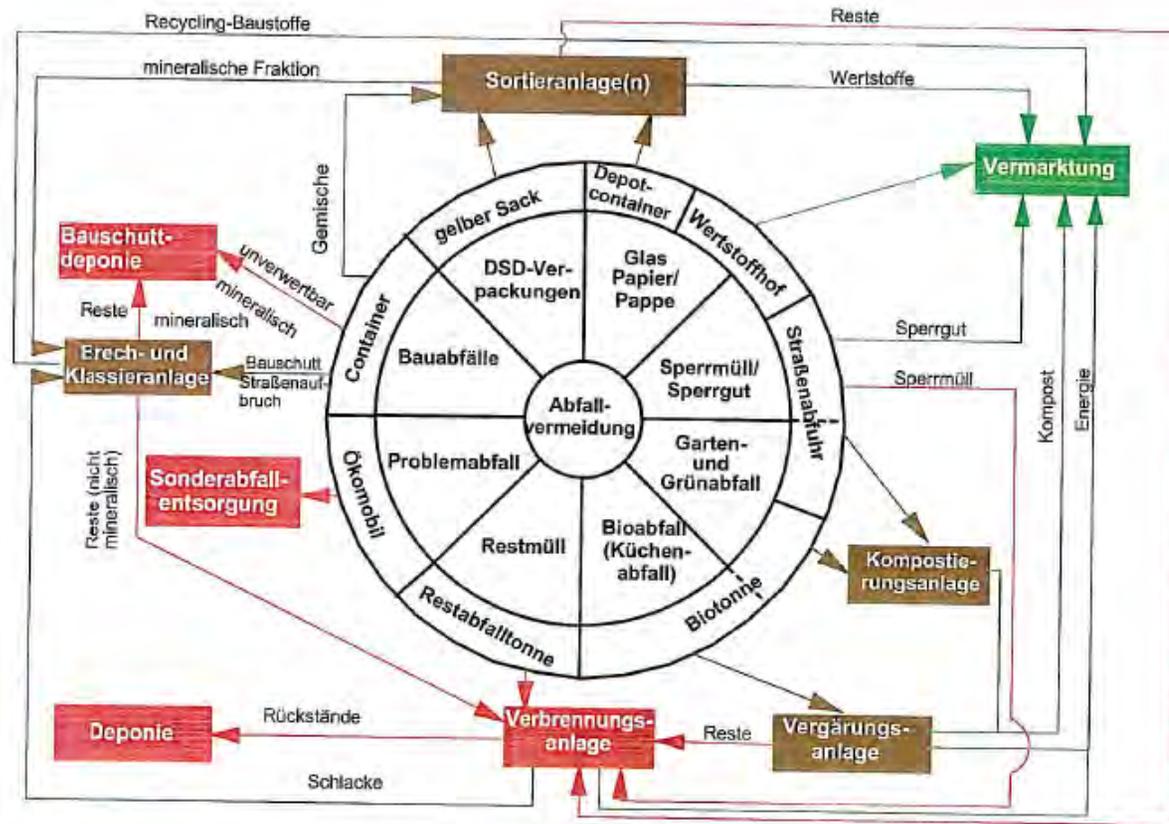


Abb. 91: Abfallkonzept der Stadt Augsburg (mit Verbrennung)

Ein Entsorgungskonzept für Siedlungsabfall, auf der Basis der gegenwärtigen KABV-/ASS-Lösung für die Landeshauptstadt Saarbrücken, jedoch mit zusätzlichen Instrumenten zur Getrennterfassung und Aufbereitung von Abfällen versehen (u. a. selektive Sperrgutabfuhr, Vergärungsanlage, Wertstoffhof) ist in Bild 92 dargestellt.



- Legende:**
- stofflich nicht verwertbare Reste, Abfall zur Beseitigung
 - Abfall zur Verwertung
 - Wertstoffe

Abb. 92: Optimiertes Entsorgungskonzept für Siedlungsabfall

6. Umweltmanagement

6.1 EG-Öko-Audit (Eco-Management and Audit Schema)

Basis des EG-Öko-Audits ist die europäische Verordnung Nr. 761/2001 EMAS II für die freiwillige Beteiligung von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS II). Hieraus wurde im allgemeinen Sprachgebrauch die (EMAS Zertifizierung, Zertifizierung nach EMAS od. Öko-Audit).

Diese löst die alte EWG Verordnung EG-Öko-Audit 1836/93 (EMAS I) ab. Als eine der wichtigsten Änderungen ist die Öffnung des Anwendungsbereichs für alle Branchen anzusehen.

Durch dieses auf EU-Ebene eingeführte Gemeinschaftssystem wird eine kontinuierliche Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes gefordert. Der Bereich des Umweltschutzes findet schwerpunktmäßig im Aufbau bzw. Optimierung eines Umweltmanagementsystems (UMS) nach DIN EN ISO 14.001 statt, dass wesentlicher Bestandteil des EMAS II ist. Weiter ergibt sich eine verwaltungsrechtliche Erleichterung für die Organisation nach der EMAS-Privilegierungsverordnung (EMASPrivilegV) vom 24. Juni 2002.

Hauptelemente sind hierbei die Festlegung der Umweltpolitik durch die Organisation. Sowie die Einführung und Aufrechterhaltung eines Umweltmanagementsystems (UMS) nach DIN EN ISO 14001.

Mit dem Instrument „Umweltmanagement“ ist ein Pendant zum Qualitätsmanagement geschaffen, das gewährleistet, dass die Umsetzung und Einhaltung der vielfachen und z. Teil schwer überschaubaren gesetzlichen Umweltschutzregelungen organisatorisch gewährleistet werden.

Das Umweltmanagementsystem ist kein starres System und kann in bereits vorhandene Systeme wie beispielsweise Qualitätsmanagementsysteme integriert werden (integriertes Managementsystem IMS). Ansatz und Schwerpunkt des Vorgehens kann unternehmensspezifisch frei bestimmt werden.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Gemeinsamkeiten und den Ablauf des EMAS II und DIN EN ISO 14001:

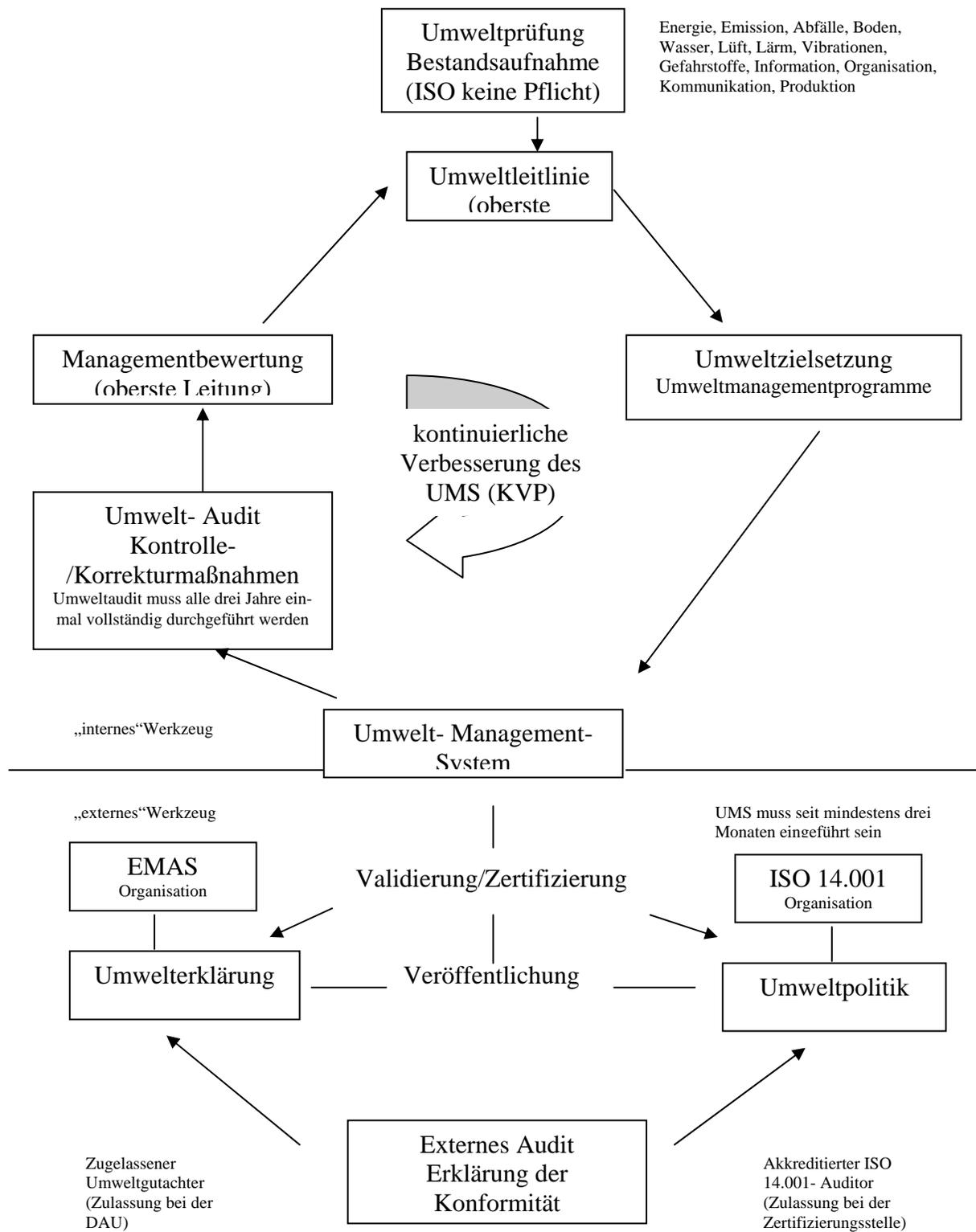


Abb. 93: Ablauf und Gemeinsamkeiten des EMAS II und DIN EN ISO

Die Vorteile des EG-Öko-Audits(Umweltaudit)

Das Umweltaudit führt einmal dazu, vorhandene RISIKEN von Anlagen zu erkennen und die im Umwelthaftungsrecht (UmweltHG; 1990) und Umweltschadensgesetz (USchadG; 2007) neu eingeführten Gefährdungshaftungen für Individualschäden, als Folge von Umweltauswirkungen, zu verhindern. Durch die Schaffung einer Organisation, die umweltrechtliche Risiken vermeidet, wird Sicherheit für unternehmerisches Handeln geschaffen.

Unabhängig von einer späteren Validierung durch einen zugelassenen Umweltgutachter werden erhebliche Vorteile in den Bereichen Eigenkontrolle, Risikoabsicherung, Versicherungsprämien, Effektivitätssteigerungen und der daraus resultierenden Einsparmöglichkeiten gesehen. Die frühzeitige Teilnahme an einem Umweltaudit schafft einen größeren Handlungsspielraum und stellt die Vorbildfunktion (Vorreiter) der Unternehmen in den Blickpunkt. Darüber hinaus wird bei der EU-weiten Auflösung von Monopolstellungen ein wichtiges Wettbewerbsinstrument in zukünftigen Märkten geschaffen.

So hat beispielsweise der VVS Konzern nach einem erfolgreich durchgeführten Pilotprojekt im Wasserbereich der Stadtwerke Saarbrücken mit dem Aufbau, der Optimierung und der Erweiterung eines Umweltmanagementsystems begonnen, dieses eingeführt und aufrechterhalten.

Als wesentlicher Nachteil für die Betriebe mit weltweiten Standorten wird die Beschränkung der Anerkennung des EG-Öko-Audits (EMAS II) auf die europäischen Staaten angesehen. Aus diesem Grund sind die Zahlen der validierten Unternehmen stagnierend. Die meisten Unternehmen lassen sich nach der internationalen Norm DIN EN ISO 14.001 zertifizieren.

6.2 ISO 14000 ff. Umweltmanagement (UM)-Normenreihe

In dieser Normenreihe ist der Aufbau eines Umweltmanagementsystems mit den dazugehörigen Instrumentarien beschrieben. Die Normen beschreiben im Einzelnen:

- ISO 14001 (Juni 2005) „Umweltmanagementsystem- Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“
- ISO 14004 (2004) „Umweltmanagementsystem- Allgemeiner Leitfaden über Grundsätze, System und Hilfsinstrumente“
- ISO 14010 (1996) „Leitfaden für Umweltaudits- Allgemeine Grundsätze“
- ISO 14031 (2000) „Umweltmanagement-Umweltleistungsbewertung-Leitlinien“ (Grundlage bildet die Erfassung von Energie- und Stoffströmen)
- ISO 14020 bis 14024 (2001/02) „Umweltkennzeichnung und –deklaration“ (Regeln zur Auszeichnung eines Produktes bezüglich seiner Umweltverträglichkeit)
- ISO 14041 bis 14043 (1998/2000) „Umweltmanagement- Ökobilanz- ...“ (systematische Untersuchung eines Produktes über alle Lebensphasen hinsichtlich seiner Umweltbelastung)

Wesentliche Unterschiede der ISO 14001 zum EMAS II (761/2001)

Kriterium	EMAS II (761/2001)	ISO 14001
Grundlage	– Europäische Verordnung	– Privatwirtschaftliche Norm
Geltungsbereich	– EU	– Weltweit
Anwendungsbereich	– Alle Organisationen	– Alle Organisationen
Fördermittel	– JA- meist länderspezifisch	– Nein (evtl. „indirekt“ über EMAS II)
Deregulierungsoption	– Ja- EMAS-Privilegierungsverordnung	– Nein
Leistungskriterien	<ul style="list-style-type: none"> – EVABAT (beste verfügbare Technik) – Kontinuierliche Verbesserung der Umwelleistung und des UMS – Nachweis der „Legal Compliance“ – Miteinbeziehung der Mitarbeiter – Miteinbeziehung interessierter Kreise 	<ul style="list-style-type: none"> – Prevention of Pollution – Kontinuierliche Verbesserung des UMS – Legal Compliance erwünscht
Umweltprüfung	– Verpflichtend	– Freiwillig – Anhang A. 4.2.1
Umweltmanagementsystem	– ISO 14001 – UMS muss 3 Monate vor der Validierung funktionieren	– ISO 14001 – UMS muss 3 Monate vor der Zertifizierung funktionieren
Umweltbetriebsprüfung UMS-Audit	<ul style="list-style-type: none"> – Umweltbetriebsprüfung muss vor der Ersteinnahme durchgeführt worden sein – Max. dreijähriger Prüfungszyklus 	<ul style="list-style-type: none"> – Umweltaudit muss vor der Ersteinnahme durchgeführt worden sein – Max. dreijähriger Prüfungs-Prüfungszyklus
Management Review	– Bewertung durch die oberste Leitung	– Managementbewertung
Veröffentlichung von Umweltinformationen	– Umwelterklärung (umfangreich)	– Umweltpolitik
Validierung/Zertifizierung	<ul style="list-style-type: none"> – Zugelassener Umweltgutachter – Akkreditierungsstelle: DAU, Bonn – Validierung = Gültigkeitserklärung 	<ul style="list-style-type: none"> – Akkreditierter Umweltauditor – Akkreditierungsstelle: Zertstelle XY – Vier-Augen-Prinzip: Zertifikat wird nicht vom Auditor vergeben
Umwelt „Zertifikat“	– Vorabprüfung durch Umweltbe-	– Zertifizierungsstelle z.B.:

Kriterium	EMAS II (761/2001)	ISO 14001
	höre – Registrierung bei der IHK/HWK – Eintragung in das EU-Register – Veröffentlichung im Amtsblatt der EU	TÜV-Cert – Registrierung bei der Zertifizierungsstelle

Ein Vergleich der beiden Normreihen ISO 9000 ff (Qualitätsmanagement) mit der ISO 14000 ff lassen eine Anzahl von gemeinsamen Elementen entdecken. Diese erlaubt eine Verknüpfung beider Systeme.

Bsp.:

- Verwaltung und Lenkung der Dokumente und Daten
- Interne audits
- Handbuch (Umwelt bzw. Qualität)
- Umwelt- bzw. Qualitätspolitik
- Organisationsstruktur

Ein Kritikpunkt bei Umweltmanagementsystemen nach der ISO-Norm ist die Bewertung der Umweltleistung. So stellt die Norm zusätzlich zu der in der Umweltpolitik enthaltenen Verpflichtung zur Einhaltung der geltenden rechtlichen Bestimmungen sowie zu einer kontinuierlichen Verbesserung keine absoluten Forderungen an die Umweltleistungen.

Die kontinuierliche Verbesserung bezieht sich im Gegensatz zum Öko-Audit (Verringerung der Umweltbelastung durch den Standort) auf eine kontinuierliche Bewertung der Leistung des Umweltmanagementsystems.

Daher können zwei Organisationen, die ähnliche Tätigkeiten ausüben, sich aber in Bezug auf ihre Umweltleistung unterscheiden, dennoch beide die Forderungen der internationalen Norm erfüllen.

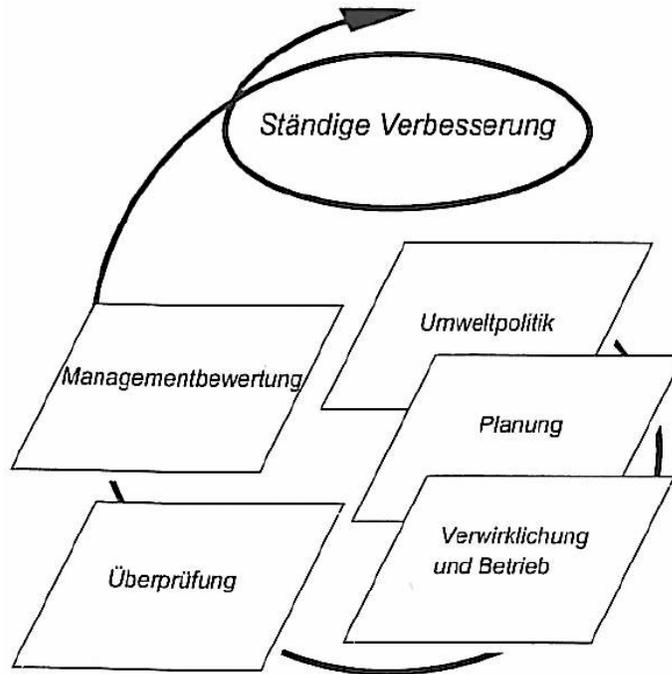


Abb. 94: Modell des Umweltmanagementsystems nach DIN EN ISO 14001
(Kontinuierlicher Verbesserungsprozess KVP)

Ähnlich wie im Qualitätsmanagement gibt es auch im Umweltbereich Vorgaben von Seiten der Hersteller. So werden beispielsweise von einem schwedischen Automobilkonzern bei der Auftragsvergabe nur noch Zulieferbetriebe berücksichtigt die an einem der beiden Systeme, ISO 14000 ff. bzw. Öko-Audit, teilgenommen haben.

Fakten und Trends zu EMAS II und ISO 14001

Fakten:

- Umweltmanagementsysteme haben sich in vielen Bereichen, aber auch in „untypischen“ Branchen etabliert.

- Immer mehr Firmen verfügen über ein integriertes Managementsystem (Qualität, Arbeitssicherheit, Umweltschutz)

Trends:

- Der Bekanntheitsgrad von Umweltmanagementsystemen wird durch die Internetpräsenz und Umweltnormen ansteigen
- Managementsysteme werden zunehmend prozess- und ablauforientiert implementiert
- Die Anwenderfreundlichkeit von und die System-Kompatibilität zwischen Qualitäts-/Umweltnormen wird verbessert
- Der betriebliche Umweltschutz erhält mit der ISO 14031 („Umweltbewertung“) eine neue Qualität
- Die Bedeutung der Produkt-Umweltverträglichkeit rückt immer mehr in den Focus des unternehmerischen Interesses (ISO 14040, Produktrücknahmeverpflichtung, etc.)

6.3 Die Kommunalökologie

Mit folgendem Satz lässt sich der Begriff der Kommunalökologie, der als solcher noch keinen offiziellen Charakter besitzt, vorläufig definieren:

Ökologie, die Wissenschaft von den Beziehungen und Wechselbeziehungen der Lebewesen zu ihrer Umwelt, bezogen auf den kommunalen Bereich als Planungselement für zukunftsorientierte, nachhaltige Entwicklung.

Die Kommunalökologie soll weit über die vordergründigen Naturbetrachtungen hinausgehen und eine ökologische Daseinsvorsorge unter weitgehender Berücksichtigung der Umwelt ermöglichen.

Zu den Themen der kommunalen Ökologie gehören unter anderem:

- Ökologie im Spannungsfeld zur Ökonomie
- Wasserversorgung
- Energieversorgung
- Nahverkehr
- Entsorgung
- Betrieblicher Umweltschutz
- Konzeptioneller Umweltschutz
- Information der Mitbürger

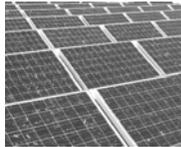
Innerhalb der einzelnen Themenbereiche wird im kommunalem Umfeld die Anstrengung unternommen, den Weg von der „end off the pipe“- Mentalität, hin zu einer Risikoabschätzung und Daseinsvorsorge vor der Durchführung von Projekten, zu gehen.

So wurde z.B. bei der Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft Saarbrücken mbH (VVS) bereits 1985 eine Stelle Kommunalökologie geschaffen, um diesem hohen Anspruch gerecht zu werden. Unter Mitarbeit mit dem Kommunalökologen wurde bei den Stadtwerken Saarbrücken das Saarbrücker Zukunftskonzept „Wasser“ sowie ein Konzept zur ökologischen Materialwirtschaft entwickelt.

Ein weiterer Ausdruck der neuen Kommunalökologie war die Beteiligung am Saarbrücker Zukunftskonzept „Energie“ der Stadtwerke Saarbrücken, hinter dem die Geburtsstunde eines örtlichen Energieversorgers auf der Grundlage des umwelt- und ressourcenschonenden Energieeinsatzes steht.

Neben den konzeptionellen Arbeiten sind mit dem Begriff Kommunalökologie noch andere Umweltaufgaben verknüpft. Beispielsweise sind in kommunalen Unternehmen, je nach Größenordnung, Beauftragte für die Bereiche **Gewässerschutz, Immissionschutz, Abfall, Störfälle gegenüber** der Behörde zu bestellen. Die Bestellungen werden in der Regel vom Bereich der Kommunalökologie mit abgedeckt. Aus diesen Bestellsungsverträgen ergibt sich eine Vielzahl von Pflichten die aufgrund der aktuellen Gesetzeslage einen breiten Raum in der Arbeit der Kommunalökologie einnehmen.

Hier kann die bereits zuvor erwähnte ISO-Normenreihe 14000 ff. und bzw. oder die EG Öko Audit-Verordnung ein wichtiges Hilfsinstrument zur Durchsetzung einer kommunalen Ökologie werden.



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

V. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

1. Rolle des Verkehrs in urbanen Zentren

1.1 Geschichtliche Entwicklung des Personenverkehrs

1.2 Die aktuelle Situation im Personennahverkehr

1.3 Aspekte künftiger verkehrs- und städtebaulicher Maßnahmen

1.4 Neue Schwerpunkte in der Stadt- und Regionalplanung

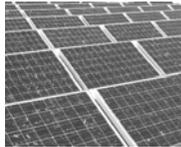
2. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) im Saarland

2.1 Aufgaben des ÖPNV (im Saarland)

2.2 Die Saarbahn

2.2.1 Chronik der Saarbahn

2.2.2 Zielsetzung der Saarbahn



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

3. Techniken des ÖPNV

3.1 Der Omnibus

3.2 Die Straßenbahn

3.3 Die Stadtbahn

3.4 Der Nahverkehr der Bahn

3.5. Die Untergrund-Bahn

3.6 Liniengebundene Sonderformen

4. Entwicklungsgeschichte von Bussen und Bahnen

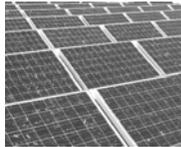
4.1 Technische Entwicklung der Busse

4.2 Technische Entwicklungsgeschichte der Straßenbahn

5. Neue technische Entwicklungen

5.1 Bussysteme

5.2 Straßenbahn



Kommunale Technik I

Prof. Dr.-Ing. Franz Heinrich

6. Dienstleistung ÖPNV

6.1 Integraler Taktfahrplan

6.2 Einheitliche Tarifstruktur

6.3 Dynamische Fahrgastinformation

6.4 Dynamische Anschlusssicherung

6.5 Flexible Betriebsweisen

6.6 Automatisierung und Rationalisierung

6.7 Marketing

6.8 Entwicklung der Fahrgastzahlen

1. Rolle des Verkehrs in urbanen Zentren

Mobilität spielt in einer hoch entwickelten Wirtschaft eine herausragende Rolle, sowohl für den Personenverkehr (Verknüpfung der Grunddaseinsfunktionen) als auch für den Güter- und Warenverkehr (Verknüpfung der Produktherstellungstufen). Für viele hat eine uneingeschränkte Mobilität mittlerweile den Charakter eines Grundrechts gewonnen.

Mobilität kann auf verschiedenartige Weise gewährleistet werden. In den hoch entwickelten Ländern ist an herausragender Stelle der motorisierte Individualverkehr (MIV) zu nennen, ferner der Schienenfernverkehr, der Flugverkehr und nicht zuletzt der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in seiner vielfältigen Ausprägung (u. a. Bahn, Straßenbahn, U-Bahn, Linienbus, Sammel-Taxi).

Von diesen Verkehrsträgern war der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in den Nachkriegsjahren in Deutschland das einzige Verkehrsmittel, das in den Städten und Gemeinden sowie zwischen den Siedlungszentren und seinem Umland die Mobilität der Bevölkerung wieder herstellte und so wesentliche Stütze war für einen wirtschaftlichen Neuanfang.

In den folgenden Jahrzehnten, insbesondere in den Jahren des wirtschaftlichen Aufschwungs, wurde dem ÖPNV seine bis dahin herausragende Stellung streitig gemacht von einem kräftig wachsenden motorisierten Individualverkehr. Gleichzeitig zeichnete sich der ÖPNV durch zunehmende Ineffizienz, mangelhafte und unkoordinierte Leistungsangebote, fehlende Tarifkooperation und Informationsmängel aus und trug so zu seinem Bedeutungsverlust selbst mit bei.

1.1 Geschichtliche Entwicklung des Personenverkehrs

1742: erste private Fiakerstation in Berlin

1825: Pferde-Omnibus in Berlin (1830: Hamburg)

1840: Berlin: erster Linienbetrieb mit festem Fahrplan

1863: London: erste unterirdische Dampfbahn (U-Bahn)

1881: Berlin: erste elektrische Straßenbahn

1905: Kraftomnibus mit Verbrennungsmotor

Auch die Geschichte des ÖPNV ist untrennbar verbunden mit dem Anwachsen und der Verdichtung der städtischen Bevölkerung (Landflucht) in der Folge der industriellen Revolution. Das hohe Bevölkerungswachstum und der Bedarf an Industriearbeitskräften führte zu einem Anwachsen der Bevölkerung und einer flächenhaften Ausbreitung der Industriestandorte. Es entstanden auf der einen Seite die große Fabriken und Gewerbegebiete mit einem gewaltigen Bedarf an Arbeitskräften und auf der anderen Seite die Wohngebiete an der Peripherie der Städte und im nahen Umland,

Zunächst wurden die räumlichen Distanzen zwischen Arbeitsplatz und Wohnort zu Fuß überwunden. Stundenlange Fußmärsche zur und von der Arbeitsstelle zurück nach Hause waren keine Seltenheit.

Der technische Fortschritt wie z. B. die Erfindung der Dampfmaschine (2. Hälfte des 18. Jahrhunderts), der Eisenbahn (Dampfmaschine auf Schienen), des Verbrennungs- und Elektromotors (Ende 19. Jahrhunderts) ermöglichte erstmals einen organisiertem Personenverkehr zunächst überwiegend einem überörtlichen Verkehr. Dieser Verkehr wurde zunächst von Privatbetrieben, später in öffentlicher bzw. städtischer Verantwortung betrieben.

1.2 Die aktuelle Situation im Personennahverkehr

Seit den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts erfolgte in Deutschland eine massenhafte Ausbreitung des PKW in der Stadt. Kamen 1925 lediglich 2 - 3 PKW' auf 1000 Einwohner, so erhöhte sich dieses Verhältnis bis heute auf mehr als 500 PKW pro 1000 Einwohner. Mittlerweile (1994) bewegen sich allein ca. 40 Mio. PKW auf den gesamtdeutschen Straßen'.

Eine wesentliche Ursache für diese Entwicklung ist die zunehmende räumliche Trennung von Arbeiten, Wohnen und die Zentrenbildung für andere Funktionen, die zu einer großräumigen, flächenhaften Ausuferung der Städte und zur Zersiedlung der Landschaft führte.

Insbesondere bei der Überwindung von großen Distanzen zwischen Arbeitsplatz und Wohnort leistet der MIV aufgrund der Tatsache, dass der PKW i. d. R. am Anfang aller Wege steht, gute Dienste. Die Gewährleistung einer bequemen Erreichbarkeit des Arbeits- und/oder des Ausbildungsplatzes, des Einkaufszentrums und/oder des Freizeitangebotes und anderer Ziele durch den PKW förderte u. a. ein starkes Anwachsen des Pendlerwesens. Aufgrund bestehender Kostenvorteile (Baugrund, Mieten) gewann dadurch der ländliche Raum zusätzlich als Wohnort Attraktivität.

Der innerstädtische Verkehrsfluss wird durch einen massenhaften MIV zunehmend gehemmt viele sprechen bereits von einem Verkehrsinfarkt.

Innerhalb sowie von und nach Saarbrücken finden täglich 600.000 Autofahrten statt.

Die aus Verkehrsstaus und Parksuchverkehr resultierenden Zeitverluste, Umweltverschmutzungen (Abgase) und Stress sind volkswirtschaftlich negativ zu bewerten. Der MIV hat in den letzten Jahren aufgrund einer nahezu ungehemmten Expansion Dimensionen angenommen, denen die Städte immer weniger gewachsen sind.

Zumindest in Bezug auf das Fassungsvermögen der städtischen Verkehrsinfrastruktur scheint eine Sättigungsgrenze erreicht. Der Straßenneubau stagniert. Vielerorts findet eher ein Rückbau zugunsten anderer Verkehrswege wie Fußgängerzonen, Radwege und verkehrsberuhigter Straßen statt.

Auch im Hinblick auf Klimaschutz ist eine Eindämmung des Verkehrsaufkommens durch Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs erforderlich. Der Kraftverkehr zählt, zusammen mit den Kraftwerken, zu den Hauptverursachern von CO₂ und trägt damit wesentlich bei zum künstlichen, globalen Treibhauseffekt.

Die Folgen dieses Treibhauseffekts sind noch nicht im Detail bekannt. Die künstliche Erwärmung des Planeten wird jedoch kaum ohne gravierende Klimaveränderungen bleiben. Zeitversetzt werden regionale Klima- und Temperaturänderungen erwartet, die zu Dürren, Wirbelstürmen, und Überschwemmungen führen können.

Autoabgase tragen nicht nur zu globalen Klimaveränderungen bei. Sie wirken auch örtlich auf das Klima ein und belasten die Luft der Städte mit einem Gemisch aus Benzol, Kohlenmonoxid, Stickoxid, Methan, Dieselruß und andern Schadstoffen. Diese Schadstoffe wirken sowohl direkt als auch auf Umwegen .z. B. über die Ozonbildung in Bodennähe bzw. SMOG-Bildung bei Inversionswetterlagen .auf den Menschen (Erkrankungen der Atemwege, Allergien), auf die natürliche Umwelt (Waldsterben) und auf Bauwerke (Materialzersetzung) ein.

Die aus diesen Umweltbeeinträchtigungen resultierenden Schäden und Kosten belasten die Volkswirtschaften in hohem Maße.

Schätzungen gehen davon aus, dass jeder PKW pro Jahr Umweltschäden in Höhe von ca. 2.000DM verursacht‘.

1.3 Aspekte künftiger verkehrs- und städtebaulicher Maßnahmen

Der MIV hat in den vergangenen Jahren starken Einfluss genommen auf das Erscheinungsbild der Städte. Über viele Jahre hinweg galt in der städtischen Raumplanung die Maxime der „autogerechten Stadt“. Gewachsene Stadtteile wurden bereitwillig durch großzügig dimensionierte Verkehrsadern zerteilt, Zentren für Bildung, Arbeit, Freizeit und Wohnen zerstückelten die Grundfunktionen weitflächig und erforderten zusätzliche Verkehrsleistungen, Parkhauskomplexe und ebenerdige Parkplätze beanspruchen wertvolle städtische Flächen und verschandeln die wenigen verbliebenen Freiflächen in den Innenstädten, Lärm- und Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs und „wildes Parken“ belastigen Anwohner, Fußgänger und Radfahrer.

Die Folge: Die Innenstädte verloren an Attraktivität. Sie dienen häufig nur noch der hastigen Besorgung bzw. der gezielten Inanspruchnahme von Dienstleistungen und verödeten mangels Wohnbevölkerung zusehends.

Dieser negativen Stadtentwicklung muss durch raumplanerische Maßnahmen Einhalt geboten werden.

1.4 Neue Schwerpunkte in der Stadt- und Regionalplanung

Eine wesentliche Ursache für eine generelle Zunahme des Verkehrs ist die Funktionstrennung in den Städten. Der künftigen Raumentwicklungsplanung stellt sich die Aufgabe, dieser Entwicklung gegenzusteuern. Dabei darf nicht nur über die möglichst umweltverträgliche Kanalisierung des Verkehrsaufkommens nachgedacht werden, z. B. durch Fahrspurverbreiterung, Schaffung großzügiger Parkraumangebote oder Verkehrsbeschleunigungsmaßnahmen; es müssen auch Überlegungen angestellt werden zur Vermeidung von Verkehr.



Abb. 95: „wildes Parken“

Zielführende Maßnahmen können sein:

- Ausbau des schienengebundenen Verkehrs zwischen Stadt und Region in dem Maße, wie die hohen Investitionen bei den stark angespannten öffentlichen Haushalten vertretbar sind
 - Verbesserung der Dienstleistungsangebote des ÖPNV durch Einrichtung schnellerer, dichter und regelmäßiger Verbindungen (z. B. durch Vorrangschaltungen bei den Signalanlagen, Verbundsysteme mit anderen öffentlichen Verkehrsträgern). soweit es das Fahrgastaufkommen zulässt bzw. erfordert
 - Schaffung eines Systemverbundes von ÖPNV und motorisiertem Individualverkehr durch Einrichtung einer erweiterten Parkraumbewirtschaftung an der städtischen Peripherie („Park and Ride“)
 - Integration des Fußgänger- und Radfahrerverkehrs in den Systemverbund mit dem ÖPNV mit Hilfe unterstützender Einrichtungen wie Fahrradabstellplätze, attraktive Haltestellen, Mitnahmemöglichkeiten von Fahrrädern in Bussen und Bahnen etc.
-

Wesentliche Ziele einer personennahverkehrsorientierten und verkehrsvermeidenden Stadt- und Raumplanung sind:

- Integrierung **der verkehrspolitischen Ziele in die Entwicklungsplanungen und Bauleitpläne** der Städte **und Regionen**
- Gliederung der Flächennutzung (Wohngebiete, Industrie, Verwaltung, Bildung, Erholung etc.) mit dem Ziel geringer Verkehrsaufkommen
- Schaffung attraktiver Nahbereiche und Wohnumfelder, die den Verkehrsbedarf verringern (z. B. Modell „Wohnen ohne eigenes Auto“ in Bremen) und einen Beitrag leisten zur Verkehrsvermeidung
- Förderung des nichtmotorisierten Individualverkehrs (Ausbau des Fuß- und Radwegenetzes)
- Koordination von Stadt- und Regionalplanung, u. a. im Hinblick auf eine Steuerung der Pendlerströme
- Koordination der Stadt- und Regionalplanung mit der Verkehrsplanung, Einbeziehung von Verkehrsleit- und Informationssystemen, optimale Abstimmung der verschiedenen Verkehrssysteme (Bahnen, Busse, Individualverkehr) aufeinander, Stichwort: Verkehrsmanagement
- Einbeziehung des volkswirtschaftlichen Nutzens, den der ÖPNV stiftet, in die Gesamtkalkulation. Damit erscheinen die betriebswirtschaftlichen Fehlbeträge der Verkehrsbetriebe in einem relativierten Zusammenhang (Stadt Köln: 1,5 Milliarden DM volkswirtschaftlicher Nutzen gegenüber 159 Mio. DM Fehlbetrag)
- Einplanung und Bereitstellung zusätzlicher Investitionsmittel zur Umstrukturierung und Erweiterung der öffentlichen Personenverkehrssysteme
- Veränderung des Verkehrsverhaltens der PKW-Nutzer, z.B. mit einem attraktiven P&R (Park-and-ride-)Angebot

Dem öffentlichen Personennahverkehr kommt besondere Bedeutung zu, wenn es gilt, die Überflutung der Städte durch den MIV (motorisierter Individualverkehr) einzudämmen.

80 von 100 Befragten halten mittlerweile den Verkehr mit all seinen Begleitscheinungen für das größte Problem der Gegenwart und Zukunft und befürworten daher auch einen vorrangigen Ausbau des ÖPNV.

2. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) im Saarland

Auch im Saarland hat der MIV seine Grenzen erreicht. Saarländische Städte weisen im bundesdeutschen Vergleich mit die höchsten Autoverkehrsanteile auf, das saarländische Straßennetz (7.000 km asphaltierte Straßen) ist das dichteste EG-weit, der Motorisierungsgrad liegt über dem Bundesdurchschnitt.

In der Landeshauptstadt Saarbrücken (LHS) sollen daher auch alle kommunalen Möglichkeiten genutzt werden zur Realisierung eines umweltfreundlichen Verkehrskonzeptes. Im Kern verfolgt das Zukunftskonzept Verkehr in der LHS das Ziel, den motorisierten Individualverkehr um 20 % zu reduzieren. Dies entspricht einer Verdoppelung der Fahrgastzahl im ÖPNV.

Jahr	Kfz	PKW
1970	278.079	236.489
1975	358.031	320.113
1980	462.789	415.051
1985	522.213	459.717
1986	542.835	479.661
1987	560.864	497.236
1988	584.113	519.049
1989	605.888	538.549
1990	609.330	541.123
1991	619.522	549.306

1992	632.883	559.595
1993	639.901	563.540
1994	649.273	569.333
1995	663.263	579.352
Änderung 1991/1995 in Prozent	7,1	5,5

Tabelle: Kfz und PKW im Saarland

Zur Verbesserung des ÖPNV im Saarland erfolgte 1987 als einer der ersten Schritte die Gründung der Verkehrsgemeinschaft Saar, VGS. Gründungsmitglieder waren alle saarländischen Verkehrsunternehmen, die öffentlichen Personennahverkehr betrieben:

- Deutsche Bundesbahn (heute: DB AG)
- Geschäftsbereich Bahnbus, heute Regionalbus Saar-Westpfalz (RS'W)
- Kreis-Verkehrsbetriebe Saarlouis (KVS)
- Neunkircher Verkehrs AG (NKG)
- Stadtwerke Völklingen (SWV)
- Gesellschaft für Straßenbahnen im Saartal AG (GSS)
- private Busunternehmen, vertreten durch den Landesverband Verkehrsgewerbe Saarland e. V (LVS)
- das Ministerium für Wirtschaft als Vertreter der Landesregierung des Saarlandes
- das Bundesministerium für Verkehr als Vertreter der Bundesregierung

Die VGS entwickelte in den folgenden Jahren die Vorstufen zu einem Verkehrsverbund im Saarland. Ausschlaggebend für diese Zielsetzung war die Erkenntnis, dass das gesamte Bundesland als ein Nahverkehrsraum angesehen werden muss.

1989 erfolgte der Abschluss einer Rahmenvereinbarung zwischen Land und DB. Diese Vereinbarung führte zur Einführung der CityBahn. Die CityBahn verbindet auf den

Hauptstrecken der Bahn die wichtigsten Zentren des Saarlandes und schafft insbesondere schnelle und leistungsfähige Verbindungen aus dem Umland ins Oberzentrum Saarbrücken.

1993 erfolgte die Gründung des Zweckverbandes Personennahverkehr. Mitglieder sind alle Landkreise und der Stadtverband Saarbrücken. Er dient der Förderung und Koordinierung des ÖPNV im Saarland und wirkt bei der Umsetzung des ÖPNV-Gesetzes mit.

Ein weiteres wichtiges Instrument für die Umsetzung einer umwelt- und sozialverträglichen Neuorientierung im Nahverkehr ist das ÖPNV-Gesetz. Nach Bundesgesetzgebung sollen die Länder in Landesgesetzen die Zuständigkeiten für Planung, Organisation und Finanzierung des ÖPNV regeln. Im Saarland trat das „Gesetz über den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNVG)“ am 1. Januar 1996 in Kraft. Es stand im engen Zusammenhang mit der Regionalisierung d. h. der Überantwortung des Schienenpersonennahverkehrs der Eisenbahnen vom Bund auf die Länder.

Am 1. August 2005 schließlich ging der Saarländische Verkehrsverbund saarVV an den Start. Alle saarländischen Verkehrsunternehmen haben sich in ihm zusammengeschlossen und bieten nunmehr einen gemeinsamen ÖPNV-Tarif im gesamten Saarland an. Darüber hinaus hat der saarVV das Ziel, das Angebot der Verkehrsunternehmen so zu planen und abzustimmen, dass ein leistungsstarker und zukunftsorientierter Nahverkehr angeboten wird. Das heißt insbesondere, dass das neue Tarifsystem und die aufeinander abgestimmten Bus- und Bahnlinien das Leistungsangebot und die Effizienz im saarländischen ÖPNV wesentlich verbessern sollen.

2.1 Aufgaben des ÖPNV (im Saarland)

Aufgaben und Ziele des sind in den Landesgesetzen definiert. Wesentliche Aufgaben gemäß Saarländischem ÖPNV-Gesetz sind:

- die Gewährleistung von Mobilität im städtischen und regionalen Bereich als Aufgabe der Daseinsvorsorge
- die Schaffung einer Mindestmobilität für die nicht-motorisierte Bevölkerung
- die Eindämmung des überbordenden Individualverkehrs vor allem im Verdichtungsraum durch Verlagerung von MIV auf den ÖPNV
- der Transport großer Personenströme (u. a. Berufspendler, Schüler) in Ballungsgebieten
- die ökologische Entlastung der Ballungsgebiete, Senkung der Emissionen, Verringern gesundheitsschädlicher Einflüsse („Sommersmog“)

2.2. Die Saarbahn

Am 27. Oktober 1997 nahm in Saarbrücken die Saarbahn ihren Betrieb auf. Die bekannten Stadtbahnsysteme, wie sie zum Beispiel in Karlsruhe zum Einsatz kommen, wurden für die Saarbahn modifiziert und modernisiert. So fährt die Saarbahn grenzüberschreitend bis in die französische Stadt Sarreguemines und verfügt über eine komfortable Niederflurtechnik, die das Ein- und Aussteigen entscheidend erleichtert.



Abb. 96: Saarbahn in Saarbrücken

2.2.1 Chronik der Saarbahn

Mitte der 80er Jahre führte der steigende Autoverkehr in Saarbrücken fast zum Verkehrsstillstand. Täglich pendelten ca. 60.000 Beschäftigte nach Saarbrücken. Der großzügige Ausbau des Autobahnnetzes begünstigte den Individualverkehr. Von 1984 bis 1995 stiegen auch die Fahrgastzahlen im Busverkehr um mehr als 50 %. Mehr Busse ließen sich im engen Saarbrücker Verkehrsraum jedoch nicht einsetzen; das System „Bus“ war an seine Grenzen gestoßen. Es wurde höchste Zeit, über einen neuen Lösungsansatz nachzudenken. Dabei sollte eine ökologisch orientierte Verkehrspolitik zum Zuge kommen. Wichtiges Ziel war auch, dem ÖPNV bisher verschlossen gebliebene Nachfrage-Potenziale zu erschließen.

- 1990: In einem Gutachten der Saarbrücker ÖPNV-Gesellschaft („Saartal-Linien“) wird festgestellt, dass eine Wiedereinführung der Straßenbahn günstiger ist als ein verbesserter Ausbau des Bussystems,

- 1991: Die Änderung des Gemeinde-Verkehrs-Finanzierungsgesetzes (GVFG) tritt in Kraft. Jetzt kann auch die Anschaffung von Fahrzeugen finanziell gefördert werden. Dadurch wird ein Stadtbahnssystem für die Region finanzierbar.
 - 1992: Gründung der Stadtbahn Saar GmbH, die den Bau der Saarbahn durchführen soll; Untersuchung und Planung der Trassenführung.
 - 1993: Der GVFG-Antrag zum Bau der Saarbahn wird beim Wirtschaftsministerium gestellt. Die Planfeststellung für die Saarbrücker Innenstadt wird eingeleitet.
 - 1994: Technische Abklärungen über die Antriebssysteme und die Festlegung der Trassierung finden statt. Die Ausführungsplanungen werden in den meisten Bereichen abgeschlossen.
 - Januar 1995: Der Bund stimmt dem Saarbahn-Vorhaben als GVFG-Projekt zu.
 - März 1995: Das Triebwagen-Design wird vorgestellt, die Bauarbeiten werden vorbereitet.
 - Juni 1995: Die Bauarbeiten beginnen mit dem Ersten Spatenstich.
 - Januar 1996: Der Bau der innerstädtischen Trasse beginnt.
 - 27. Oktober 1997: Die Saarbahn nimmt ihren Betrieb auf der Strecke zwischen dem französischen Sarreguemines und der Haltestelle Ludwigstraße auf.
 - 31. Juli 1999: Inbetriebnahme der neuen Haltestelle „Cottbuser Platz“ im oberen Malstatt (Saarbrücker Stadtteil).
 - 13. November 2000: Inbetriebnahme der Neubaustrecke zwischen den Haltestellen „Cottbuser Platz“ und „Siedlerheim“ auf dem Saarbrücker Rastpfuhl.
 - 24. September 2001: Inbetriebnahme der neuen Haltestellen „Heinrichshaus“ und „Riegelsberg-Süd“. Damit ist die Saarbahn am südlichen Ortseingang von Riegelsberg angelangt.
 - Sommer 2004: Die Bauarbeiten für den Abschnitt Riegelsberg-Süd bis nach Etzenhofen beginnen; sie sind zwischenzeitlich weitgehend abgeschlossen.
 - Derzeit: Das Planfeststellungsverfahren für die Weiterbaustrecke Etzenhofen – Lebach läuft; sobald das Verfahren abgeschlossen ist, beginnen die ersten Bauarbeiten an diesem Abschnitt.
-

2.2.2 Zielsetzung der Saarbahn

Die Saarbahn wurde gebaut, um für die Saar-Region eine Reihe von Entlastungen und positive Auswirkungen zu bringen, unter anderem:

- 20 % der bisherigen Autofahrten im Einzugsbereich der Saarbahn – also ca. 120.000 Autofahrten täglich – sollten vermieden werden. 90.000 Fahrten davon sollten auf die Saarbahn entfallen.
- Die Saarbahn sollte in den „Integralen Taktfahrplan“ des regionalen Personennahverkehrs eingebunden werden.
- Die Umwelt sollte von 8.600 t CO₂, 112 t NO_x und 228 t HC jährlich (errechneter Wert) entlastet werden. Die Saarbahn ist somit ein integraler Bestandteil des „Saarbrücker Zukunftskonzeptes Energie“.

2.2.2 Fazit nach 10 Jahren Betrieb der Saarbahn

10 Jahre nach dem Start des innovativen Verkehrssystems kann die Saarbahn eine positive Bilanz ziehen. Sie wurde von den Fahrgästen hervorragend angenommen und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Mobilität im Saarland. Die Zahlen im Einzelnen:

- Täglich nutzen rund 40.000 Menschen das moderne Schienenfahrzeug. Obwohl die Strecke der Ausbaustufe I von Sarreguemines nach Lebach noch nicht auf ihrer ganzen Länge in Betrieb ist, wurde schon die Hälfte der angestrebten Autofahrten durch Fahrten mit der Saarbahn ersetzt.
 - Die Saarbahn leistet im Ballungsraum Saarbrücken einen Großteil des ÖPNV und wurde in den Fahrplan der im saarVV zusammengeschlossenen Verkehrsunternehmen integriert.
 - Zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Großraum Saarbrücken trägt die Saarbahn entscheidend bei: Eine vollbesetzte Saarbahn ersetzt 183 Autos und emittiert dabei nur rund ein Zehntel CO₂ (3.318 g bei der Saarbahn zu durchschnittlich 33.306 g CO₂-Ausstoß bei Autos, Angaben pro km).
-

3. Techniken des ÖPNV

Zum Personentransport im Nahbereich werden grundsätzlich schienen- und straßengebundene Verkehrssysteme unterschieden. U- und S-Bahnen sind insbesondere in den Ballungsgebieten aufgrund ihrer Zeitersparnis attraktive Verkehrssysteme. In den mittleren Städten ist i.d.R. der Kraftomnibus ggf. in Kombination mit einem Stadtbahnssystem, wie in Karlsruhe oder künftig auch in Saarbrücken Hauptträger des ÖPNV.

3.1 Der Omnibus

Tragende Säule des öffentlichen Personennahverkehrs ist nach wie vor der Omnibus. Mit dem Bus werden ca. 2/3 aller Fahrten im ÖPNV zurückgelegt. Der Omnibus (lateinisch: „für alle“) ist nach der gültigen Definition ein Automobil zur Beförderung von mehr als neun Personen (einschließlich Fahrer). Man unterscheidet zwischen dem Einsatz im Nah- (Linienbusse) und Regionalverkehr (Überlandbusse) oder im Fernverkehr (Reisebusse). Die Übergänge, auch in der technischen Ausführung, sind jedoch fließend.

Der Bus ist Haupt-Verkehrsmittel des ÖPNV in den Regionen, kleinen und mittleren Städten. Zunehmend werden Busse genutzt als ergänzende Verbindungen und Zubringerdienste zu Bahnen. Letztere verfügen i. d. R. über eine höhere Transportleistung sind aber aufgrund ihrer schienenengebunden Linienführung weniger flexibel.

In der Region spielen Busse die gleiche Rolle gegenüber der S-Bahn oder der DB, in der Stadt zur 5-, U- oder Straßenbahn.

Busse stellen die wirtschaftlichste Bedienungsform des ÖPNV dar, auch in höher verdichteten Siedlungsräumen.

Die Akzeptanz einer Busbenutzung wird vor allem geprägt durch die Nutzungsfreundlichkeit und die Umweltfreundlichkeit im Verkehr. Wichtige Merkmale sind:

- Komfortable, zweckmäßige Innenausstattung
- Leistungsfähige Heizung und Belüftung, evt. Klimasystem
- Tiefer Wagenboden für leichten Einstieg
- Umweltfreundliche Motoren mit niedrigem Verbrauch und niedrigen Emissionen
- Niedriger Geräuschpegel durch Motorgeräuschkapselung

3.2 Die Straßenbahn

Straßenbahnen decken einen weiteren Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs ab: Durch die Schiene sind sie zwar trassengebunden, können aber aufgrund der Kopplung mehrerer Wagen mehr Fahrgäste aufnehmen als Busse.

Die geringere Flexibilität, die höheren Investitionen in Trasse, Fahrzeuge und Wartung erfordert andererseits für einen wirtschaftlichen Betrieb eine größere Anzahl von Fahrgästen. Bei rückgehenden Fahrgastzahlen in den 50er und 60er Jahren konnten deshalb in vielen Städten (u. a. auch in Saarbrücken) die Straßenbahnen nicht mehr weiterbetrieben werden.



Abb. 97: Triebwagen Saartal-Linien 1963

Für die Zukunft hat die Straßenbahn in größeren Städten und Ballungsgebieten für das Segment der mittleren Fahrgastdichte im Verbund mit Bussen und U- bzw. S-Bahnen jedoch wieder einen festen Platz. Allerdings wird die Entwicklung zu flexibleren Straßenbahnen mit Übergangsmöglichkeit auf andere Bahnsysteme mit Hilfe von moderner Mehrsystem-Technologie (Gleichstrom, Bahnstrom, Drehstrom) gehen.

Als ein zukunftsweisendes Konzept kann die Stadtbahn angesehen werden. Derartige Konzepte werden z. Zt. in mehreren deutschen Städten realisiert.

3.3 Die Stadtbahn

Dabei sei vor allem auf die Stadtbahnsysteme hingewiesen. Derartige zukunftsweisende Konzepte wurden in den letzten Jahren in mehreren deutschen Städten realisiert (siehe Karlsruhe und Saarbrücken) oder befinden sich in Planung

(z.B. in Braunschweig). Nachahmer finden sich auch in anderen Ländern (z.B. in den französischen Städten Mulhouse und Straßbourg).

Das Konzept der Stadtbahn vereint die Eigenschaften und Vorteile der Straßenbahn (Schienen in der Innenstadt, Straßenverlegung möglich, kleine Haltestellenabstände, enges Liniennetz) mit denen der S-Bahn und Nahverkehrsbahn (größere Entfernungen möglich, größere Fahrzeugverbände, höhere Geschwindigkeiten).

Beide Systeme, die üblicherweise verschiedene Stromversorgungsarten haben,

- Straßenbahn: 750 .1000 V Gleichstrom
- Eisenbahn: 15kV, 1-Phasen-Wechselstrom 16 2/3 Hz

können durch die neuen Entwicklungen der elektrischen Antriebstechnik (Drehstromtechnik) verbunden werden. Die Umschaltung erfolgt dabei automatisch auf einer 80 m langen stromlosen Strecke (Bsp. Saarbrücken).

Mit der größeren Reichweite und Flexibilität steigt auch das für die Straßenbahn begrenzte Fahrgastpotential.

Erste stadtbahnähnliche Fahrzeuge (ohne Mehrsystemantrieb) liefern

- in Köln/Bonn (Prototypen)
- in Stuttgart, mit elektronischen Gleichstromstellern (Umrichtern)

Die erste Mehrsystembahn, die Straßen- und S-Bahnfunktionen erfüllt, ist die Stadtbahn in Karlsruhe, die seit 1992 im Einsatz ist.

3.4 Der Nahverkehr der Bahn

Unter diesem Oberbegriff werden die Stadt- und Regionalschnellbahnen zusammengefasst. Die Deutsche Bahn AG gründet ihr Nahverkehrsangebot auf 4 Produkte:

RegionalBahn (RB)
RegionalExpress (RE) und
Stadtschnellbahn (S-Bahn).

In Ballungszentren mit mehr als einer halben Million Einwohnern übernimmt die S-Bahn die Grundlast. Die Regionalbahn bedient als Nahverkehrszug der DBAG in der Regel alle Bahnhöfe und Haltepunkte einer Strecke und verkehrt im 1- oder 2-Stunden-Takt. In den letzten Jahren konnten auf diesen Strecken teilweise erhebliche Fahrgastzuwächse erzielt werden. Grund war die verstärkte finanzielle Förderung der Länder, die eine Verbesserung des eingesetzten Fahrzeugmaterials (zum Teil Doppelstockwagen) ermöglichte. Teilweise leisten hier auch Privatbahnen den Verkehr.

Ergänzt wird das Nahverkehrsangebot durch den Regionalexpress im 1- oder 2-Stunden-Takt, der nur an ausgewählten Haltestellen anhält und auch dadurch eine höhere Reisegeschwindigkeit von 70 – 90 km/h erreicht. Auch hier kommen vermehrt Doppelstockwagen zum Einsatz, die die Fahrgastkapazität deutlich erhöhen.



Abb. 98: Doppelstockwagen für den Schienenpersonennahverkehr

Mit Hilfe des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes wurden in 7 Städten und Ballungsräumen S-Bahnen ausgebaut und leisten dort die Grundlast für den Verkehr in die Stadt:

3.5 Die Untergrund-Bahn

1863 wurde in London die erste U-Bahn (Dampfbahn) realisiert. Mit der Anwendung des elektrischen Antriebs wurde in den europäischen Metropolen (z. B. Budapest, Berlin, Paris) um die Jahrhundertwende mit dem zügigen Ausbau der unterirdischen Verkehrslinien begonnen.

Die U-Bahn stellt ein Transportsystem dar, das aufgrund hoher Investitionskosten (aufwendige Tunnelbauten) lediglich in einigen größeren deutschen Städten (u. a. München, Köln, Berlin, Hamburg) bei einem hohen Personenaufkommen eingesetzt wird.

3.6 Liniengebundene Sonderformen

In dieser Rubrik ist als ein bekanntes Beispiel die Schwebebahn in Wuppertal anzuführen. Die Bahn ist bis heute in Betrieb, hat allerdings in anderen Städten keine Nachahmer gefunden.

Verschiedentlich kommen auch speziell ausgelegte Verbindungsbahnen zum Einsatz, z. B. als Zubringer bei größeren Flughäfen (Bild 99).



Abb. 99: Der Skyliner des Frankfurter Flughafens

4. Entwicklungsgeschichte von Bussen und Bahnen

4.1 Technische Entwicklung der Busse

Analog der Postkutsche im Überlandlinienverkehr (regelmäßige Verkehrsverbindungen in festgelegten Betriebsrahmen) wurden in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts in Deutschland die ersten innerstädtischen Pferdeomnibuslinien eingerichtet. Wichtige Entwicklungsschritte waren:

- Seit 1830: Pferdeomnibusse, auch zweistöckig
 - 1895: erste motorisierte (Benz) Omnibus-Kutsche
 - 1899: In Speyer 5 Daimler-Omnibusse für je 18 Personen, 2-Zyl.-Ottomotor, 10 PS $V_{\max} = 14$ km/h
 - 1904: erster Büssing-Linienbus Braunschweig-Wendeburg: 2 Zyl., 9 P5
 - ab 1905: Postbus-Linien und Stadtbus-Gesellschaften
 - seit 1932: ausschließlicher Einsatz des wirtschaftlichen und langlebigen Dieselmotors
 - seit 1924: „Niederflurbusse“ (mit herabgezogenem Rahmen anstatt Aufbauten auf Lkw-Fahrgestell) zur besseren Ausnutzung des Fahrgastraums und zum leichteren Einstieg
 - seit 1935: bessere Nutzung der Grundfläche durch innenliegende Motoren, „Trambus“ (Bild: MAN-Stirnsitzbus)
 - 1952: Selbsttragende Omnibuskarosserie mit Stahlgerippe (Bild: Kässbohrer „Setra“)
 - ab 1953: Entwicklung von Gelenkbussen durch MAN
 - ab 1954: Linienbusse für Einmannbetrieb (ohne Schaffner) in Hamburg
 - seit 1958: Verstärkter Einsatz von Gelenkbussen zur Aufnahme größerer Fahrgastzahlen, ersetzen allmählich in manchen Städten die Straßenbahn
 - ab 1965: konsequente Trennung der Entwicklungslinien von Stadtlinien- und Reisebus (unterschiedlicher Gepäckraumbedarf, unterschiedliche Fahrzeugbodenhöhen, Aussichtsaspekt bei Reisebus)
 - 1967: Versuch einer einheitlichen Bauform durch Kooperation der wichtigsten Hersteller im „Standard-Linienbus“: Vorteile bei der Wartung und beim Betrieb der Busflotten, „Typenempfehlung für den Standardlinienbus .SL 1“
 - 1972: „Richtlinien für den Standard-Überlandlinienbus .Stülb 1“
 - Ab 1983: 2. Generation Standard-Linienbus (u. a. Wagenbodenhöhe 700 mm)
 - Ab 1989 verstärkte Beschaffung von Niederflurbussen.
 - Erdgasbus (z. B. Saarbrücken)
-

4.2 Technische Entwicklungsgeschichte der Straßenbahn

Die Schienenfahrzeuge des Nahverkehrs spiegeln in ihrer geschichtlichen Entwicklung einerseits die vielfältigen Entwicklungen von Antriebstechnologien; andererseits verdeutlichen sie auch die wechselhaften Anforderungen, die an den Nahverkehr in der Geschichte, beginnend in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis heute gestellt wurden:

Herausragende Entwicklungssprünge des schienengebundenen Personennahverkehrs sind:

- Von ca. 1860 bis ca. 1895: Pferdebahnen (Bild), auch schienengebundene Pferdeomnibusse
 - Ca. 1870 bis ca. 1900: Dampfstraßenbahnen
 - Erster elektrischer Straßenbahntriebwagen von Siemens & Halske in Berlin
 - Seit ca. 1890: Rasche Umstellung der Straßenbahnen auf elektrischen Betrieb wegen
 - • der hohen Aufwendungen durch die Pferdehaltung
 - • der Straßenverschmutzung durch die Pferde
 - • der geringen Leistung der Pferdebahnen.
 - • der Emissionen der Dampfbahnen
 - Die ersten elektrischen Straßenbahnen waren nicht größer als Pferdebahnen, hatten Gleichstrommotoren von ca. 20 PS, eine Gleichstromversorgung 500-600V und Spitzengeschwindigkeiten von 15-20 km/h.
 - Anfangsprobleme: Kurzschlüsse, schädliche Einwirkungen magnetischer Felder (Leitungskorrosion in der Straße durch Streuströme, gestörte Fernsprechleitungen, angehobene Kanaldeckel), Stromzuleitungsunterbrechungen, Entgleisungen wegen des höheren Gewichts
 - seit 1900: erste Komforteinrichtungen: Kohleheizung, Belüftungsfenster
 - die technische Weiterentwicklungen in Fahrwerks- und Antriebstechnik erlaubte eine Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, Nutzung der Bremsenergie zur Heizung und Netzurückspeisung, Ganzstahlwagen, Scheren-
-

- stromabnehmer, Achsdrehgestelle
- Nach 1950: Entwicklung von Großraumwagen, Vereinheitlichung der Fahrzeuge, Doppelgelenkzüge, Einführung des schafftierlosen Einmannbetriebs
 - Nach 1970: Elektronische Steuerung der Gleichstrom-Antriebsaggregate (automatische Reihen-/Parallelschaltung der Fahrmotoren, mehrere Feldschwächstufen), teilautomatische Fahrzeugsteuerungen

5 Neue technische Entwicklungen

Durch technische Neuerungen, wie energiesparende und umweltfreundliche Antriebstechniken, durch eine Verbesserung des Fahrkomforts und die Entwicklung alternativer Beförderungskonzepte, insbesondere für Bereiche mit geringem Fahrgastaufkommen sollen Busse und Bahnen im ÖPNV an Attraktivität gewinnen und über das Markenzeichen der Umweltfreundlichkeit neue Kunden angesprochen werden.

5.1 Bussysteme

Busse tragen die Hauptlast im Öffentlichen Personennahverkehr. Auch in Zukunft hat der Omnibus wichtige Rollen auszufüllen, z. B. als innerstädtischer Zubringerdienst zu den modernen schienengebundenen Verkehrssystemen.

5.1.1 Niederflurtechnik

Mit dieser Technik wird das Ziel verfolgt, Busse durch sehr niedrige Einstiegshöhen (320 mm) für Kinder, Alte, Fahrgäste mit Gepäck und Behinderte leichter zugänglich zu machen. Spezielle Einstiegsmöglichkeiten sind für Rollstuhlfahrer vorgesehen z. B. durch Absenkung der Luftfederung und Ausfahren hydraulischer Rampen beim Halt. 1994 waren bereits 65% aller Nahverkehrs-Linienbusse in Niederflurtechnik gebaut.

5.1.2 Senkung des Kraftstoffverbrauchs

Durch Nutzung von Faserverbundwerkstoffen soll ein geringeres Fahrzeuggewicht erzielt werden wodurch sich der Energieaufwand zum Bewegen des Fahrzeuges reduziert.

5.1.3 Senkung der Emissionen (Dieselmotor)

Vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutz-Debatte, und im Hinblick auf mögliche Gesundheitsgefahren durch Abgase und bestimmte Abgasbestandteile (angelagerte Kohlenwasserstoffe an Dieselruß - krebsverdächtig) sowie aufgrund kontinuierlicher verschärfter Abgasnormen (z. Z. gilt ein verschärftes Prüfverfahren für alle Dieselmotoren Euro 4-Norm ab 2005) wird an einer Verringerung der Schadstoffemissionen gearbeitet. Im Mittelpunkt der technischen Bemühungen steht eine Reduzierung folgender Abgasbestandteile:

- Partikelaustritt (Ruß)
- SO₂-Emissionen
- CO₂- und Kohlenwasserstoff-Emissionen (durch Red. des Kraftstoffverbrauchs)
- NO₂-Emissionen

Verbesserungen können erreicht werden durch moderne Motorentechniken, z. B. aufgeladene und ladeluftgekühlte Motoren, Abgasrückführungstechniken, durch Abgasnachbehandlung wie Partikelfilter, Oxidationskatalysatoren, CRT und SCR-Filter-Abgasrückführungstechniken und weitere motorische Maßnahmen sowie durch den Einsatz schwefelarmer Dieselmotorkraftstoffe. Die Entwicklung der Abgasnormen in der europäischen Gesetzgebung kann nachfolgender Tabelle entnommen werden:

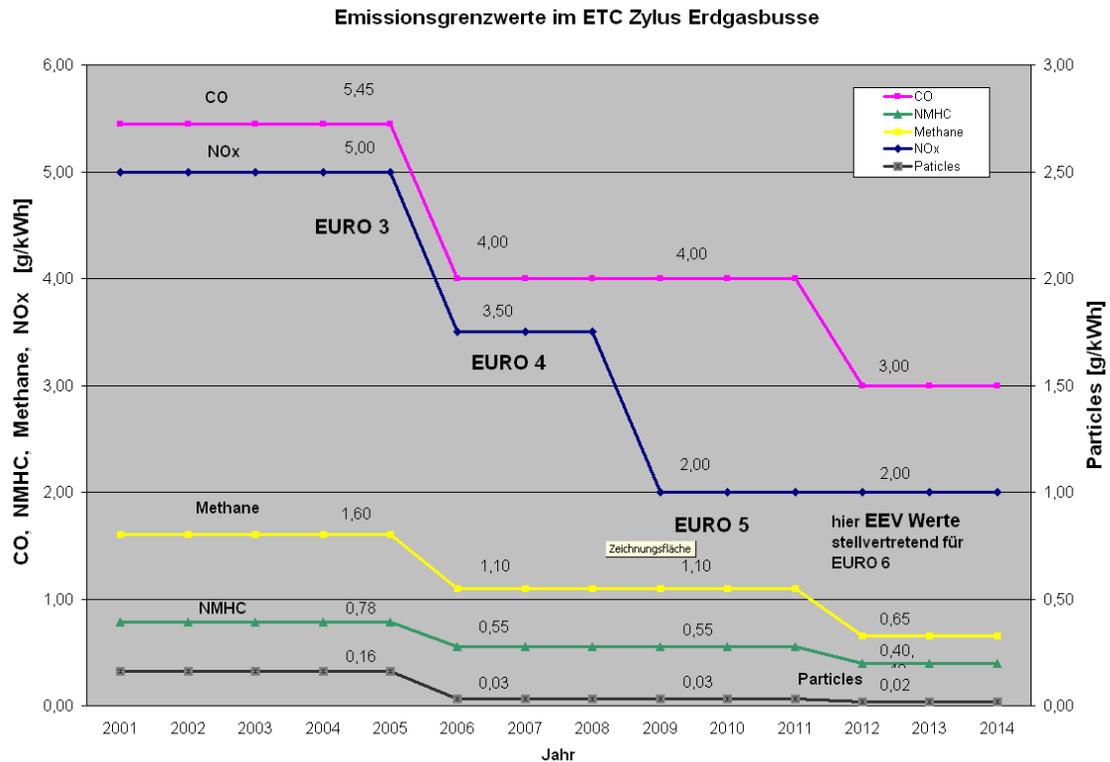


Abb. 100: Erdgasbusse

Für die Speicherung von Erdgas an Bord von Fahrzeugen bieten sich 2 Möglichkeiten an:

flüssig bei -162°C in einem Kryogentank oder
 gasförmig unter einem Druck von ca. 200 bar bei 15°C in Druckzylindern aus Metall
 oder Verbundwerkstoffen

Im Omnibusbereich hat sich wie bei den Saartal-Linien die Gasspeicher-Variante durchgesetzt. Das Erdgas wird dazu auf ca. 27,5 MPa (275 bar) komprimiert, in der Tankstelle gespeichert und über einen Dispenser an den Bus abgegeben.

Die Erdgasbustechnologie zeichnet sich aus durch sehr niedrige Emissionswerte und eine geringere Geräuschbelastung durch das ottomotorische Verbrennungsprinzip (Umbau des Dieselmotors) aus.



Abb. 101: Erdgasbusse der Saartal-Linien in Saarbrücken

Als Zusatzaufwendungen sind Tankaufbauten auf dem Busdach mit 8 Gasflaschentanks mit einem Volumen von 1.400 l geometrisch zur Speicherung des Tagesbedarfs an Erdgas bei 200 bar und neue Betankungseinrichtungen erforderlich.



Abb. 102: Erdgastankstelle auf dem Gelände der Saartal-Linien in Saarbrücken

In Saarbrücken befinden sich bereits 90 Erdgasbusse im Einsatz der Saartal-Linien. Dies entspricht einem Anteil von 70 %.

5.1.5 Elektrobusse

Die Elektroenergie stellt eine weitere mögliche Energiequelle dar zum Antrieb von Bussen. Der Elektroantrieb bringt jedoch kein Potential zur CO₂-Minderung mit sich, wenn zur Ladestromgewinnung fossile Brennstoffe verwendet werden.

Vereinzelt werden in Tourismus- und Naturschutzgebieten oder Gebieten, in denen der Immissionsschutz Priorität hat, Busse mit Elektroantrieb eingesetzt. Derartige Antriebstechniken können aber wegen der geringen Batteriekapazität und damit geringen Leistungsfähigkeit und Reichweite im Standard-Linienbetrieb (noch) nicht eingesetzt werden.

Elektrisch betriebene Oberleitungsbusse hatten Mitte der 50er Jahre Hochkonjunktur. Da sie durch den leitungsgebundenen Betrieb nicht so flexibel sind wie konventionelle Busse und ihr Betrieb nicht wirtschaftlich ist wurde dieses Bussystem nahezu vollständig aufgegeben. Lediglich 6 Verkehrsbetriebe, davon 2 in den ABL, benutzen den Antriebsmotor derartige Busse noch heute.

5.1.6 Hybridbusse

Bei derartigen Bussen kommt ein kombiniertes Antriebssystem zum Einsatz, das im Stadtverkehr auf einen lärm- und abgasarmen Elektromotor zurückgreift und im Überlandverkehr durch Dieselkraftstoff betrieben wird.

Als Variation ist auch die Kombination eines Dieselmotors mit einem Schwungrad möglich. Dadurch kann Energie mechanisch gespeichert und als Fahrtrieb bei Bedarf wieder abgegeben werden.

5.1.7 Busse mit flexiblen Spursystemen („Duo-Busse“)

Derartige Busse (Modellprojekt: „Spurbus Essen“) werden im Außenbereich auf der Straße und im Innenstadtbereich schienengebunden, mechanisch bzw. elektronisch geführt. Auch mehrere Antriebssysteme . Verbrennungsmotor außerstädtisch und elektroleitungsgespeist im Stadtgebiet . sind für die verschiedenen Einsatzbereiche vorgesehen.

5.1.8 Antrieb mit Rapsmethylester (RME)

Hierbei handelt es sich um einen regenerativen Kraftstoff, der aus Biomasse gewonnen werden kann. Diese Technologie wird nicht einheitlich positiv bewertet, da durch die geringe Nutzung an Pflanzenmasse . nur die Ölfrüchte, der Halm kann nicht genutzt werden . und durch den hohen Aufbereitungsaufwand die Öko-Bilanz ungünstig ausfällt (UBA 1995).

Außerdem greift der RME-Kraftstoff Lacke und Kraftstoffleitungen an und die Geruchsemissionen der Aldehyde („Pommes-Frites“) belästigen Fahrgäste und Passanten.

5.1.9 Wasserstoffantrieb

Die Gewinnung von Wasserstoff aus Kohlen-Wasserstoff-Energieträgern ist mit großem Energieaufwand verbunden. Die CO₂-Bilanz fällt in diesem Fall zu Ungunsten dieser Technologie aus.

Regenerativ kann Wasserstoff aus Wasser durch Elektrolyse mit Hilfe von Wasserkraft, Wind- oder Solarstrom gewonnen werden. Wasserstoff verbrennt im Betrieb weitgehend emissionsfrei (abgesehen von geringen NO_x-Emissionen).

Die Technologie gewährleistet zurzeit noch keine wirtschaftliche Nutzung. Der apparative und betriebliche Aufwand ist vergleichbar dem der Erdgasbusse.

Die Hamburger Verkehrsbetriebe testen derzeit 8 Wasserstoff-Brennstoffzellen-Busse.

5.1.10 Methanolantrieb

Methanol kann aus Erdöl, Erdgas, Kohle oder Biomasse hergestellt werden. Nachteilig ist der gegenüber dem Dieseltreibstoff der nur halb so große volumetrische Heizwert des Brennstoffs.

5.1.11 Ethanolantrieb

Zucker-, stärke- und zellulosehaltige Rohstoffe (nachwachsende Biomasse) können zur Herstellung von Ethanol genutzt werden. Bei Betrachtung des gesamten Herstellungsaufwandes ist dieser Kraftstoff sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht nicht von Vorteil.

In Brasilien dient Zuckerrohr zur Herstellung von Ethanol als Treibstoff Ethanol ist in diesem Land als Treibstoff weit verbreitet.

5.1.12 Antrieb durch Flüssiggas (LPG)

Das Flüssiggas besteht aus einem Propan-Butan-Gemisch. Das unter 5 bar Druck verflüssigte Gas fällt z. B. als Nebenprodukt bei chemischen Prozessen an. Die Tankanlagen verlangen eine aufwendige Technik. Der Einsatz von LPG (Liquified Petroleum Gas) ist daher nur in dicht besiedelten Gebieten bei einer engen Betankungsfrequenz im Hinblick auf den zu betreibenden Aufwand zu rechtfertigen.

5.1.13 StraÙengebundene Sonderformen

Insbesondere als Ergänzung zum Bus haben sich in Bereichen mit geringen Regelverkehrsnachfragen Transportalternativen etabliert.

Anruf-Sammel-Taxi

Hierbei handelt es sich um ein bedarfsgesteuertes und flächendeckendes Verkehrsmittel in Ergänzung zum herkömmlichen Linienverkehr. Bedient werden i. d. R. Siedlungsstrukturen abseits der Hauptverbindungsachsen . dabei handelt es sich um Bereiche, die aufgrund einer geringen Verkehrsnachfrage mit Bussen und Bahnen nicht wirtschaftlich befahren werden können .sowie Buslinien in verkehrsschwachen Zeiten.

Der Fahrgast zahlt den gleichen ÖPNV-Tarif Die öffentliche Hand ersetzt dem Taxiunternehmen lediglich die Differenz zwischen ÖPNV-Tarif und den entstandenen tatsächlichen Kosten. Soweit das Anrufsammeltaxi als Ersatz hochdefizitärer Linien eingesetzt werden kann, können sogar Kosten gespart werden.

Bürger-Bus

Dieses Transportkonzept wird insbesondere in NRW alternativ genutzt. Dabei handelt es sich um ehrenamtlich gesteuerte Klein-Busse im Linien-Betrieb. Als Träger fungiert ein Bürgerbusverein. Die Bürger-Bus-Projekte werden vom Land finanziell unterstützt im Hinblick auf die Beschaffung von Fahrzeugen aber auch im Hinblick auf die laufende Organisation. Die Projektbetreuung erfolgt i. d. R. durch das ortsansässige Verkehrsunternehmen.

Der Einsatz von Bürger-Bussen erfolgt in verkehrsschwachen Räumen bzw. auf Strecken, die von Linienbussen nicht effizient bedient werden können, z. B. wegen eines zu geringen Kostendeckungsgrades. Z. Z. laufen bundesweit ca. 40 Projekte bzw. befinden sich in der Vorbereitung

Ruf-Bus

Hierbei werden Klein-Busse eingesetzt. Eine Betriebsleitzentrale nimmt über Rufsäulen oder Telefon Fahrwünsche entgegen und disponiert auf elektronischer Grundlage den Laufweg des Fahrzeuges. Aufgrund eines hohen technologischen Aufwandes sind i. d. R. nur geringe Kostendeckungsgrade erzielbar.

5.2 Straßenbahn

Neuerungen im Straßenbahnbau, wie die Nutzung der Drehstrom-Antriebstechnik oder die Niederflurkonstruktion haben zu einer deutlichen Anhebung des Fahrkomforts geführt. Gleichzeitig sind jedoch die Anschaffungskosten für moderne Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge stark angestiegen. Diese negative Entwicklung der Beschaffungskosten hat wieder eine neue Entwicklung angestoßen: das leichte, **aufwandsarme Straßenbahnfahrzeug**.

5.2.1 Drehstrom-Antriebstechnik

Dem Trend der modernen Antriebstechnik folgend, versuchte man auch im Straßenbahn-Traktionsbereich die Nachteile des Gleichstrommotors wie

- aufwendige Konstruktion
- Verschleißanfälligkeit des Kommutators
- geringerer Wirkungsgrad
- höheres Leistungsgewicht und keine geschlossene Bauweise

durch die Einführung von Drehstrommotoren mit elektronischer Steuerung und Halbleiterumrichtern zu beheben. Die Entwicklung der Leistungselektronik ermöglichte eine angepasste Steuerung des in Drehmoment- und Drehzahlverhalten unflexiblen Drehstrommotors.

Die Komponenten der Drehstromtechnik sind:

- Wassergekühlte Radnaben-Drehstrommotoren
- Halbleiter-Wechselrichter (pulsbreitenmodulierende Transistorgeräte) zur Umwandlung des Fahrleitungs-Gleichstroms in frequenzvariablen Drehstrom
- Mikrorechner zur Übernahme der dynamischen Antriebsregelung (z.B. nach dem Feldorientierungsverfahren)
- Datenbussysteme zur koordinierenden Steuerung zwischen den Motoren bzw. Drehgestellen und zur Fehlerdiagnose (Integriertes Bordinformationssystem IBIS)

Durch die Drehstromtechnik erhöht sich die Verfügbarkeit und verringert sich der Wartungsaufwand beträchtlich. Außerdem bieten die kompakten Bauarten der Antriebseinheiten die wesentlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Konstruktion in der Niederflurtechnik.

5.2.2 Niederflurtechnik

Wie bei den Bussen, so sind bei den Straßenbahnen niedrige Einstiegshöhen ein großer Komfortgewinn und eine beträchtliche Erleichterung für alle Gruppen von Fahrgästen. Die erste Niederflur-Trambahn wurde 1984 in Genf eingesetzt.

Die Niederflurtechnik macht den kostspieligen Bau von Hoch-Bahnsteigen zum ebenerdigen Einstieg in vielen Fällen überflüssig. Die Niederflurtechnik wurde in mehreren Entwicklungsstufen entwickelt:

- kleinere Räder
- wagenbauliche Maßnahmen (Absenken der Zwischenbereiche zwischen den Fahr- und Laufwerken), Niederfluranteil der Fahrzeuge 20 - 50%
- Niederflur-Laufwerke mit Einzelrädern, Niederfluranteil bis 75%
- Losrad-Fahrwerke mit Drehstrom-Radnabenmotoren, ohne Radsatzwellen

5.2.3 Leichte, aufwandsarme Straßenbahnfahrzeuge

Technologiesprünge im Zusammenhang mit den o. a. Entwicklungen haben die Anschaffungskosten für Schienenfahrzeuge stark ansteigen lassen. Manche Verkehrsunternehmen sind finanziell kaum noch in der Lage, alte Fahrzeuge durch fahrgastfreundliche, moderne Fahrzeuge zu ersetzen.

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat daher mit der Definition von „Anforderungen an ein leichtes, aufwandsarmes Straßenbahnfahrzeug“ einen Versuch gestartet, den Anstieg der Anschaffungskosten zu bremsen.

Wesentliche Anforderungen sind:

- geringe Gesamtkosten über die Lebensdauer
 - Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge
-

- Oberflächenverkehr mit Sichtfahrbetrieb
- Fahrzeugbreite: 2,30 m
- Fahrzeuglänge: max. 30 m (modularer Aufbau für ggf. kleinere Fahrzeuge) ca. 80 Sitzplätze
- ca. 100 Stehplätze
- Aufstellmöglichkeit für 2 Kinderwagen oder einen Rollstuhl
- mindestens 3 Fahrgasttüren pro Fahrzeugseite (Möglichkeit einer Fahrgasttür in Fahrzeugführernähe)
- Einstiegshöhe: 280 bis 300 mm möglichst an allen Türen
- Spurweiten: 1000 mm oder 1435 mm
- Fahrleitungsnennspannung: 600 V bis 750 V
- Mindestradius: 18 m
- Radlast: max. 5 t
- Beschleunigungsvermögen: ca. 1,3 m/s² bis ca. 30 km/h bei angegebener Beladung
- Betriebsbremsverzögerung: ca. 1,3 m/s² bei angegebener Beladung
- Gefahrenbremsung nach BOStrab
- Höchstgeschwindigkeit: 60 km/h
- Option: Zugbetrieb nur mit gleichartigen Fahrzeugen

Wesentliche Kostensteigerungen beruhen auch die häufig zu umfangreichen Lastenhefte der Auftraggeber (i. d. R. das örtliche Verkehrsunternehmen). Die zahllosen, sehr ins Detail gehenden Vorgaben hindern auch die Hersteller daran, ihre Möglichkeiten zur Herstellung kostengünstiger Fahrzeuge auszuschöpfen.

6 Dienstleistung ÖPNV

Mit der Bahnreform zum 1. Januar 1994, dem im Rahmen der Bahnstrukturreform novellierten Personenbeförderungsgesetz (in Kraft getreten zum 01.01.1996) und dem Inkrafttreten der Bahnregionalisierung zum 1. Januar 1996 wurde der öffentliche Personennahverkehr entscheidend reformiert.

Nach Bundesgesetzgebung sollen die Länder in eigenen Ländergesetzen die Zuständigkeiten für Planung, Organisation und Finanzierung des ÖPNV regeln.

Das 1995 verabschiedete Saarländische ÖPNV-Gesetz ist der gesetzliche Rahmen für die Neuorganisation des ÖPNV im Saarland. Geregelt werden u. a. die Finanzierung, die Organisation (dreistufige Struktur: politische Ebene, Management-Ebene, Ebene der öffentlichen und privaten Verkehrsdienstleister) und die Zuständigkeiten (Land für Schiene, Landkreise und Kommunen für Stadtbahn und Busse).

Mit dieser Zusammenführung der Zuständigkeiten „vor Ort“ sollen dezentrale, kundennähere Strukturen geschaffen werden, die Busse und Bahnen attraktiver machen sollen.

Die Attraktivität des ÖPNV wird u. a. mitbestimmt durch die Tarife, die Qualität der Fahrgastinformation, eine dynamische Anschlusssicherung sowie flexible Betriebsweisen.

Aus dieser Erkenntnis heraus wurde im Saarland die Realisierung eines landesweiten Verkehrs- und Tarifverbundes zum Ziel genommen. Wesentliche Bausteine für dieses Verbundsystem sind:

6.1 Integraler Taktfahrplan

Hierunter wird ein einprägsames, ansprechendes Fahrplansystem für Busse und Bahnen verstanden, das nach 2 Prinzipien funktioniert:

- die Fahrzeuge fahren nach einem leicht merkbaren Fahrplan .z. B. alle 30 bzw. 60 min
 - die Fahrzeiten von Bussen und Bahnen werden so aufeinander abgestimmt, dass für den Kunden möglichst geringe Wartezeiten entstehen.
-

6.2 Einheitliche Tarifstruktur

Mit Lösung eines einzigen Fahrscheins sollen vom Fahrgast verschiedene Verkehrsmittel (Bus, Bahn, Stadtbahn) genutzt werden können. Die Anschlüsse zwischen den einzelnen Verkehrssystemen sollen optimiert und dadurch lästige Wartezeiten (beim Umsteigen) minimiert werden.

6.3 Dynamische Fahrgastinformation

Informationen über die aktuelle Position der Fahrzeuge (Fahrplanlage, d. h. nicht nur Soll-Fahrplan sondern auch Ist-Zustand) können z. B. über Mobilfunk an elektronische Anzeigetafeln an wichtigen Haltestellen übertragen (Bsp. Straßenbahn München . Probebetrieb), oder über bereits bestehende Funkdienste auch standortunabhängig verfügbar gemacht werden.

Über Datennetze können sich Kunden auch zu Hause, z. B. über Internet oder T-Online, über Fahrzeiten, Routen und Preise informieren.

6.4 Dynamische Anschlusssicherung

Eine unzulängliche Anschlussregelung wird von potentiellen Fahrgästen negativ bewertet und begründet teilweise die Nichtnutzung des ÖPNV.

Die Anschlusssicherung betrifft sowohl die Verknüpfung zwischen Orts- und Regionalverkehren als auch die Verknüpfung Bus-Bus und Bus-Bahn innerhalb eines regionalen Verkehrsnetzes. Anschlüsse sollen künftig auch dann gewährleistet werden, wenn Verspätungen auftreten.

6.5 Flexible Betriebsweisen

Im Auftrag der VGS wurden Meinungen und Einschätzungen zum ÖPNV und MIV im Saarland und in Saarbrücken erfragt. Bei diesen Umfragen wurde u. a. der Wunsch der Öffentlichkeit registriert, das Fahrplanangebot bedarfsgerechter zu gestalten.

Das ÖPNV-Angebot soll zukünftig in Bezug auf seine Netz- und Betriebsform möglichst optimal auf die Verkehrsnachfrage abgestimmt werden. Damit wird gleichzeitig das Ziel einer besseren Auslastung der Fahrzeuge als auch einer besseren Erschließungswirkung verfolgt.

6.6 Automatisierung und Rationalisierung

Die Zeiten, dass sich Schaffner in Bussen und Straßenbahnen zu den Fahrkunden bemühen, zur Entwertung der Fahrscheine, sind längst vorbei. Die Personalkosten haften sich bis Ende der 50er Jahre vervielfacht und betragen zu dieser Zeit ca. 50 % des gesamten Aufwandes. Zu dieser Zeit begann eine sich über viele Jahre hinziehende Rationalisierungsmaßnahme.

Der Einmannverkehr wurde zuerst auf Bussen im Fernverkehr eingeführt. Die Fahrgastselbstbedienung stand fortan im Mittelpunkt der Kundenbedienung. Die Belastung der Fahrer durch den Verkauf von Fahrausweisen sollte jedoch so gering wie möglich gehalten werden. Durch ein preiswerteres Vorverkaufsgeschäft und durch einen individuellen Automatenverkauf sollte für die Fahrkundschaft ein entsprechender Anreiz geschaffen werden.

Zur weiteren Vereinfachung des Fahrscheinerwerbs sollen in Zukunft auch elektronische Kartensysteme (Bsp. „PayCard“) zum Einsatz kommen. Dadurch kann einerseits eine Kostensenkung erzielt werden durch Reduzierung des Bargeldgeschäfts, andererseits entspricht ein derartiges Zahlungsmittel besser dem Zeitgeist, der das Cash-Prinzip zunehmend ablehnt.

Negativ ist hierbei zu bemerken, dass nicht alle Kunden derartige Zahlungssysteme nutzen (können), da die Kartenzahlung i. d. R. ein Bankkonto, regelmäßige Einkünfte etc. voraussetzt.

Andere Kartensysteme, z. B. unternehmenseigene Karten, haben den Nachteil, dass der Kunde i. d. R. im Voraus gewisse Fahrkontingente erwerben muss. Damit wird jedoch die Gruppe derjenigen, die nur episodisch öffentliche Verkehrsmittel nutzen, eher abgeschreckt, denn als Kunde gewonnen.

6.7 Marketing

In verschiedenen Erhebungen wurden erhebliche Defizite festgestellt im Hinblick auf eine objektive Beurteilung des eigenen Verkehrsverhaltens bzw. im Hinblick auf die Angebote und Dienstleistungen des ÖPNV. So werden Reisezeiten beim ÖPNV i. d. R. überschätzt und Fahrtzeiten mit dem eigenen PKW unterschätzt. Daraus resultiert häufig eine ablehnende Haltung gegenüber einer Nutzung von den Verkehrsmitteln des ÖPNV.

Auch die Kenntnis der Fahrkartenangebote ist sehr gering. Lediglich die Einzelkarte ist 71 % der Bevölkerung bekannt und ihren Preis kennen gerade einmal 24. Andere Fahrkartenangebote (Umweltzeit-Karte, Kaufzeit-Karte, Freizeit-Karte u. a.) sind i. d. R. weniger als einem Drittel der Bevölkerung bekannt, die Fahrpreise kennen i. d. R. nicht einmal 10 % der Bevölkerung. D. h., dass der ÖPNV auch mit seinen mittlerweile vielfältigen Angeboten zu wenig bei den potentiellen Kunden präsent ist.

Subjektive Gründe (fehlende Informationen, negative Einschätzungen, mangelnde Akzeptanz) sprechen somit häufig gegen die Nutzung des ÖPNV.

Daraus folgt, dass neben der planerischen Beseitigung objektiver Gründe, wie z. B. das fehlende ÖPNV-Angebot in verkehrsschwachen Räumen, die unzulängliche Taktfrequenz oder die mangelhafte Anschlusskoordination, durch kommunikative

Maßnahmen eine Akzeptanzsteigerung erzielt werden muss.

Eine allgemeine Imageverbesserung ist trotz bestehender Defizite in den letzten Jahren schon erkennbar geworden und hat sich auch in steigenden Fahrgastzahlen niedergeschlagen. Insbesondere der Umweltaspekt, d. h. die Entlastung der Umwelt durch Nutzung des ÖPNV, hat sich dabei als herausragendes Thema erwiesen. Im Rahmen einer Gemeinschaftswerbung wurde in den vergangenen Jahren die Botschaft vermittelt, dass Fahrgäste mit der Nutzung des ÖPNV einen wichtigen Beitrag leisten zum Umweltschutz.

6.8 Entwicklung der Fahrgastzahlen

Die starke Zunahme der Pkw-Zulassungen hatte bis Ende der 50er Jahre kaum Einfluss auf die Zahl der Fahrgäste im ÖPNV. Das allgemeine Mobilitätswachstum bescherte beiden Transportmitteln kräftige Wachstumsraten. Erst Anfang der 60er Jahre gab es Rückwirkungen auf die Fahrgastzahlen bei Bussen und Bahnen. Ende der 60er Jahre wurde in den ABL ein Tiefststand beförderter Fahrgäste von ca. 4,5 Mrd registriert.

Zu Beginn der 70er Jahre begann in den Ballungsgebieten ein gezieltes Gegensteuern gegenüber dieser Entwicklung. In der Folge zeigten stark wachsende ÖPNV-Investitionen Wirkung: die Zahl der Fahrgäste konnte in den 70er Jahren wieder auf ca. 5 Mrd. gesteigert werden. Nach einem neuerlichen Einbruch der Fahrgastzahlen in den 80er Jahren, stieg die Zahl der beförderten Kunden bis 1994 auf ca. 6,4 Mrd. in den ABL (ohne DB AU). Gesamtdeutsch wurden 1994 ca. 7,4 Mrd. Fahrgäste befördert. Die DB AG beförderte 1994 ca. 1,38 Mrd. Fahrgäste.

1995 wurden im Saarland 81,4 Mio. Fahrgäste mit Bussen befördert. Gegenüber 1985 konnte die Zahl um mehr als 18 % gesteigert werden. Die GSS hatte daran einen Anteil von ca. 37,3 Mio.
