



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Scientific Technical Report

Einführung in den Geothermie Report 96-1

Ernst Huenges, Geoforschungszentrum Potsdam

Im Laufe des Jahres 1995 wurden die Arbeiten am Projekt "Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen" begonnen. Das Projekt wird vom BMBF gefördert (Förderkennzeichen BEO 0326969). Ziel ist, die Voraussetzungen zur Nutzung des vorhandenen, durchaus beachtlichen Potentials geothermischer Energie in Deutschland zu optimieren. Dieses Potential ist insbesondere an Vorkommen und Erschließbarkeit hydrothermalen Wässers gebunden [Schneider et al., 1995].

Die im Projekt behandelte Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen grenzt sich ab von den anderen für Deutschland interessanten Nutzungsformen der Geothermie, die in den weiterführenden Arbeiten von Kaltschmitt und Wiese (1995) sowie Rummel und Kappelmeyer (1993) ausführlich beschrieben sind. Dazu zählen die Verfahren der untiefen Geothermie [Sanner, 1994], die Erdwärme bis 400 Meter unter der Geländeoberkante nutzen sowie das noch in der Entwicklung befindliche HotDryRock-Verfahren zur geothermischen Stromerzeugung [Baria et al., 1995].

Die Ausschöpfung des Potentials der hydrogeothermalen Ressourcen setzt spezielle Weiterentwicklungen auf geowissenschaftlichem, verfahrenstechnischem und betriebswirtschaftlichem Gebiet voraus, welche im Geothermieprojekt konzipiert werden sollen. Als Ergebnis werden Entwicklungsmöglichkeiten der Nutzung der hydrogeothermalen Ressourcen herausgearbeitet. Das von Natur aus interdisziplinäre Projekt erfordert eine umfassende Kommunikation der Projektbearbeiter untereinander und eine ebenso umfassende Information nach außen hin. Daher wird die Berichterstattung schon im Laufe des Projekts begonnen. Kommentare und Anregungen zu unseren Arbeiten werden ausdrücklich gewünscht. Der erste Report ist thematisch an technologisch-wirtschaftlichen Schwerpunkten ausgerichtet. Der folgende Artikel gibt einen kurzen Überblick über das Projekt. Anschließend werden drei geothermische Heizzentralen auf Grundlage ihres energiekonzeptionellen Aufbaus verglichen. Eine dieser Anlagen wurde einer detaillierten ganzheitlichen Energie- und Emissionsanalyse unterzogen, dies ist in einem weiteren umfangreichen Beitrag ausgeführt.

Literatur:

- Baria, R., J. Garnish, J. Baumgärtner, A. Gerard und R. Jung, *Recent developments in the European HDR Research programme at Soultz-sous-Forêts (France)*, Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Volume 4, 2631-2637, 1995.
- Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.), Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 345-398, 1995.
- Rummel, F. und O. Kappelmeyer (Hrsg.), Erdwärme, Energieträger der Zukunft?, Faktenforschung-Zukunft; Verlag C.F.Müller, ISBN 3-7880-7493-0, Karlsruhe; 1993.
- Sanner, B., *Zum aktuellen Stand der Oberflächennahen Geothermie in Mitteleuropa*; Geothermische Energie, Nutzung, Erfahrung, Perspektive, Tagungsband: 3. Geothermische Fachtagung, ISBN 3-930157-25-X, Schwerin, 1994.
- Schneider, H., I. Bachmann, F. Kabus und P. Seibt, *Geothermie - hydrothermale Erdwärmennutzung in Deutschland*; Energiewirtschaftliche Tagesfragen; Heft 12, Seite 788 ff.; Dezember 1995.

Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen - Projektziele, Projektstruktur, Arbeitsschwerpunkte

Kemal Erbas, Geoforschungszentrum Potsdam

Abstract

The main aspects of the project: "Evaluation of geologic and economic conditions for utilizing low-enthalpy hydrogeothermal resources" at the GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ) are outlined. In this interdisciplinary project the social, economic, technological and geoscientific aspects are analyzed in terms of their complexity and their interrelations. The project will provide a basis for political decision making in the process of promoting and installing of geothermal heating plants.

Projektziele

Das Projekt soll dazu beitragen, die Möglichkeiten der Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen zu bewerten und zu verbessern. In die Untersuchungen werden neben den geowissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekten auch die technischen Verfahren sowie die ökologischen und juristischen Rahmenbedingungen mit einbezogen. Mit diesem Wissen soll zum Ende der Projektlaufzeit ein Kriterienkatalog erstellt werden, der Interessierten und potentiellen Anwendern eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage zur Nutzung dieser bisher als umweltfreundlich, aber nicht immer wirtschaftlich angesehenen Energieform ermöglicht. Die Vorgehensweise in diesem interdisziplinären und angewandten Projekt zielt darauf ab, die Gesamtproblematik aus möglichst vielen Blickwinkeln zu erfassen und diese umfassend darzustellen. So werden z.B. unter dem Gesichtspunkt der aktuellen gesellschaftlichen Diskussion zur Klimaentwicklung ganzheitliche Energie- und Schadstoffbilanzen erstellt, die, im Vergleich mit konkurrierenden Energieformen, einen wesentlichen Aspekt zur Akzeptanz beitragen können.

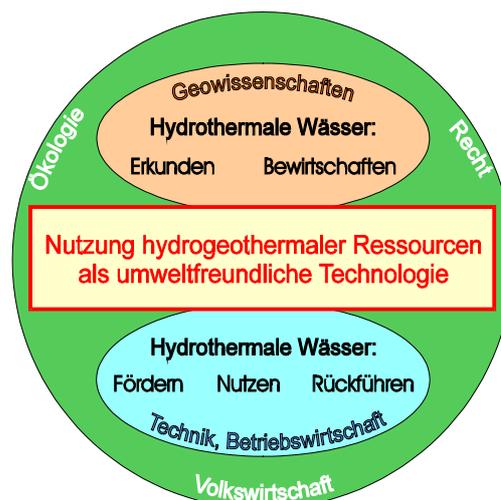


Abb. 1: Die gesellschaftlichen, geowissenschaftlichen, technischen und betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Nutzung hydrogeothermaler Energie bilden ein komplexes System, dessen genaue Erfassung und Charakterisierung zur umweltfreundlichen und damit zukunftsweisenden Nutzung erforderlich ist.

Projektstruktur

Die Projektleitung liegt bei Dr. Ernst Huenges, Leiter des Projektbereiches 4.4 "Physikalische Eigenschaften von Mineralen und Gesteinen" am GFZ. Diesem Bereich ist die zur Zeit mit vier wissenschaftlichen Mitarbeitern ausgestattete Projektgruppe Geothermie zugeordnet, die in Neubrandenburg angesiedelt ist. Entsprechend der interdisziplinären Zielsetzung und Arbeitsweise, handelt es sich dabei um einen Geophysiker, einen Geologen, eine Verfahrensschemikerin und einen thermischen Verfahreningenieur. Die Besetzung einer weiteren Stelle durch einen Betriebswirten wird zur Zeit erwogen.

Neben den für die Dauer von 3 Jahren angestellten Mitarbeitern der GFZ-Projektgruppe sind im Rahmen des Projektes folgende Forschungsprojekte an deutschen Universitäten und Hochschulen sowie am GFZ mit der Untersuchung von konkreten Teilthemen befasst:

- Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes von Bohrungen im Sediment und Kristallin (*Universität Karlsruhe (TH), Geophysikalisches Institut, Prof. Wilhelm und Mitarbeiter*)
- Mineralogische, chemische und mechanische Wechselwirkung zwischen Wärmetransportmedium und Speichergestein (*Universität Karlsruhe (TH), Mineralogisches Institut, Prof. Althaus und Mitarbeiter*)
- Stofftransport in hydrothermalen Reservoiren unter Berücksichtigung von chemischen Reaktionen und Wechselwirkungen Fluid-Gestein (*TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, Prof. Köckritz und Mitarbeiter*)
- Bestimmung von in-situ-Wärmeleitfähigkeiten (*TU-Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik, Prof. Burkhardt und Mitarbeiter*)
- Energiewirtschaftliche und systemanalytische Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen einer hydrothermalen Energiegewinnung in Deutschland (*Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendungen, Dr. Kaltschmitt und Mitarbeiter*)
- Geochemie von Grund- und Tiefenwässern zur hydrothermalen Nutzung (*GFZ Potsdam, Projektbereich 4.2, Prof. Erzinger und Mitarbeiter*)
- Modellierung der Langzeit-Entwicklung geothermischer Reservoire in Bezug zum regionalen geothermischen Feld (*GFZ Potsdam, Projektbereich 3.4, Prof. Bayer und Mitarbeiter*)
- 3-dimensionale Modellierung geohydrothermalen Prozesse zur Beurteilung von Aquiferen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Nutzbarkeit (*GFZ Potsdam, Projektbereich 3.4, Prof. Bayer und Mitarbeiter*)

Darüber hinaus werden weitere projektrelevante Themen am GFZ bearbeitet und es befinden sich zusätzlich Projekte bzw. Kooperationen in den Bereichen Betriebswirtschaft, Bergrecht und Bohrtechnologie in Vorbereitung.

Um den Zugang zum derzeitigen Wissenstand zu ermöglichen, sind Rahmenvereinbarungen mit verschiedenen Landesämtern und Firmen getroffen worden.

Arbeitsschwerpunkte

Die aktuellen Arbeitsschwerpunkte im Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

• Geologisch-petrophysikalische Charakterisierung der Nutzaquifere

Ziel der derzeitigen Untersuchungen ist, eine auf der geologisch-mineralogisch-petrophysikalischen Charakterisierung basierende Dokumentation geothermisch nutzbarer

Aquifere zu erarbeiten. Darauf aufbauend sollen die Reaktionen der ausgehaltenen Speichertypen mit unterschiedlichen Injektionswässern abgeschätzt und Rückschlüsse für Nutzungsmöglichkeiten und Nutzungstechnologien sowie für die Erkundungsmethodik abgeleitet werden.

- **Thermalwasserkonditionierung**

Das durch die Förderung und Nutzung in seinen physiko-chemischen Eigenschaften veränderte Thermalwasser wird unter den Gesichtspunkten möglicher Ausfällungen im obertägigen Bereich und der Speicherverträglichkeit bei der Reinjektion bewertet. Angestrebtes Ziel ist die Erstellung eines Parameterkataloges, mit dessen Hilfe eine standortspezifische Optimierung der Konditionierungssysteme ermöglicht werden soll.

- **Modellierung des Langzeitverhaltens geothermisch genutzter Aquifere**

An vereinfachten Modellen geothermisch genutzter Aquifere werden Testrechnungen zur räumlich zeitlichen Entwicklung der Lagerstätte durchgeführt. Einflußfaktoren der Berechnungen sind u.a. unterschiedliche Förder- und Injektionskonzepte sowie die Produktionszeiträume. Ziel der Untersuchungen ist eine Optimierung des Geothermiekreislaufes im Hinblick auf eine möglichst lange Lebensdauer der Nutzungsanlage und eine risikominimierte Aquiferbewirtschaftung.

- **Thermische Verfahrenstechnik**

Ziel der Arbeiten auf diesem Gebiet ist eine technische Auslegungsoptimierung unter Berücksichtigung der thermischen und ökologischen Vorteile und der investiven Nachteile. Eine Recherche bestehender geothermaler Anlagen auf der Grundlage eines fortlaufend überarbeiteten Fragenkataloges dient der Bestandsaufnahme der Anlagenkomponenten und der Abnehmerstrukturen. In einer anschließenden System- und Sensibilitätsanalyse wird die Notwendigkeit der einzelnen Komponenten sowie die mit diesen verbundene spezielle Problematik (z.B. Korrosionsanfälligkeit, mechanische Instabilität) dargestellt werden.

Vergleich des energiekonzeptionellen Aufbaus von drei geothermischen Heizzentralen

Kuno Schallenberg, Geoforschungszentrum Potsdam

Abstract

Three realized geothermal heating plants in Neubrandenburg and Neustadt-Glewe (Mecklenburg-Vorpommern, Germany) as well as Riehen (Kanton Basel, Switzerland) are compared with regard to their technical configuration. The aim of the comparison is to turn out the optimal structure for using hydrogeothermal resources.

It turned out, that a classification of the applications is necessary. With respect to the temperatures in the geothermal water circle, the utilization circle and the size of the utilisation area an assignment into different classes is proposed. Good conditions can be reached with a high difference between the temperature of utilisation and geothermal circle. In this case a lot of energy can be transmitted without using engines.

The investigation shows, that the phases of planing and operation should be discussed simultaneously.

Zusammenfassung

Drei in Betrieb befindliche geothermische Heizzentralen in Neubrandenburg und Neustadt-Glewe (Mecklenburg-Vorpommern, Deutschland) sowie Riehen (Kanton Basel, Schweiz) wurden hinsichtlich ihrer technischen Konfiguration verglichen. Ziel des Vergleiches war es, ein besonders geeignetes technisches Konzept zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen auszuweisen.

Schon mit den drei ausgewählten Anlagen zeigt sich, daß eine Klassifizierung der Anwendungsfälle erforderlich ist. Unter Berücksichtigung der potentiellen Abnehmer der erzeugten Wärme und der geologischen Rahmenbedingungen lassen sich diese drei geothermischen Heizzentralen in verschiedene Klassen einordnen. Dies ist zunächst als erste Näherung auf Basis der vorhandenen Datenlage zu sehen. Die Klasseneinteilung basiert insbesondere auf den Vor- und Rücklauftemperaturen im Heiznetzkreis, der Thermalwassertemperatur sowie auf der Größe des zu versorgenden Heiznetzes. Eine besondere energiewirtschaftliche Eignung ergibt sich durch eine große Differenz zwischen den Heiznetztemperaturen und der Thermalwassertemperatur, da dann ein hoher Anteil der Erdwärme im direkten Wärmeaustausch an den Verbraucher übergeben werden kann.

Die Untersuchungen zeigen, daß es insbesondere notwendig ist, Planungs- und Betriebsphasen der geothermischen Heizzentralen gemeinsam zu diskutieren.

Einleitung

Der energiekonzeptionelle Aufbau geothermischer Heizzentralen (GHZ) mit ihren typischen Anlagenkomponenten zur Bereitstellung von Wärme aus hydrothermalen Ressourcen wird analysiert. Dazu kann auf Arbeiten (Kabus, 1991; Oppermann, 1994; Barberie et al, 1995) aufgebaut werden, die ausführlich einzelne Anlagen beschreiben. Eine vergleichende Gegenüberstellung steht bisher jedoch aus. In dieser Arbeit wird anhand der untersuchten Anlagenbauten unter dem Gesichtspunkt der rationellen Energieanwendung versucht, eine "optimale Konfiguration" für den obertägigen Teil einer Nutzungsanlage herauszuarbeiten.

Vorgehensweise

Der Vergleich der GHZ erstreckt sich auf ausgeführte Anlagen. Eine Betrachtung der zu benennenden Konfiguration in Hinsicht auf betriebswirtschaftliche Eignung wird zunächst zurückgestellt.

Verglichen werden die GHZ in Neubrandenburg, in Neustadt-Glewe (beide Mecklenburg-Vorpommern) und in Riehen (Kanton Basel, Schweiz). Diese unterscheiden sich in der Art der eingesetzten Aggregate, welche in ihren Besonderheiten im folgenden diskutiert und bewertet werden.

Ein wesentlicher Teil der zum Vergleich herangezogenen Daten wurde an den Anlagenstandorten im persönlichen Gespräch mit den Betreibern erfaßt. Dadurch ergab sich teilweise Zugang zu scheinbar unbedeutenden, bzw. zahlenmäßig nicht faßbaren Auskünften. Diese können jedoch nachhaltigen Einfluß auf bestimmte Strukturentscheidungen gehabt haben. Beim Rückblick auf die Konzeptphase der Anlagenerstellung sind diese Informationen erforderlich, um die seinerzeit getroffenen Entscheidungen nachvollziehen zu können.

Bei den Gesprächen ergab sich auch, daß sich nur bedingt typische Anlagenfahrweisen erfassen lassen. Da der Jahresgang bei manchen Heiznetzen z.B. von Industrieabnehmern stark beeinflußt wird, führt eine Änderung des Produktions- und damit des Abnehmerverhaltens dieser Unternehmen zu einer nachhaltigen Beeinflussung des Wärmeverkaufs und damit zu anderen Fahrweisen als ursprünglich projektiert. Das gegenüber der Planungsphase geänderte Betriebsverhalten einer GHZ muß daher unter Einbeziehung der gewachsenen Einflüsse bewertet werden.

Besonderheiten der ausgewählten Geothermieanlagen

Die GHZ in Neustadt-Glewe und in Riehen nahmen ihren Betrieb im Jahre 1994 auf. Obwohl ein Teil der geologischen und die bohrtechnischen Arbeiten in Neustadt-Glewe zu DDR-Zeiten ausgeführt wurde, kann von nahezu zeitgleich und auf Basis eines ähnlichen Kenntnisstandes in Sachen Geothermie erstellten Heizsystemen ausgegangen werden.

Die Anlage in Neubrandenburg wurde schon im Jahre 1986 in Betrieb genommen und bietet eine weitere, durch gänzlich andere Rahmenbedingungen geprägte Konzeption zum Vergleich an. Dadurch, daß die Erstellung ca. 10 Jahre zurückliegt und daß sich durch die politischen Veränderungen auch neue technische Möglichkeiten ergaben, wurde diese Anlage schrittweise mit neuen Anlagenbauteilen versehen. Die GHZ Neubrandenburg hat heute eine Struktur, die aus energetischer Sicht auch für Neuplanungen als Vorbild dienen kann.

In allen drei Fällen erschließt eine Bohrungsdoulette den Nutzhorizont, eine wasserführende Sedimentschicht. An den beiden norddeutschen Standorten ist eine Mineralisation des Thermalwassers von weit mehr als 100 g/l (Neubrandenburg: 133 g/l (Kabus, 1991); Neustadt-Glewe: 219 g/l (Rockel und Werner, 1995) gegeben, während in Riehen eine Mineralisation von etwa 17 g/l (Bußmann, 1994) vorliegt. Alle Werte gelten als hohe Mineralisation. Daher ist auch in allen drei Fällen ein hohes Korrosionspotential gegeben. Deshalb konzipierten die Planer die Verwendung korrosionsbeständiger Bauteile, beispielsweise aus Kunststoff (z.B. Rohrleitungen) und aus Titan (z.B. Plattenwärmetauscher). Darüber hinaus werden die Ringräume der Sonden mit Stickstoff (N₂) als Inertgas beaufschlagt. In Neustadt-Glewe wird zusätzlich der gesamte obertägige Thermalwasserkreis durch dieses Inertgas geschützt. In Riehen wird außerdem in der Förderbohrung noch ein Inhibitor zugesetzt (Oppermann und Huser, 1995).

Neubrandenburg

In Neubrandenburg wird das Wasser aus einer Tiefe von etwa 1250 m mit einer Temperatur von 54 °C gefördert. Der Thermalwasserstrom beträgt 100 m³/h und ist nicht regelbar. Da das Abnehmernetz teilweise für ein besonders niedriges Temperaturniveau (im Auslegungszustand 65 °C / 35 °C) konzipiert wurde, kann ganzjährig ein Teil der Erdwärme im direkten Wärmetausch mit dem Heiznetzrücklauf ohne Einsatz zusätzlicher Anlagen geliefert werden. Weiterhin sorgt eine mit Gas thermisch angetriebene Absorptionswärmepumpe dafür, daß eine zusätzliche Auskühlung des Thermalwassers erfolgen kann.

Hierzu nutzt die Absorptionswärmepumpe (Stoffpaar: Lithium-Bromid / Wasser) die im Heiznetzrücklauf vorhandene Wärme zur Verdampfung ihres Arbeitsstoffes (Wasser) und kühlt den Heiznetzrücklauf weit unter das eigentliche Temperaturniveau aus. Danach durchströmt das Heiznetzwasser einen Plattenwärmetauscher und nimmt die Wärme aus dem Geothermiekreis auf. Anschließend wird es durch die Sekundärseite der Wärmepumpe (Absorber / Kondensator) geleitet und dadurch nachgeheizt.

Absorptionswärmepumpen können unter Einsatz sehr kleiner Elektroenergiemengen eine Verbesserung des Temperaturniveaus der Wärme erreichen. Der Wirkungsgrad (hier: die Leistungsziffer) einer Wärmepumpe verschlechtert sich, wenn ein größerer Temperaturhub von Primärseite zu Nutzerseite erforderlich ist. Aufgrund des starken Abfalls der Leistungsziffer von Absorptionswärmepumpen bei großem Temperaturhub eignen sich diese Maschinen eher für geringere Hübe.

Gegebenenfalls kann ein weiteres Nachheizen mit Hilfe der gasgefeuerten Spitzenlastanlage erfolgen (Kabus, 1991; Kuschel, 1995).

Neustadt-Glewe

In Neustadt-Glewe wurde die Nutzschrift in einer Tiefe von 2220 m erschlossen. Die Sondenkopftemperatur beträgt 96 °C. Maximal können dem Speicher 150 m³/h entnommen werden. Der Fördervolumenstrom kann durch den Einsatz einer frequenzgeregelten Thermalwasserpumpe variiert werden. Mit der derzeitigen Pumpe sind Volumenströme von 60 m³/h bis 125 m³/h realisierbar. Die Temperaturparameter des Heiznetzes im Auslegungszustand sind mit 90°C / 60°C angegeben. Daraus resultiert eine maximal verfügbare geothermische Leistung von 6,75 MW (Möllmann und Kabus, 1995; Bußmann, 1995).

Die Konzeption der Anlage erfolgte mit Blick auf ein Heiznetz, in welchem der Bedarf an industrieller Wärme einen breiten Rahmen einnehmen sollte. Somit hätte auch zu Zeiten eines geringen Wärmebedarfes in einem konventionellen Heiznetz (Sommer) ein Abnehmer für große Wärmemengen zur Verfügung gestanden. Da in einer späteren Phase der Anlagenkonzeption dieser Abnehmer deutlich kleiner ausfiel als geplant, führte der trotzdem fortgeführte Ausbau zu einem ungewöhnlich großen Anteil an geothermischer Energie auf der Erzeugerseite. Deshalb wird diese Anlage ohne die Installation einer Wärmepumpe betrieben. Da die Bedarfsdeckung des Netzes nur in kurzen Zeitintervallen von insgesamt ca. 1700 Stunden pro Jahr die Zuheizung des Spitzenlastsystems erfordert, würde eine Installation von Wärmepumpen wahrscheinlich nicht wirtschaftlich sein (Menzel, 1995; Bußmann, 1995).

Riehen / Basel

In Riehen stellt sich bei einer Fördersondentiefe von 1545 m eine Thermalwassertemperatur am Sondenkopf von 62 °C ein. Als Fördervolumenstrom wird 72 m³/h angegeben. Die Leistung des Geothermiekreises beträgt maximal 3,1 MW. Da nicht alle Abnehmer für die Belieferung mit Niedertemperaturwärme ausgestattet sind, wird das Heiznetz hier mit gewöhnlichen Temperaturparametern (im Auslegungszustand 90 °C / 60 °C) betrieben. In diesem Fall wird die Wärme des Thermalwassers kaskadenförmig zunächst im direkten Wärmetausch und nachfolgend durch eine Wärmepumpe weiter ausgekühlt. Die eingesetzten Wärmepumpen sind wegen der vergleichsweise niedrigen Thermalwassertemperatur und der hohen Heiznetztemperaturen als Kompressionswärmepumpen auf einen mechanischen Antrieb angewiesen. Realisiert wird der Antrieb durch Elektromotoren.

Zur Erzeugung der erforderlichen Elektroenergie sind zwei Block-Heiz-Kraft-Werk-Module (BHKW) mit Erdgasantrieb installiert. Otto-Motoren sorgen für den Antrieb von Generatoren. Diese erzeugen die gewünschte elektrische Energie. Die parallel zur Stromerzeugung anfallende Wärme aus diesen Modulen wird ebenfalls zur Versorgung des Heiznetzes verwendet. Außerdem ist in der Maschinenhalle eine weitere Kompressionswärmepumpe installiert, die die abgestrahlte Wärme der Komponenten auf eine nutzbare Temperatur transformiert und in das Heiznetz einspeist. Die zusätzliche Anlagenkomponente BHKW wirkt sich natürlich auf das erforderliche Investitionsvolumen aus, ist aber mit Blick auf die Versorgung der Pumpen, der Regelungstechnik und der Lichtanlage mit Elektroenergie von Vorteil. Durch die Konzeption mit BHKW-Modulen wird der zusätzliche Einsatz von Elektroenergie, die in konventionellen Abwärmekraftwerken erzeugt wurde, vermieden.

Die Spitzenlastabdeckung erfolgt hier durch Heizkessel, die leichtes Heizöl als Treibstoff verwenden (Oppermann und Huser, 1995; Informationsblatt Gemeinde Riehen, 1994)

Anlagenüberblick

- physikalische Randbedingungen

Standort	Einheit	Neubrandenburg	Neustadt-Glewe	Riehen
Jahr der Inbetriebnahme		1986	1994	1994
Tiefe der Förderbohrung	[m]	1250	2220	1545
Speicheraufschluß		Doublette	Doublette	Doublette
max. Fördervolumenstrom	[m ³ /h]	100	125	72
Sondenkopftemperatur bei max. Volumenstrom	[°C]	54	96	62
Salinität	[g/l]	133	219	17
max. aus Geothermie entnommene Leistung	[MW]	3,5	6,75	3,1

- Anlagenaufbau

zum Wärmetransport eingesetzte Komponenten	DWT Abs-Wp	DWT	DWT Komp-Wp BHKW
--	---------------	-----	------------------------

Abkürzungen: DWT: Direktwärmetauscher; Abs-Wp: Absorptionswärmepumpe; Komp-Wp: Kompressionswärme ; BHKW: Block-Heiz-Kraft-Werk

Tabelle 1: Überblick über die physikalischen Bedingungen der drei Anlagen und stichpunktartige Darstellung der unterschiedlichen Systemkonfigurationen.

Ergebnis

Die Gegenüberstellung der drei Anlagen zeigt unterschiedliche Anlagenkonfigurationen zur Wärmebereitstellung. Diese sind nicht nur als Folge von "meßbaren" Randbedingungen entstanden, sondern auch durch das aktuelle Zeitgeschehen. Ist für den Anlagenbetrieb die Einbindung einer Kompressionswärmepumpe erforderlich, so kann unter Umständen die Forderung bestehen, die erforderliche Elektroenergie selbst bereitzustellen. Als Konsequenz erfolgt dann die zusätzliche Einrichtung einer BHKW-Anlage.

Die wesentlichen Randbedingungen ergeben sich neben den geologischen Verhältnissen aus den Parametervorgaben der verbraucherseitigen Abnehmerstruktur. Dabei sind verschiedene Verhältnisse zwischen "Lieferanten" und "Abnehmer" abzuleiten:

- Eine hohe Thermalwassertemperatur ermöglicht die ganzjährige Einspeisung von Erdwärme schon in konventionellen, nicht speziell angepassten Heiznetzen. Da die Thermalwassertemperatur ständig größer als die Vorlauftemperatur im Heiznetz ist, ist der Einsatz der Spitzenlastanlage nur dann erforderlich, wenn tatsächlich über die geothermische Leistung hinaus Bedarf besteht.
- Liegt die Thermalwassertemperatur zeitweise unterhalb der Vorlauftemperatur aber höher als die Rücklauftemperatur, so kann ganzjährig ein Teil der geothermischen Energie im direkten Wärmetausch verwendet werden. Zu den Zeiten, zu denen die Vorlauftemperatur größer ist als die Thermalwassertemperatur, ist der Betrieb der Spitzenlastanlage unabhängig vom Leistungsbedarf zur Temperaturerhöhung erforderlich. Bei entsprechender Heiznetzgröße kann diese Aufgabe auch von einer Wärmepumpe erfüllt werden.
- Liegt die Thermalwassertemperatur sogar unterhalb der Rücklauftemperatur, so ist der Einsatz einer Wärmepumpe erforderlich.
- Grundsätzlich bietet ein niedriges Niveau der Heiznetztemperatur bessere Möglichkeiten zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen. Zum einen kann ein hoher Anteil der Erdwärme im direktem Wärmetausch, also ohne weiteren Anlagenaufwand, an den Verbraucher übertragen werden. Zum anderen bietet ein geringer Abstand zwischen Temperaturangebot und -bedarf die Chance, das Problem des Einsatzes von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen zu vermeiden, indem Absorptionswärmepumpen eingesetzt werden.

Ausblick

Weitere Arbeiten mit dem Ziel der Ausweisung besonders geeigneter Konfigurationen hydrogeothermaler Nutzungsanlagen müssen unter Berücksichtigung der thermodynamischen Bedingungen auf der Thermalwasserseite und der Abnehmerstrukturen auf eine breitere Datenbasis gestützt werden. Dann kann das gesamte Anwendungsspektrum der Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen soweit strukturiert werden, daß anschließend für die einzelnen Kategorien unterschiedliche Anlagenzusammenstellungen als Vorzugsvarianten ausgewiesen werden können.

Literatur:

Barbier, E., G. Frye, E. Iglesias und G. Palmason (Hrsg.), *Worldwide Utilization of Geothermal Energy: An Indigenous, Environmentally Benign Renewable Energy Resource, Proceedings of the World Geothermal Congress, 1995*, Volume 3, ISBN 0-473-03123-X, Florence, Italy, 1995.

Bußmann, W., *Riehen: Geothermie im Wärmeverbund*, Geothermische Energie, Heft 9, Seite 8 ff., 1994.

Bußmann, W., *Daten und Fakten: Projektüberblick*, Geothermische Energie, Heft 11, Seite 10 ff., 1995.

Informationsblatt Gemeinde Riehen, *„Wärmeverbund mit Geothermienutzung“*, Riehen, 1994.

Kabus, F., *Monographien geothermischer Heizzentralen*, Geothermie, Wärme aus der Erde, Verlag C. F. Müller GmbH, ISBN 3-7880-7398-5, Karlsruhe, 1991.

Kuschel, W., Stadtwerke Neubrandenburg GmbH, *Besichtigung der geothermischen Heizzentrale in Neubrandenburg*, 1995.

Menzel, H., Erdwärme Neustadt-Glewe GmbH, *Besichtigung der geothermischen Heizzentrale in Neustadt-Glewe*, 1995.

Möllmann, G.-U. und F. Kabus, *Verfahrenstechnik des Thermalwasserkreislaufes*, Geothermische Energie, Heft 11, Seite 26 ff., 1995.

Oppermann, G., *Kriterien des Investors für ein Fernwärmeprojekt, Beispiel: Geothermieanlage Riehen (Schweiz)*, Geothermische Energie, Nutzung, Erfahrung, Perspektive, Tagungsband: 3. Geothermische Fachtagung, ISBN 3-930157-25-X, Schwerin, 1994.

Oppermann, G. und M. Huser, Gruneko AG, *Besichtigung der geothermischen Heizzentrale in Riehen / Basel*, 1995.

Rockel, W. und R. Werner, *Die geologischen Bedingungen für die Thermalwassergewinnung und -verpressung*, Geothermische Energie, Heft 11, Seite 20 ff., 1995.

Ganzheitliche Energie- und Emissionsbilanzen einer hydrothermalen Wärmebereitstellung

Martin Kayser und Martin Kaltschmitt, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendungen, Universität Stuttgart

Abstract:

In this study a life cycle analysis of a heating unit in Riehen (Kanton Basel, Switzerland) was performed, taking into account the material and energy expenditures and the emissions from construction, operation and disposal of the heating unit.

The heating unit consisted of a basic unit that used hydrothermal energy in combination with two gasfired block-heating-powerstations and a oilfired backup unit. The basic unit provides 85% of the yearly demand of heat and the backup unit provides the remaining 15 % .

Using the computer program GEMIS, it was possible to include the processes dealing mainly with the supply of necessary materials and energycarriers (recovery, transport, manufacturing...).

An analogous life cycle analysis was conducted for two oilfired heating units. The first one determines the same amount of heat as the complete geothermal heating unit, the second one the same amount of heat as just the basic unit of the geothermal heating unit.

By comparing the energy expenditures and emissions of the geothermal and the oilfired heating units, it was shown that hydrothermal energy decreased the amount of energy that contributes to the anthropogenic greenhouse effect by 50%.

The higher contribution of the global warming potential of the geothermal heating unit caused by higher expenditures for construction are equaled after 5 month because of the higher operating-emissions of the oilfired heating unit.

Despite the geothermal heating unit's high CO₂-equivalent-emissions, compared to the oilfired heating unit, the emissions are equal after just five months, due to the higher operating-emissions of the latter.

Furthermore it was shown that human- and ecotoxic emissions were reduced by using hydrothermal energy instead of burning oil.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	22
2 Methodik	23
2.1 Ziel- und Systemdefinition	24
2.2 Sachbilanz.....	26
2.3 Wirkungsbilanz.....	28
2.4 Bewertung.....	29
3 Geothermische Heizzentrale Riehen	30
3.1 Grundlastanlage	31
3.2 Spitzenlastanlage	33
4 Bilanzen der geothermischen Heizzentrale	34
4.1 Basisdaten	35
4.2 Errichtung	38
4.2.1 Materialaufwand.....	39
4.2.2 Energieaufwand	41
4.2.3 Emissionen	44
4.2.4 Gesamtbilanz	44
4.3 Betrieb	46
4.3.1 Materialaufwand.....	46
4.3.2 Energieaufwand und Emissionen	47
4.3.3 Gesamtbilanz	49
4.4 Entsorgung.....	50
4.4.1 Materialaufwand.....	50
4.4.2 Energieaufwand und Emissionen	50
4.4.3 Gesamtbilanz	51
4.5 Gesamtbilanz	52
5 Bilanzen der Vergleichsanlage	53
5.1 Errichtung	53
5.1.1 Materialaufwand.....	53
5.1.2 Energieaufwand und Emissionen	54
5.1.3 Gesamtbilanz	54
5.2 Betrieb	55
5.2.1 Materialaufwand.....	55
5.2.2 Energieaufwand und Emissionen	55
5.2.3 Gesamtbilanz	56
5.3 Entsorgung.....	56
5.3.1 Energieaufwand und Emissionen	56
5.3.2 Gesamtbilanz	57
5.4 Gesamtbilanz	58

6 Auswertung	59
6.1 Energieaufwendungen	59
6.1.1 Energetische Kenngrößen	59
6.1.2 Diskussion der Ergebnisse	61
6.2 Ergebnisdiskussion Emissionen	64
6.2.1 Treibhausgase.....	64
6.2.2 Human- und ökotoxische Stofffreisetzungen.....	67
7 Schlußbetrachtung	69
8 Literatur	71

1 Einleitung und Zielsetzung

Die energiebedingten Umweltauswirkungen werden immer offensichtlicher. Die Optimierung bestehender Energiesysteme hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und die Suche nach umwelt- und klimaverträglichen sowie allgemein akzeptierbaren Alternativen gewinnen deshalb verstärkt an Bedeutung. Die Nutzung des geothermischen Potentials und damit der in der Erde gespeicherten Energie stellt eine solche Alternative dar, die in Ansätzen zwischenzeitlich weltweit und auch in Deutschland schon eine gewisse Verbreitung erfahren hat.

Zur Zeit sind weltweit Anlagen zur Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen mit einer installierten Leistung von 14 000 MW_{th} in Betrieb und ersetzen dadurch fossile Energieträger. Neben der Nutzung der in der Erde gespeicherten Energie für die Stromerzeugung, die jedoch nur unter ganz bestimmten Bedingungen (d. h. hohe Temperaturen der geothermischen Vorkommen) und damit nicht in Deutschland realisiert werden kann, und für eine direkte und/oder über entsprechende Nah- und Fernwärmenetze realisierte Beheizung von Gebäuden kann die Wärme als Prozeßwärme (u. a. Trocknungsanlagen), in Gewächshäusern und Gärtnereien, in der Balneologie (z. B. Thermal- und Heilbäder) oder auch als Brauchwasser genutzt werden. In Deutschland kann die Energie aus der Erde aufgrund der geologischen Gegebenheiten (fast) nur zur Wärmebereitstellung verwendet werden, der gegenwärtige Ausbaustand beträgt etwa 34 MW [Kaltschmitt und Reinhardt, 1996]. 1984 begann die großtechnische Nutzung für die Fernwärmeversorgung mit dem ersten geothermischen Heizwerk in Waren/Müritz. Die zur Zeit modernste Anlage ging im April 1995 in Neustadt-Glewe in Betrieb. Mit einer Gesamtleistung von 10 MW versorgt diese Anlage über 1 500 Haushalte und gewerbliche Kunden [Kaltschmitt und Reinhardt, 1996].

Eine solche Substitution von Energiebereitstellungssystemen auf fossiler Basis durch alternative Systeme und damit durch Erdwärme ist bezüglich einer Verbesserung der mit der Wärmebereitstellung verbundenen Umweltauswirkungen letztlich aber nur dann sinnvoll, wenn auch unter Einbeziehung sämtlicher vor- und nachgelagerter Prozesse zur Energiebereitstellung eine Verringerung der negativen Umweltauswirkungen erreicht wird. Damit dürfen bei einem entsprechenden Vergleich nicht ausschließlich die direkten Umwelteinflüsse beispielsweise infolge des Anlagenbetriebes betrachtet werden; vielmehr müssen auch die Anlagenerichtung und -entsorgung sowie sämtliche vor- und ggf. nachgelagerten Prozesse (u. a. Stahlherstellung, Bereitstellung der fossilen Treib- und Brennstoffe) in die Betrachtung mit einbezogen werden. Eine solche vergleichende Analyse ist mit Hilfe der ganzheitlichen Bilanzierung möglich.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Arbeit, ausgewählte Umweltauswirkungen einer Nutzung hydrothermalen Energievorkommen zur Wärmebereitstellung mit der zu substituierenden Wärmebereitstellung durch Verbrennung leichten Heizöls ganzheitlich zu analysieren und zu vergleichen. Dazu wird exemplarisch die geothermische Heizzentrale der Gemeinde Riehen bei Basel in der Schweiz betrachtet im Vergleich zu einer erdölbetriebenen Heizzentrale - konzipiert zur Deckung der gleichen Nutzenergie. Dabei wird zunächst auf die ganzheitliche Bilanzierung als die hier angewendete Analysemethode eingegangen. Anschließend wird eine hydrothermale und eine fossile Wärmebereitstellung hinsichtlich ganzheitlicher Material-, Energie- und Emissionsbilanzen für die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung systemtechnisch verglichen. Die Ergebnisse dieses Systemvergleichs werden abschließend dargestellt und wesentliche Schlußfolgerungen diskutiert.

2 Methodik

Mit der Bereitstellung von Nutzwärme aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen und aus leichtem Heizöl können sehr verschiedenartige Wirkungen auf die Umwelt verbunden sein, die infolge der teilweise komplexen Zusammenhänge weder ohne weiteres erkennbar noch vergleichbar sind. Deshalb ist es wichtig zu wissen, wo welche Umweltfolgen wann auftreten bzw. wie diese Belastungen im Vergleich zu den Belastungen möglicher Alternativen zu bewerten sind. Eine Methode, die zur Lösung dieser Problematik beitragen kann, stellt die ganzheitliche Bilanzierung dar. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden zunächst die grundsätzliche Vorgehensweise bei einer ganzheitlichen Bilanzierung diskutiert.

Bei der ganzheitlichen Bilanzierung handelt es sich um eine methodische Vorgehensweise, mit deren Hilfe ausgewählte Auswirkungen von Bilanzobjekten möglichst vollständig bilanziert und letztlich auch bewertet werden. Grundsätzlich können unterschiedlichste Objekte bilanziert werden, z. B. Produkte (Milchverpackungen, Kraftfahrzeuge), Dienstleistungen (Lichtbereitstellung, Kältebereitstellung), Systeme (Verkehr, Energiewirtschaft) oder Unternehmen. Im folgenden wird stellvertretend dafür der Begriff Produkt verwendet.

Das Ziel der Bilanzierung kann entweder eine Schwachstellenanalyse oder eine vergleichende Bewertung der Vor- und Nachteile verschiedener Alternativen sein. Dazu wird der gesamte Lebenszyklus des untersuchten Produktes von der Rohstofferschließung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert. Dabei hat sich eine Unterteilung der ganzheitlichen Bilanzierung in Ziel- und Systemdefinition, Sachbilanz, Wirkungsbilanz und Bewertung als sinnvoll erwiesen (Abbildung 2-1).

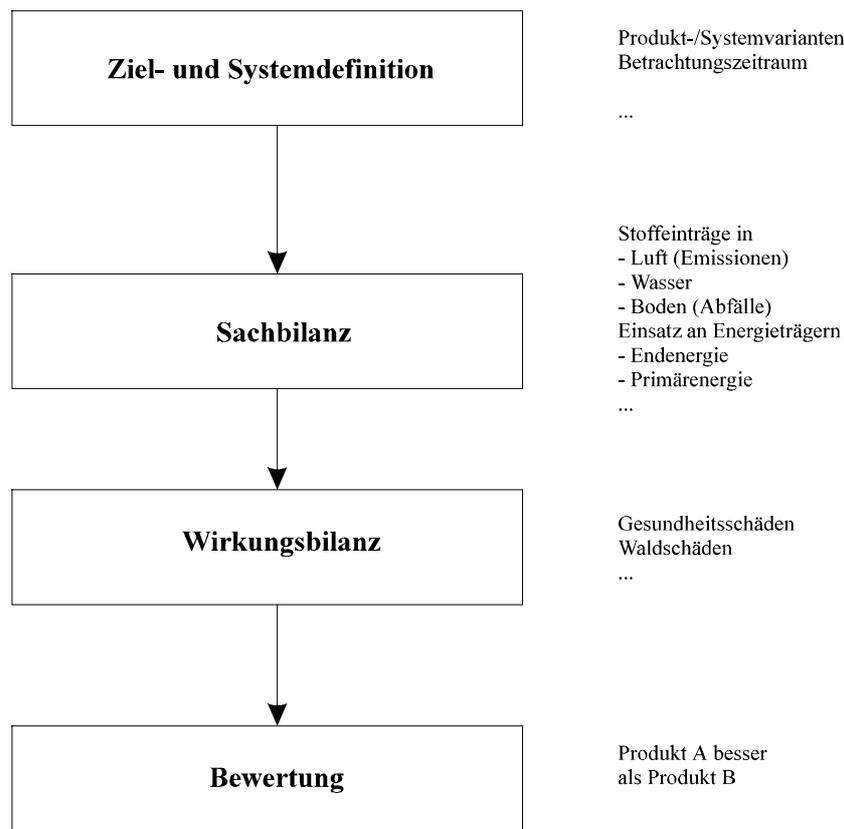


Abbildung 0-1: Vorgehensweise bei der ganzheitlichen Bilanzierung [nach: **Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), 1995; Wiese et al., 1995**]

Die Ökobilanz, in der grundsätzlich ähnliche Inhalte bearbeitet werden, grenzt sich von der ganzheitlichen Bilanzierung insofern ab, als das sie sich ausschließlich auf umweltbezogene Fragestellungen beschränkt. Demgegenüber ist es bei einer ganzheitlichen Bilanzierung prinzipiell möglich, darüber hinausgehende Aspekte in die Untersuchung mit einzubeziehen [Kaltschmitt und Reinhardt, 1996].

2.1 Ziel- und Systemdefinition

Der erste Schritt einer ganzheitlichen Bilanzierung ist die exakte Definition des Ziels der Untersuchung und damit der zu untersuchenden Fragestellung (z. B. Vergleich ausgewählter Umweltfolgen einer Stromerzeugung aus regenerativen Energien mit denen aus Steinkohle und Erdgas). Dies ist entscheidend für sämtliche nachfolgenden Schritte der ganzheitlichen Bilanzierung; ohne eine eindeutige Zielfestlegung sind praktisch keine verwertbaren Ergebnisse erzielbar.

Daran schließen sich weitere Schritte an (u. a. Auswahl der Bilanzierungsvarianten, Festlegung der funktionellen Äquivalenz, der Analysetiefe, der Inhalte von Sach- und Wirkungsbilanz, räumliche und zeitliche Abgrenzung). Da Umweltauswirkungen im Regelfall nicht absolut, sondern nur relativ zu einer möglichen Alternative analysierbar sind, ist zusätzlich ein geeignetes Referenzsystem zu definieren. Damit werden in der Ziel- und Systemdefinition die Inhalte der Sach- und Wirkungsbilanz sowie der Bewertung im wesentlichen bereits festgelegt. In der Praxis wird sich allerdings ein iteratives Verfahren ergeben, da der Wissenszuwachs während der Bilanzierung im Regelfall Auswirkungen auf die Ziel- und Systemdefinition hat.

Funktionelle Äquivalenz. Eine Schwachstellenanalyse kann bereits durchgeführt werden, wenn lediglich ein einzelnes Produkt bilanziert worden ist. Aussagen über Vor- und Nachteile eines Produktes sind dagegen nur möglich, wenn ein Vergleich mehrerer Möglichkeiten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt alle zur Verfügung stehen, durchgeführt wird. Ein solcher Vergleich stellt beispielsweise eine Milchverpackung aus Glas einer Verpackung aus Kunststoff oder eine Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen der aus Erdgas gegenüber. Dabei können nicht nur real existierende Varianten herangezogen werden, sondern auch Entwürfe zukünftiger Varianten.

Die Alternativen sollten funktional äquivalent sein; z. B. bei Verpackungen im Hinblick auf Volumen, Nutzungsdauer, Menge der verdorbenen/verlorenen Ware. Da Produkte häufig nicht nur eine, sondern mehrere Funktionen haben, ist es mitunter sehr schwierig, eine geeignete Vergleichsbasis zu finden. Die methodisch schlüssigste, aber auch die aufwendigste Lösung besteht in der Erweiterung der Varianten um zusätzliche Produkte, bis alle betrachteten Varianten die gleichen Funktionen erfüllen.

Der direkte Vergleich der in einer Geothermieanlage erzeugten Wärme mit der in einer konventionellen Heizzentrale bereitgestellten Wärme ist nicht zielführend. Zur Sicherstellung der funktionalen Äquivalenz muß eine Gegenüberstellung unter Berücksichtigung von Backup-Systemen (z. B. erdölgefeuerte Kessel in Verbindung mit Geothermieanlagen) im Rahmen einer definierten Versorgungsaufgabe erfolgen.

Die Wahl der Funktion kann das zu betrachtende System stark verändern. Während bei der Bilanzierung verschiedener Stromerzeugungssysteme unterschiedliche Möglichkeiten der Strombereitstellung betrachtet werden, enthält eine Bilanzierung der Dienstleistung "Lichtbereitstellung" darüber hinaus die Möglichkeit, auch Energiesparlampen oder andere Varianten der Lichtbereitstellung (Petroleumlampe, Kerze) zu untersuchen, wobei die Strombereitstellung als ein mögliches Untersystem wieder in Erscheinung treten kann.

Referenzsystem. Nicht alle Stoff- und Energieströme und damit nicht alle Wirkungen sind notwendigerweise dem betrachteten Produkt zuzurechnen. Beispielsweise sind beim Anbau von Bioenergieträgern bestimmte Energieeinsätze in Form von Düngemitteln, Traktortreibstoff usw. notwendig; aber auch der Nichtanbau ist mit einem Energieaufwand verbunden (z. B. durch maschinelle Feldarbeit zur Begrünung der Rotations- oder Dauerbrache). Ebenso finden auf den meisten (nicht versiegelten) Flächen biotische und abiotische Prozesse mit entsprechenden Stoffströmen statt, auch ohne daß diese Flächen vom Menschen genutzt werden.

Einer landwirtschaftlichen Nutzung (z. B. im Zusammenhang mit der Biomasseproduktion) beispielsweise sollten daher nur diejenigen Differenz-Stoffströme zugerechnet werden, die sich als Folge der Nutzung ergeben. Eine methodisch korrekte Vorgehensweise erfordert somit prinzipiell die Bilanzierung gegenüber Referenzsystemen, um die Veränderung zu erfassen, die durch die Nutzung (oder Nicht-Nutzung) eines bestimmten Systems entsteht. Die Wahl der Referenzsysteme ist abhängig von der Fragestellung, unter der die gesamte Bilanzierung steht. Das Referenzsystem macht sich in der bilanztechnischen Praxis aber oft nicht bemerkbar, da es bei vielen Prozessen de facto nicht existent ist (z. B. ist der Rohöltransport über die Weltmeere mit einem bestimmten Energieaufwand und gewissen Stofffreisetzungen verbunden, ein Nichttransport aber mit praktisch keinen Stoffumsätzen).

Inhalte der Sach- und Wirkungsbilanz. Hier ist festzulegen, welche Eingangs- und Ausgangsgrößen in der Sachbilanz quantifiziert werden. Diese Festlegung sollte bereits in Hinblick auf die Erstellung von Wirkungsbilanz und Bewertung erfolgen; d. h. es sollte eine zielorientierte Analyse definierter Größen realisiert werden und nicht eine Sammlung von letztlich nicht verwertbaren Daten (d. h. keine Erarbeitung eines Datenfriedhofs).

Jeder analysierte Stoff (z. B. Kohlendioxidfreisetzungen, Lachgasemissionen) muß durch entsprechende meßbare und operationalisierbare Größen (z. B. Stofffreisetzungen in t/a, in mg/Nm³) einer Bilanzierung zugänglich und damit quantifizierbar gemacht werden. Durch die Auswahl bestimmter Größen werden aber zugleich andere Informationen vernachlässigt. Eine mögliche Meßgröße für das Abfallaufkommen eines bestimmten Prozesses ist z. B. das Gewicht - dann fehlen aber Aussagen zu dem Volumen oder der Toxizität; deshalb sind ggf. zusätzliche Beschreibungsgrößen hinzuzuziehen. Das Ziel muß es hier sein, sachgerechte und zielführende Indikatoren auszuwählen. In der bilanztechnischen Praxis ist es aufgrund mangelnder Daten oft nicht möglich, alle potentiellen einen Prozeß beschreibenden Größen zu erfassen; es müssen aber auf jeden Fall die in der Zieldefinition festgelegten Größen bilanziert werden.

Analog zur Festlegung der Bilanzierungsgrößen der Sachbilanz sind die betrachteten Wirkungen für die Wirkungsbilanz zu bestimmen. Dabei gibt es wechselseitige Abhängigkeiten von Sach- und Wirkungsbilanz. Beispielsweise ist es möglich, daß ein ökotoxischer Schadstoff nicht wirksam wird, da der Stoff zuvor in unschädliche Verbindungen zerfällt. Daher kann es sinnvoll sein, in der Sachbilanz entsprechende Stoffe in Verbindung mit dem Ort seiner Entstehung bzw. Freisetzung zu erfassen, um anschließend bei der Wirkungsbilanz Rückschlüsse über die Wirkungen zu erhalten. Beispielsweise ist die Freisetzung von Dieselpartikeln in Ballungsgebieten ggf. mit humantoxischen Wirkungen verbunden; bei der Freisetzung über den Weltmeeren (z. B. bei Tankern) ist diese Wirkung jedoch zu vernachlässigen. Für global wirksame Stoffe (z. B. klimarelevante Emissionen) ist dagegen der Ort der Freisetzung unmaßgeblich, so daß eine entsprechende Datenerhebung unter diesem Aspekt weder erforderlich noch sinnvoll ist.

Bilanzgrenzen. Weiterhin ist festzulegen, welche Schritte des sogenannten Produktlebenszyklus in die Betrachtungen einbezogen werden. Üblicherweise soll sich die Bilanzierung von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung und Wiederverwertung erstrecken ("von der Wiege bis zur Bahre"), um alle mit diesem Produkt verbundenen Belastungen zu erfassen. In diesen einzelnen Phasen des Lebenszyklus werden wiederum andere Produkte verwendet, die zumindest anteilig dem Produktlebenszyklus des primä-

ren Produktes zuzuordnen sind. Beispielsweise findet der Transport von Milchflaschen zwischen Erzeuger und Verbraucher jeweils mit Hilfe von Lastkraftwagen auf öffentlichen Straßen statt, die Düngung nachwachsender Rohstoffe erfolgt mit Hilfe von landwirtschaftlichen Maschinen usw.

Für eine vollständige Bilanzierung eines Produktes müßten also sämtliche Substrukturen in die Untersuchung einbezogen werden, u. a. der anteilmäßig in Anspruch genommene Verkehrsraum, das Stromerzeugungssystem, der Schreibtisch im Büro des Verwaltungsangestellten mit- samt der zugehörigen Schreinerei sowie der Maschinenbauindustrie und der Forstwirtschaft - und wegen der internationalen Verflechtungen letztlich wohl die gesamte Weltwirtschaft. Um überhaupt eine Bilanzierung durchführen zu können, sind daher gegenwärtig Abbruch-/Abschneidekriterien notwendig, durch die die Analysetiefe der Bilanzierung festgelegt wird.

Durch die Wahl geeigneter Varianten und Referenzsysteme kann u. U. auf die Untersuchung bestimmter Lebenswegabschnitte und/oder spezifischer Vorketten verzichtet werden, da sie in sämtlichen Varianten zu gleichen oder ähnlichen Anteilen genutzt werden und damit bei einem Vergleich keine zusätzliche Information liefern (z. B. Berücksichtigung der Straßeninfrastruktur bei der vergleichenden Bilanzierung der ökologischen Auswirkungen fester Bioenergieträger zur Wärmebereitstellung; die Straßeninfrastruktur wird bei allen potentiellen Versorgungsketten in einer vergleichbaren Weise in Anspruch genommen). Deshalb ist letztlich eine Gegenüberstellung verschiedener Optionen nur dann sinnvoll und zielführend, wenn die Ergebnisse nach einer einheitlichen Vorgehensweise und mit identischen Systemgrenzen ermittelt wurden.

2.2 Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die Größen aufgeführt, die in das betrachtete Produkt (bzw. System) einfließen (Input) bzw. das betrachtete Produkt (bzw. System) verlassen (Output). Damit ist u. a. der Verbrauch an Ressourcen und die Nutzung der Natur als Aufnahmemedium für Schadstoffe zu quantifizieren, also z. B. die Luft-, Wasser- und Bodenbelastungen durch Stoffströme, der Lärm, die Flächenbelastung oder der Verbrauch an Rohstoffen bzw. an Energieträgern.

Letztlich besteht die Sachbilanz aus der Auflistung der in der Ziel- und Systemdefinition festgelegten Eingangs- und Ausgangsgrößen, differenziert nach einzelnen Abschnitten eines Lebensweges. Um diese Größen zu erhalten, muß die Realität so weit in ein Modell überführt werden, daß die zu bilanzierenden Größen quantifizierbar werden. Dazu kann die Prozeßkettenanalyse oder die Input/Output-Analyse zum Einsatz kommen.

- Prozeßkettenanalyse

Bei der Prozeßkettenanalyse wird ein beliebig komplexes System, das in der Systemdefinition festgelegt wurde, in endlich viele, überschaubare Teilsysteme (Prozesse) zerlegt. Einzelne Prozesse zeichnen sich durch entsprechende Wandlungen aus: Eingangsgrößen eines Prozesses werden innerhalb dieses Prozesses in Ausgangsgrößen umgewandelt. Für jeden einzelnen Prozeß können die ein- und austretenden Energie- und Stoffströme bestimmt werden. Prinzipiell ist eine sehr hohe Genauigkeit erreichbar, die von der Verfügbarkeit der Daten, den Kenntnissen über Produkt und Prozesse sowie der Genauigkeit der Modellierung abhängt.

Eine sehr detaillierte Modellierung ist aber mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Jede Lebensphase eines Produktes erfordert üblicherweise die Nutzung anderer Produkte, die sich in Investitionsgüter (z. B. Gebäude, technische Anlagen, Transportfahrzeuge) und Betriebsstoffe (z. B. Kohle, Strom, Wasser, Öl) unterteilen lassen. Betriebsstoffe sind dadurch charakterisiert, daß sie durch den Prozeß umgewandelt werden. Sie stehen nach der Nutzung

nicht mehr in der ursprünglichen Form dem gleichen Prozeß zur Verfügung und müssen folglich neu zugeführt werden, um den Prozeß aufrecht zu erhalten (z. B. wird Stahl zur Autotür oder Prozeßwärme zur Abwärme umgewandelt). Investitionsgüter unterliegen demgegenüber keiner Umwandlung durch den Prozeß, sondern nur einer Abnutzung (z. B. Maschinen, Gebäude, Transportfahrzeuge, Straßen).

Eine vollständige Bilanz müßte nun die Lebenswege sämtlicher dieser Investitionsgüter und Betriebsmittel zusätzlich zum eigentlich zu bilanzierenden Produkt erfassen; dies ist jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit einem nicht leistbaren Aufwand verbunden. Um die Erstellung einer Bilanz überhaupt erst zu ermöglichen, wird daher die Prozeßkette nur so weit zurückverfolgt, bis die Vernachlässigung weiterer Vorleistungen keinen wesentlichen Fehler im Gesamtergebnis verursacht (vgl. Ziel- und Systemdefinition).

- Input/Output-Rechnung

Die Input/Output-Rechnung wurde ursprünglich für volkswirtschaftliche Fragestellungen entwickelt, um die wertmäßige Verflechtung der Sektoren einer Volkswirtschaft darzustellen. Dies erfolgt in Form einer Tabelle (Input/Output-Tabelle bzw. I/O-Tabelle), in deren erster Spalte und Zeile die Sektoren aufgeführt sind und im übrigen Bereich die Geldwerte, die ein Sektor an den anderen liefert.

Die Input/Output-Tabellen sind prinzipiell auf andere nichtmonetäre Ströme erweiterbar (Energie-, Emissions-, Materialströme usw.). Mit Hilfe mathematischer Umformungen können die Tabellen anschließend analysiert werden, um beispielsweise den Energieaufwand für die Produktion eines Gutes zu bestimmen (Input/Output-Analyse).

Im Gegensatz zur Prozeßkettenanalyse geht die Input/Output-Rechnung von volkswirtschaftlichen Daten mit einem hohen Aggregationsgrad aus. Deshalb ist die Input/Output-Rechnung auf der Basis der volkswirtschaftlichen I/O-Tabellen nur dann zur Untersuchung einzelner Techniken geeignet, wenn diese für einen Produktionsbereich "typisch" sind; in der Regel handelt es sich dabei um Massenprodukte.

Sind die Input/Output-Tabellen verfügbar, hat diese Vorgehensweise einen vergleichsweise geringen Arbeitsaufwand zur Folge. Von Nachteil sind die hohe Aggregation der Daten und damit die Beschränkung auf grobe Abschätzungen mit hohen Unsicherheiten.

Unabhängig von der letztlich gewählten methodischen Vorgehensweise sind bei der Erstellung einer Sachbilanz folgende grundsätzliche Probleme zu lösen:

- Kuppelproduktion

Entstehen in einzelnen Verarbeitungsstufen mehrere Produkte (z. B. Stoffe), ist es erforderlich, die bis zu dieser Verarbeitungsstufe angefallenen Aufwendungen den einzelnen Produkten zuzuordnen. Die Aufteilung der Umweltbelastungen auf diese verschiedenen Produkte ist aber nicht unproblematisch und kann beispielsweise entsprechend der Massen-, Volumen- oder der Molmassenanteile erfolgen, sich an energetischen Größen (Brennwert, Heizwert, Enthalpie), am wirtschaftlichen Wert oder an anderen Kriterien orientieren [Kaltschmitt und Reinhard, 1995].

Für die methodisch begründbare Anwendung jeder dieser Optionen kann es in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen jeweils eine stichhaltige Erklärung geben; entsprechend unterschiedlich sind dann aber auch die erzielten Ergebnisse. Daher ist grundsätzlich zu prüfen, wie sensitiv das Ergebnis auf die verschiedenen Möglichkeiten einer Aufteilung ist. Grundsätzlich sind diese Zurechnungsprobleme wissenschaftlich nicht eindeutig lösbar.

- Datenqualität und -verfügbarkeit

Die Daten und damit die Ergebnisse einer Bilanzierung sind orts- und zeitabhängig sowie häufig aufgrund der Zieldefinition und der Wahl der Systemgrenzen nur für eine bestimmte Fragestellung relevant. Die Verwendung von in der Vergangenheit publizierten Literaturdaten führt häufig zu Problemen, da durch die zwischenzeitlich umgesetzte technische Weiterentwicklung durchaus erhebliche Veränderungen stattgefunden haben können. Die Veränderung von Größen wie Gewicht, Wasser- oder Energieverbrauch, der Wechsel von Zulieferern, die Verwendung anderer Technologien oder Materialien oder schließlich lokal unterschiedliche Stromerzeugungssysteme (Wasserkraft, Steinkohle) lassen publizierte Daten schnell veralten. Außerdem haben die benötigten Daten beispielsweise für den Hersteller häufig eine existenzsichernde Bedeutung; sie dürfen deshalb im Regelfall nicht veröffentlicht werden und sind damit meist auch nicht verfügbar. Die erforderlichen aktuellen Daten stehen daher nicht immer zur Verfügung; dies hat ggf. einen hohen Aufwand zur Datenbeschaffung zur Folge.

2.3 Wirkungsbilanz

Wirkungen entstehen nicht durch die Stoffströme innerhalb eines Produktlebensweges (bzw. Systems), sondern durch die Stoffströme, die in den Lebensweg einfließenden bzw. aus diesem austretenden und in den entsprechenden Quellen bzw. Senken Veränderungen hervorrufen. Beispielsweise wird bei der Stromerzeugung aus Steinkohle infolge der CO₂-Einträge in die Senke "Atmosphäre" eine Veränderung ("Wirkung") hervorgerufen, die als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet wird. Ebenso stellt eine Veränderung der Quellen eines Systems eine Wirkung dar; ein Beispiel hierfür ist der Verbrauch an Rohstoffen wie Mineralien oder fossilen Energieträgern, der sogenannte Ressourcenverbrauch.

Die von einem Produkt/System verursachten Wirkungen können sehr unterschiedlicher Art sein; hier werden von den möglichen Wirkungen im folgenden nur umweltbezogene Wirkungen näher diskutiert (z. B. Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe, Gewässerbelastungen). Andere Wirkungen wie z. B. Wohlfahrt, individuelle Zufriedenheit, energiepolitische Unabhängigkeit, Risiken durch Unfälle u. ä. werden nicht betrachtet.

Eine Analyse von Wirkungen kann entweder durch die Abschätzung des Gefährdungspotentials eines Stoffes oder aber durch eine Schadensabschätzung erfolgen. Die methodischen Arbeiten innerhalb von Ökobilanzen oder ganzheitlichen Bilanzierungen konzentrieren sich dabei derzeit im wesentlichen auf den Ansatz der Abschätzung eines Gefährdungspotentials [UBA-Texte, 1995].

Bei der Schadensabschätzung wird versucht, die Schäden (Waldschäden, Gesundheitsschäden, Materialschäden usw.) zu quantifizieren, die aus den in der Sachbilanz ermittelten Stofffreisetzungen resultieren. Dazu werden sogenannte Wirkungspfade gesucht, die auf kausalen Verknüpfungen zwischen der Schadstoffemission, der Schadstoffausbreitung und den quantifizierbaren Wirkungen beruhen. Ein solcher Wirkungspfad betrachtet beispielsweise die Emission eines bestimmten Stoffes und verfolgt seinen weiteren Lebensweg über die Ausbreitung durch Luft, Wasser und Boden bis zu seinen Wirkungen an den sogenannten Rezeptoren (Pflanzen, Tiere, Menschen, Material usw.). Neben den ersten offensichtlichen Wirkungen sollen auch Folgewirkungen und Kombinationswirkungen der ursprünglichen und der Abbauprodukte betrachtet werden [Mayerhofer et al., 1992]. Die zentrale Aufgabe besteht in der Ausarbeitung einer Art Prozeßkette, in der sämtliche mögliche Wirkungen aufgeführt werden. Zusätzlich entstehen die eigentlichen Wirkungen innerhalb eines Systems bzw. dieser Wirkungskaskade häufig mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit. Beispielsweise kann die Schwefeldioxidemission innerhalb einer Stadt an einem Regentag direkt innerhalb der Stadtgrenzen ausgewaschen werden und dort Materialschäden an der Bausubstanz verursachen; unter anderen klimatischen Bedingungen

kann dagegen ein weit entferntes Waldgebiet als Senke für das dort ausgewaschene Schwefeldioxid dienen.

Bei der Abschätzung des Gefährdungspotentials dagegen wird gezielt eine bestimmte potentielle Wirkung in einem System betrachtet, beispielsweise das Versauerungspotential und damit die Zunahme der Versauerung von Gewässern und Böden durch Gasfreisetzungen, die durch die Fähigkeit gekennzeichnet sind, Protonen abzuspalten bzw. in der Atmosphäre ggf. nach Oxidation und Reaktion mit Wasser in Säuren überzugehen. Diese Wirkung wird in Beziehung zu den verursachenden Stoffströmen der Sachbilanz gesetzt. Hier werden damit letztlich keine Wirkungen, sondern vielmehr Gefährdungs- oder Wirkungspotentiale betrachtet (z. B. Global Warming Potential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential), da die Schädigung zum Zeitpunkt der Bilanzierung meistens nicht real ist. Folge- und Kombinationswirkungen werden durch diese Art der Bilanzierung gegenwärtig nur sehr rudimentär erfaßt.

2.4 Bewertung

In die bisher vorgestellten Bestandteile einer Bilanz gehen an vielen Stellen durch die grundsätzlich notwendige Setzung von Randbedingungen sogenannte "implizite Bewertungen" ein. Dadurch wird die Durchführung einer ganzheitlichen Bilanz aber überhaupt erst ermöglicht. Im folgenden werden nicht diese unvermeidbaren "impliziten Bewertungen" diskutiert, sondern die explizite Bewertungsphase, die ein zentraler Bestandteil einer ganzheitlichen Bilanzierung ist.

Würde eine der untersuchten Varianten im Hinblick auf alle betrachteten Wirkungskategorien am besten abschneiden, wäre keine zusätzliche Bewertung mehr erforderlich. Sobald jedoch unterschiedliche Varianten verschiedene Vor- und Nachteile haben (und das ist üblicherweise der Fall), entsteht ein Zielkonflikt bei der Bestimmung der optimalen Variante, der durch eine Bewertung gelöst werden muß. Beispielsweise soll bei der Bewertung eines Vergleichs einer Energiebereitstellung aus Bioenergieträgern bzw. aus fossilen Energieträgern eine Aussage gemacht werden, welche der beiden Optionen zu bevorzugen ist, wobei die eine u. a. durch einen geringeren Ressourcenverbrauch, ein kleineres Global Warming Potential, ein höhere Freisetzung von human- und ökotoxischen Stoffen und ein höheres Versauerungs- und Eutrophierungspotential gekennzeichnet sein könnte.

Bei der Bewertung entsteht letztlich durch die Verknüpfung der zugänglichen Informationen eines Sachverhaltes mit einem bestimmten Wertesystem ein Urteil über den entsprechenden Sachverhalt [UBA-Texte, 1995]. Als Ausgangspunkte dienen die Informationen aus der Wirkungsbilanz (die Ergebnisse der Sachbilanz können nicht direkt bewertet werden) und das entsprechende Wertesystem. Ein derartiges Wertesystem ist nicht nur von Individuum zu Individuum oder von Gruppe zu Gruppe verschieden, sondern beispielsweise auch zeit- oder kulturabhängig. Im Zusammenspiel der Informationen aus der Wirkungsbilanz (und damit indirekt auch aus der Sachbilanz) mit einem anerkannten Wertesystem ist das Bewertungsurteil jedoch nicht völlig beliebig, sondern wird in erheblichem Maße von den Sachinformationen beeinflusst.

Nachdem die Bewertung in den vergangenen Jahren aufgrund der damit zusammenhängenden Probleme zugunsten der Sachbilanz vernachlässigt wurde, gelangt sie mit der wachsenden Konsensfähigkeit der übrigen Bilanzierungsmethoden zunehmend in die Diskussion. Aufgrund der methodischen Schwierigkeiten und der geringen Akzeptanz der bisherigen Bewertungsansätze, in denen die Bilanzergebnisse zum Teil in einer einzigen Zahl zusammengefaßt worden sind (z. B. Ökopunktansatz), wird nunmehr ein "verbal-argumentatives" Vorgehen vorgeschlagen (d. h. verbal-argumentative Diskussion der Vor- und Nachteile und entsprechende transparente Begründung der Bewertung), das den mit der Bewertung verbundenen Problemen gerecht werden soll [UBA-Texte, 1995].

3 Geothermische Heizzentrale Riehen

Ende April 1994 wurde in der Schweizer Gemeinde Riehen, Kanton Basel-Stadt, ein kommunaler Nahwärmeverbund für die Beheizung und Brauchwassererwärmung von Gebäuden auf der Basis einer geothermalen Heizzentrale in Betrieb genommen.

Die maximale Heizleistung dieser Anlage beträgt 14 MW. Die Vorlauftemperatur ist gleitend von 65 bis 90 °C geregelt [Bußmann, 1994]. Fast die Hälfte des jährlichen Wärmebedarfes wird über die Nutzung eines hydrothermalen Erdwärmevorkommens abgedeckt. Insgesamt werden 160 Wärmeabnehmer, das heißt etwa 1 000 Wohneinheiten im Ortskern Riehen, versorgt [Bußmann, 1994]. Die Heizzentrale ist mit modernster Technik ausgerüstet und eignet sich daher gut als Basis einer Bilanzierung der Energiebereitstellung aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen.

Abbildung 0-1 verdeutlicht die prinzipielle Funktionsweise der Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen für Heizzwecke.

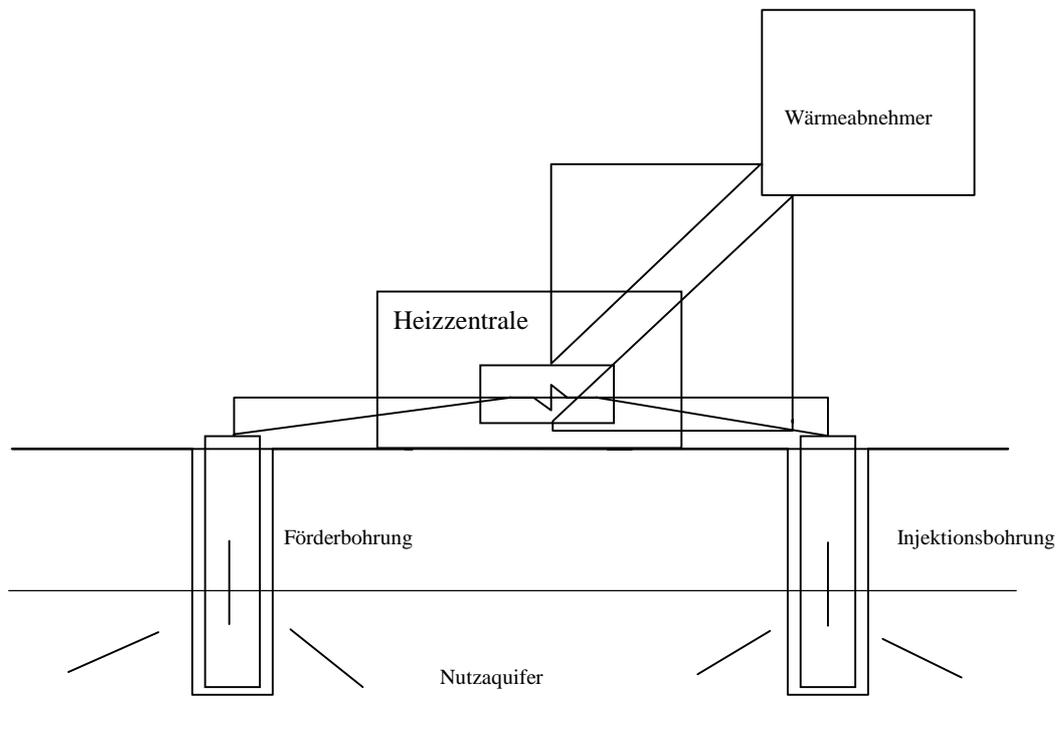


Abbildung 0-1: Prinzipielle Funktionsweise einer geothermischen Heizzentrale

Abbildung 0-2 zeigt eine Prinzipskizze des Wärmeverbundes Riehen. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Bilanzierung bis zur Einspeisung der Wärme in das Fernwärmenetz erfolgen. Die Anlage besteht aus einer Grundlastanlage und einer Spitzenlastanlage. Die Grundlastanlage deckt unter Nutzung des geothermischen Potentials etwa 85 % der geforderten Jahresgesamtwärmemenge ab. Die erdölgefeuerten Spitzenlastanlage deckt saisonale und tägliche Leistungsspitzen ab und hat einen Anteil von etwa 15 % an der gelieferten Jahresgesamtwärmemenge der Heizzentrale Riehen.

3.1 Grundlastanlage

Die Heizzentrale Riehen nutzt die hydrothermale Erdwärme mit Hilfe zweier Bohrungen. Die Bohrung Riehen 1 wird als Förderbohrung, die Bohrung Riehen 2 als Injektionsbohrung genutzt. Über die Bohrung Riehen 1 wird Thermalwasser aus einer Teufe von etwa 1500 m mit einem Volumenstrom von 20 kg/s mit einer in 390 m Teufe eingehängten Tauchkreiselpumpe gefördert. Die Temperatur des Thermalwassers beträgt 62°C am Bohrlochkopf. Dieses Thermalwasser wird der Heizzentrale über Rohrleitungen zugeführt. Dort werden zunächst über Wärmetauscher - abhängig von den Betriebsbedingungen - zwischen 450 und 1 420 kW ohne zusätzliche Aufwendung von Hilfsenergie (siehe Abbildung 0-3) gewonnen [Bußmann, 1994].

Abbildung 0-2: Wärmeverbund Riehen [Informationsblatt Gemeinde Riehen, 1994]

Mit Hilfe zweier Elektrowärmepumpen mit einer Heizleistung von etwa 1 410 kW wird das Geothermiewasser anschließend auf rund 25 C gekühlt und eine verbrauchsseitige Temperatur von 69,5°C bereitgestellt.

Die elektrische Antriebsenergie für diese Aggregate und der Hilfsbetriebe (z. B. Licht, Gebrauchsstrom) wird von zwei erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) mit einer Leistung von je 834 kW_{th}/454 kW_{el} erzeugt. Sie stellen Wärme auf einem Temperaturniveau von 90 °C zur Verfügung [Bußmann, 1994]. Die hier gewonnene Wärmeenergie wird ebenfalls dem Verteilnetz zugeführt.

Eine Strahlungswärmepumpe sorgt für Rückgewinnung von Wärmeverlusten in der Maschinenhalle und kühlt somit den Maschinenraum der Grundlastzentrale. Die thermische Leistung dieser Wärmepumpe liegt zwischen 45 und 370 kW [Informationsblatt Gemeinde Riehen, 1994].

Abbildung 0-3: Prinzipschema der Wärmeerzeugung der Heizzentrale Riehen [Kaltschmitt und Wiese, 1995]

Das hochmineralisierte Thermalwasser wird nach Abgabe der Wärmeenergie über die Geothermiebohrung Riehen 2 in eine Tiefe von rund 1 250 m verpreßt.

Tabelle 3-1 stellt die wesentlichen Anlagenkomponenten und Daten der Grundlastanlage zusammengefaßt dar [Huser, 1994].

Tabelle 0-1: Anlagedaten Grundlastanlage [Huser, 1994]

Geothermische Wärmequelle	Fördermenge mind.:	10 kg/s
	Fördermenge max.:	20 kg/s
	Entnahmetemperatur:	ca. 62 °C
	Verpreßtemperatur mind.:	ca. 25 °C
	Verpreßtemperatur max.:	ca. 32 °C
	Maximale Heizleistung:	3,1 MW
Blockheizkraftwerke	Anzahl:	2
	Wärmeleistung:	je 834 kW
	Elektrische Leistung:	je 454 kW
	Betriebsstoff:	Erdgas
Direktwärmetauscher	Anzahl:	2
	Wärmeleistung max.:	je 710 kW
	Kälteleistung max.:	je 710 kW
Wärmepumpen	Anzahl:	2
	Wärmeleistung max.:	je 1 410 kW
	Kälteleistung max.:	je 1 150 kW
	Betriebsstoff:	Elektrizität
Strahlungswärmepumpen	Anzahl:	2
	Wärmeleistung max.:	je 136 kW
	Kälteleistung max.:	je 100 kW
	Betriebsstoff:	Elektrizität

3.2 Spitzenlastanlage

Die Spitzenlastanlage verfügt über drei ölbefeuerte Kessel mit einer Leistung von je 2 900 kW_{th}. Diese Kesselanlage deckt den Wärmespitzenbedarf und garantiert daneben auch eine angemessene Versorgungssicherheit bei Wartung und Ausfall von einzelnen Wärmeerzeugungseinheiten. Drei Tankanlagen mit je 134 m³ und eine Tankanlage mit 126,6 m³ für die Bevorratung des als Brennstoff eingesetzten leichten Heizöls sind ebenfalls installiert [Huser, 1994]

Die Spitzenlastanlage ist eigenständig und räumlich getrennt. Die Grundlast- und Kesselanlage arbeiten zur Deckung des Wärmeleistungsbedarfs bivalent-parallel miteinander. Es sind Low-NO_x Brenner eingesetzt [Informationsblatt Gemeinde Riehen, 1994].

Tabelle 0-2 stellt die wesentlichen Anlagenkomponenten und Daten der Spitzenlastanlage dar [Huser, 1994].

Tabelle 0-2: Anlagedaten Spitzenlastanlage [Huser, 1994]

Kessel	Wärmeleistung:	je 2 900 kW
	Betriebsstoff:	Heizöl EL
Tankanlage	Tank 1-3:	je 134 m ³
	Tank 4:	126,6 m ³
Temperaturniveau	Vorlauftemperatur mind.:	65 °C
	Vorlauftemperatur max.:	95 °C

4 Bilanzen der geothermischen Heizzentrale

Die Bilanzierung der Heizzentrale Riehen umfaßt Material-, Energie- und Emissionsbilanzen. Diese werden über die gesamte technische Lebensdauer, also jeweils für die Errichtung, den Betrieb und für die Entsorgung der Heizzentrale, erstellt. Dadurch soll eine vergleichende Diskussion der Aufwendungen für die verschiedenen Lebensphasen der Anlage ermöglicht werden. Abbildung 0-1 verdeutlicht diese Vorgehensweise.

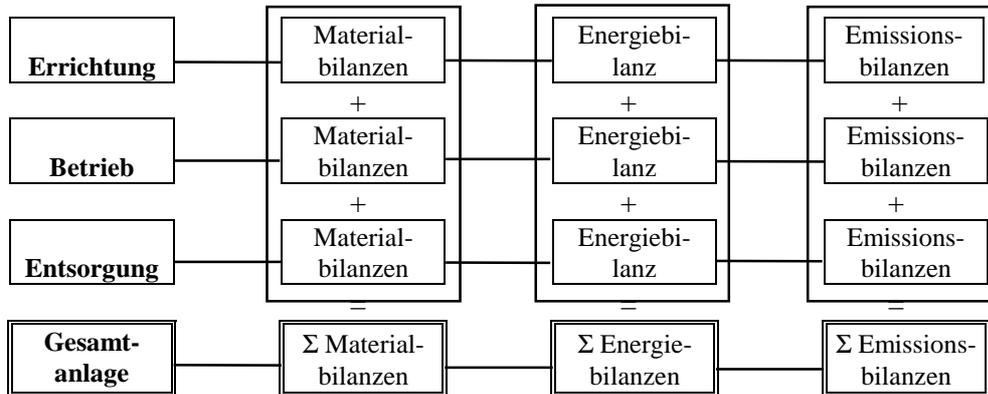


Abbildung 0-1: Vorgehensweise bei der Bilanzierung

Das Wärmeverteilnetz wird hier nicht bilanziert, da es unabhängig von der Technik der Wärmebereitstellungsanlage ist, sich also im Falle einer Wärmebereitstellung aus fossilen Brennstoffen nicht von der geothermischen Anlage unterscheiden würde.

Die jeweiligen Materialbilanzen erfassen die massenmäßig relevanten Materialien. Die Energiebilanz ergibt sich aus den eingesetzten Energieträgern. Im Rahmen der Emissionsbilanzen werden die Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x), Staub, Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH₄), flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan (NMVOC) und Lachgas (N₂O) berücksichtigt.

Die in Kapitel 2 diskutierte Vorgehensweise wird im folgenden auf die Energiebereitstellung aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen und durch erdölgefeuerten Heizzentralen angewendet. Dabei werden die beiden Heizanlagen auf der Basis der Vergleichseinheit "1 TJ bereitgestellte Wärme" miteinander verglichen. Der Untersuchung liegt der derzeitige Stand der Technik zugrunde, d. h. es wird der Geothermieanlage eine erdölgefeuerten Heizzentrale gegenübergestellt, wie sie heute neu gebaut werden würde.

Eine vollständige ganzheitliche Bilanzierung, wie sie in der methodischen Vorgehensweise diskutiert wurde, kann jedoch - u. a. aufgrund mangelnder Daten - hier nicht realisiert werden; dies gilt insbesondere für viele vor- und nachgelagerten Prozesse, die bisher noch nicht bzw. nur sehr rudimentär untersucht wurden. Deshalb erfolgt hier nur eine exemplarische Anwendung anhand ausgewählter Größen. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt dabei auf der Sachbilanz; die Wirkungsbilanz wird nur exemplarisch für das anthropogen verursachte Treibhauspotential durchgeführt. Die Bewertung wird nicht explizit durchgeführt und bleibt weitergehenden Untersuchungen vorbehalten.

Unabhängig davon werden die untersuchten Größen im Sinne einer ganzheitlichen Bilanzierung bereits im Hinblick auf die damit verbundenen Wirkungen ausgewählt. Obwohl im folgenden fast ausschließlich die Ergebnisse der Sachbilanz ausgewiesen und diskutiert werden, könnte ausgehend von diesen Ergebnissen eine ausführlichere Wirkungsbilanz und letztlich auch die

Bewertung durchgeführt werden. Der kumulierte Energieaufwand beispielsweise, unterteilt in die einzelnen Energieträger (u. a. Kohle, Erdöl, Erdgas), kann als Maß für die Inanspruchnahme fossiler Ressourcen und damit des Ressourcenverzehrs herangezogen werden; bei den folgenden Analysen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit jedoch nur der gesamte kumulierte Energieaufwand ausgewiesen. Zusätzlich werden die kumulierten CO₂-Emissionen sowie die CO₂-Äquivalente bestimmt, die als Maß für eine mögliche Klimaveränderung stehen. Stellvertretend für die Belastung der Atmosphäre mit Spurengasen, die eine human- und ökotoxische sowie eine sachschädigende Wirkung haben werden SO₂, NO_x, und CO betrachtet.

4.1 Basisdaten

Die Bilanzen werden für die gesamte Lebensdauer, also die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung der beiden Anlagen erstellt. Dazu werden die Lebenswege der betrachteten Möglichkeiten einer Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen und die aus fossilen Energieträgern in die nachfolgend diskutierten Lebenswegabschnitte unterteilt.

- Bereitstellung der Baumaterialien für die Wärmeerzeugungsanlagen

Die wesentlichen für den Anlagenbau benötigten Materialmengen werden für beide untersuchten Wärmebereitstellungstechniken bilanziert. Mit der Herstellung dieser Materialien sind Energieaufwendungen und Emissionen verbunden, die entsprechend zu berücksichtigen sind. Als Materialien, die den wesentlichen Anteil am gesamten Materialeinsatz für die Kraftwerke ausmachen, werden Stahl und Zement betrachtet.

- Bereitstellung und Nutzung der erforderlichen Brennstoffe für die fossil gefeuerten Anlagen

Die Bereitstellung der zum Betrieb fossil gefeuerter Anlagen benötigten Brennstoffe ist ebenfalls mit Energieaufwendungen und Emissionen verbunden. Die während der Konversion im Kraftwerken anfallenden Emissionen und energetischen Aufwendungen werden ebenfalls untersucht.

- Bereitstellung der Materialien für die Anlagen während des Betriebes

Hierunter sind die Materialmengen zu verstehen, die für die Anlagen während einer technischen Lebensdauer von 25 Jahren aufgrund von Wartung und Instandsetzung erforderlich sind. Mit der Herstellung dieser Materialien sind Energieaufwendungen und Emissionen verbunden, die entsprechend zu berücksichtigen sind.

- Energieaufwendungen für die Entsorgung der Anlagen

Mit Hilfe des Computerprogramms "Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)" ist es möglich, gesamte Prozeßketten für Energieträger und Materialien zu erstellen [Fritsche et al./GEMIS, 1995]. Für die Lebenszyklen von Energiesystemen werden dabei sämtliche Aktivitäten unter Berücksichtigung aller relevanten Transportschritte sowie der Material- und Hilfsproduktherstellung berücksichtigt, die mit der Bereitstellung von Energiedienstleistungen verbunden sind. Die Ermittlung der Emissions- und Energiedaten der vorgelegten Prozeßketten erfolgt im folgenden im wesentlichen mit Hilfe dieses Programmes.

Energie-Prozeßketten. **Abbildung 4-2** zeigt ein Beispiel für die Öl-Prozeßkette in vereinfachter Form. Es wird für die Bereitstellung eines Energieträgers der Weg zurück bis zur Primärenergiegewinnung verfolgt, wobei alle Umwandlungs- und Transportvorgänge mitbetrachtet werden. Auch die Hilfsenergieeinsätze und die Prozesse, durch die sie bereitgestellt wird, werden berücksichtigt. Wenn zum Beispiel ein Tankwagen "1 TJ Dieselöl" frei Verbraucher bereitstellt, sind jeweils verschiedene Prozesse vorgelagert. Dabei können auch

Rückkopplungen, wie zum Beispiel in Abbildung 4.2 Strom für die Raffinerie, zwischen diesen Prozessen bestehen [Fritsche et al./GEMIS, 1995].

Um verschiedene Prozeßketten miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, gleiche Rahmenbedingungen zu betrachten. In GEMIS wurden deshalb für vorgelagerte Prozesse vereinfachend typische Betriebsbedingungen unterstellt. Zu beachten ist, daß die Methodik zur Einbeziehung von Hilfsenergien und Hilfsstoffen davon ausgeht, daß

- die real von Prozessen genutzten Hilfsenergieträger und Produkte verwendet werden; z. B. wird bei Trocknungsprozessen die Wärme über öl- oder gasbefeuerte Kessel bereitgestellt, die Hilfsantriebe dagegen werden nicht aus dem Prozeß selbst, sondern vom Stromnetz beliefert;
- der gesamte Energieaufwand und alle Umweltaspekte für einen Prozeß dem bereitgestellten (Haupt-)Produkt zugerechnet werden, so daß Nebenprodukte ohne Vorbelastungen anfallen und nur bei tatsächlichen Koppelprodukten ein Bonus für das bereitgestellte zweite Produkt angerechnet wird; hierbei erfolgt eine Gutschrift vom Gesamtaufwand auf der Basis von Substitutionsbetrachtungen "am Markt" [Fritsche et al./GEMIS, 1995].

Eine direkte Prozeßintegration dagegen wird berücksichtigt. Gaspipelines zum Beispiel benötigen als Hilfsenergie Kompressionsarbeit. Diese Hilfsenergie wird durch Verdichter (Gasturbinen) bereitgestellt, die ihren Brennstoff direkt aus der Pipeline beziehen. Tabelle 0-1 zeigt die Kenndaten der vorgelagerten Prozesse, die im Rahmen dieser Arbeit in die ganzheitliche Bilanz einbezogen werden.

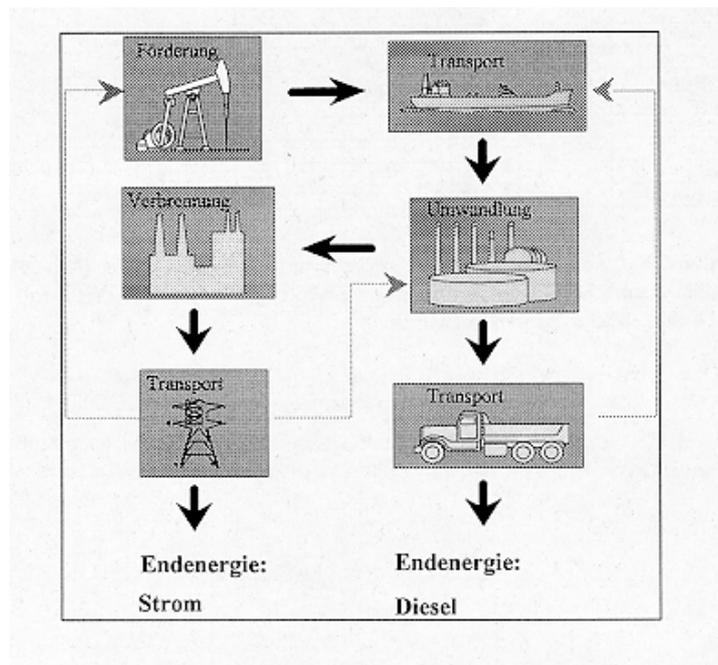


Abbildung 0-2: Öl-Prozesskette ohne Materialvorleistungen und Hilfsmaterialien [Fritsche et al./GEMIS, 1995]

Der betrachtete Strom-Mix bezeichnet die durchschnittliche Strombereitstellung durch die Kraftwerke in Deutschland gefeuert mit Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und Öl sowie durch Kernkraftwerke und Wasserkraftanlagen. Die Übertragung der Daten auf die Anlage in Riehen ist möglich, da aufgrund des grenznahen Standorts und der Anbindung der Schweiz an den europäischen Strom-Netzverbund (UCPTE) die tatsächlichen Gegebenheiten weitgehend realistisch abgebildet werden [Ökoinventare für Energiesysteme, 1995].

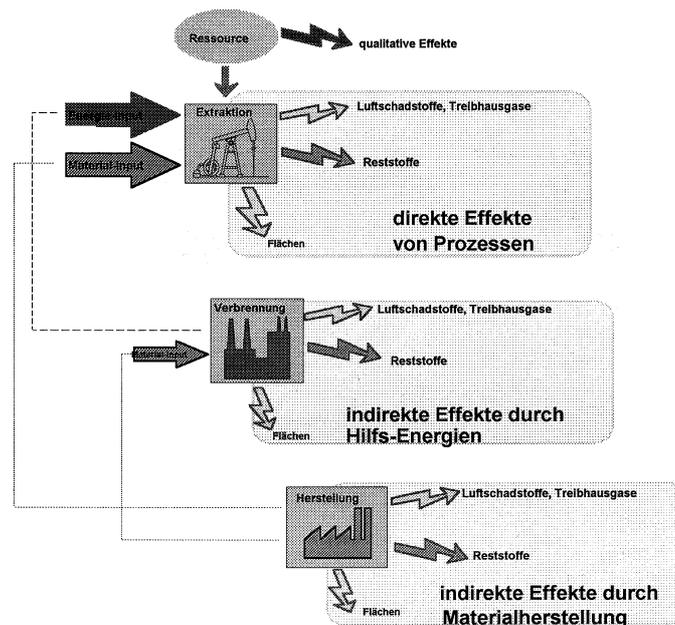
Tabelle 0-1: Kenndaten vorgelagerter Energie-Prozessketten [Fritsche et al./GEMIS, 1995], [Lambrecht und Patyk, 1996]

		Diesel, Heizöl EL	Strom-Mix	Erdgas
Primärenergie	[TJ/TJ _{end}]	1,07	3,22	1,07
SO ₂	[t/TJ _{end}]	0,062	0,141	0,001
NO _x	[t/TJ _{end}]	0,034	0,232	0,011
Staub	[t/TJ _{end}]	0,003	0,022	0,000
CO ₂	[t/TJ _{end}]	7,793	0,197	2,705
CO	[t/TJ _{end}]	0,010	0,160	0,012
CH ₄	[t/TJ _{end}]	0,013	0,488	0,148
NMVOG	[t/TJ _{end}]	0,019	0,022	0,000
N ₂ O	[t/TJ _{end}]	0,000	0,007	0,000

Material-Prozessketten. Eine Material-Prozesskettenanalyse, die die Einzelschritte bei der Materialherstellung explizit beschreibt und dafür formal den Energieketten gleichende Prozessketten definiert, kann mit Hilfe von GEMIS und den ÖKO-INVENTAREN durchgeführt werden [Ökoinventare für Energiesysteme, 1995]. Dazu werden ausgehend von der Förderung von Rohstoffen und deren Transport die Umwandlung der Materialien in Endprodukte verfolgt und der jeweilige Energieverbrauch, Hilfsprodukteinsatz und die entsprechenden Emissionen ermittelt.

Auch bei Materialprozessketten sind Extraktion, Transporte und Umwandlungen mit jeweils spezifischen Umwelteffekten zu beachten. Abbildung 4-3 stellt die Verknüpfung von Energie- und Material-Prozessketten am Beispiel der Prozessstufe "Extraktion" dar.

Abbildung 0-3: Schema der direkten und indirekten Umwelteffekte von Energieprozessen bei Einbeziehung von



Materialvorleistungen [Fritsche et al./GEMIS, 1995]

Tabelle 0-2 zeigt die Kenndaten der vorgelagerten Prozesse für die Energieträger und Materialien, die im Rahmen dieser Arbeit in die ganzheitliche Bilanz einbezogen werden. Der hier betrachtete Stahl-Mix geht von 80 % Oxygen- und 20 % Elektrostahl aus. Da bei der Herstellung von Elektrostahl Stahlschrott verwendet wird, ist die Wiederverwertung von Stahlmaterial berücksichtigt [Fritsche et al./GEMIS, 1995].

Tabelle 0-2: Kenndaten vorgelagerter Material-Prozeßketten [Fritsche et al./GEMIS, 1995, Lambrecht und Patyk, 1996]

		Stahl-Mix	Zement	Aluminium
Primärenergie	[TJ/t _{end}]	0,0202	0,0044	0,2481
SO ₂	[t/TJ _{end}]	0,0034	0,0004	0,0419
NO _x	[t/TJ _{end}]	0,0046	0,0024	0,0340
Staub	[t/TJ _{end}]	0,0006	0,0010	0,0068
CO ₂	[t/TJ _{end}]	1,5580	0,8980	15,730
CO	[t/TJ _{end}]	0,0239	0,0004	0,1600
CH ₄	[t/TJ _{end}]	0,0068	0,0017	0,0172
NMVOG	[t/TJ _{end}]	0,0006	0,0000	0,0017
N ₂ O	[t/TJ _{end}]	0,0000	0,0002	0,0005

4.2 Errichtung

Die Bilanzierung der Errichtung der Heizzentrale Riehen wird entsprechend Abbildung 0-4 untergliedert. Als Grundlage für die Energie- und Emissionsbilanzen werden zunächst die Materialaufwendungen bilanziert. Unter der Heizzentrale wird hier die Grundlast- und die Spitzenlastanlage verstanden. Die Spitzenlastanlage wird mit in die Bilanzierung einbezogen, da diese zum einen etwa 15 % des Jahreswärmebedarfes deckt und zum anderen Versorgungssicherheit auch bei Ausfall des Geothermiekreislaufes garantiert [Huser, 1994]. Die Spitzenlastanlage ist damit ein fester Bestandteil des Wärmeverbundes.

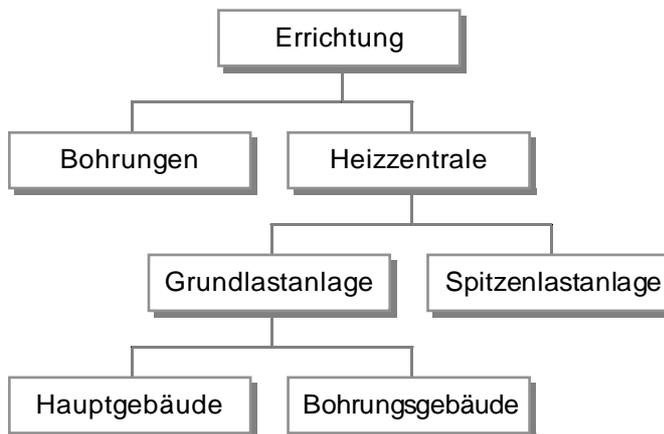


Abbildung 0-4: Errichtung Heizzentrale Riehen

4.2.1 Materialaufwand

Obwohl aufgrund von Datenmangel bezüglich der Energie- und daraus resultierenden Emissionen nur die Materialien Zement, Stahl und Aluminium in die weiteren Betrachtungen eingehen, werden der Vollständigkeit halber und als Grundlage für weitere Untersuchungen weitere wichtige Materialien erfaßt.

Bohrungen. Die Errichtung der Heizzentrale begann mit dem Abteufen der beiden Bohrungen Riehen 1 und Riehen 2 im Jahre 1988. Riehen 1 wird heute als Förderbohrung, Riehen 2 als Injektionsbohrung genutzt. Zwischen 1989 und 1994 wurde dann in einzelnen Bauabschnitten der Wärmeverbund Riehen auf der Basis des in diesen beiden Bohrungen geförderten Thermalwassers installiert [Bußmann, 1994].

Bohrarbeiten werden gewöhnlich in "Bohrtechnischen Aufschluß" (einschließlich Verrohrung) und "Komplettierung" unterteilt. Da bezüglich des Energiebedarfs und der Emissionen des Bohrgerätes die zur Verfügung stehenden Daten nicht unterteilbar sind, werden hier jedoch die Bilanzen für die gesamten Bohrarbeiten erstellt.

Der Energie- und Materialaufwand für die Herstellung des Bohrgerätes inklusive Bohrgestänge sowie die dabei entstehenden Emissionen werden vernachlässigt, da diese Aufwendungen auf alle vom Bohrgerät abgeteufte Bohrungen umgelegt werden müssen. Der den beiden Bohrungen anzurechnende Anteil ist deshalb, bezogen auf die Gesamtmaterialbilanz der Heizzentrale, massenmäßig nicht relevant. Der aus der Abnutzung der eingesetzten Bohrmeißel resultierende Materialverbrauch wird hier vernachlässigt.

Im Falle der Komplettierung der Bohrungen sind die massenmäßig relevanten Materialien Stahl und Zement.

Stahl. Neben der Standrohrtour wurden bei beiden Bohrungen drei Rohrtouren eingebaut. Sämtliche Rohrverbindungen sind verschraubt. Wie aus Tabelle 0-3 hervorgeht, wurden 128,9 t Stahl für die Komplettierung der Bohrung Riehen 1 und 96,02 t für die Komplettierung der Bohrung Riehen 2 eingesetzt.

Zement. Der zweite materialintensive Arbeitsschritt ist die Bohrlochzementation. Tabelle 0-4 zeigt, daß für die Zementation des Standrohres Portland-Zement und für die weiteren Rohrtouren sulfatbeständiger Sulfacem-Zement verwendet wurde [Geothermische Tiefbohrungen Riehen 1 und 2, 1989]. Die Zementschlämme bestehen aus einem Zement-Wasser-Gemisch ohne Sandzusätze mit einem spezifischen Gewicht von 1,83 bis 1,87 t/m³. Es wurde das tatsächlich vor Ort verpreßte Zementvolumen erhoben. Darin sind die nach dem Aufspülen zutage gelangten Zementschlämme ebenfalls berücksichtigt. Der Zementschlamm wurde mit zwei speziellen Pumpaggregaten der Firma DOWELL eingepreßt [Geothermische Tiefbohrungen Riehen 1 und 2, 1989].

Insgesamt wurden 154,8 t Zement in die Bohrung Riehen 1 und 133,9 t in die Bohrung Riehen 2 verpreßt. Die Zementsorten Portland und Sulfacem werden dabei - da derzeit nur für einen durchschnittlichen Zement entsprechende Energie- und Emissionsdaten vorliegen - für die nachfolgende Bilanzierung zusammengefaßt.

Heizzentrale. Der Materialaufwand für den Bau der Heizzentrale wurde aus Bauplänen der Anlage und aus Angaben der Firma GRUNeko ermittelt. Die Grundlastanlage wurde unterirdisch, untergliedert in zwei Untergeschosse, installiert. Außerdem wurden Gebäude über den beiden Bohrungen errichtet. Die Spitzenlastanlage ist eine eigenständige und räumlich getrennte Anlagenkomponente. Die drei Kesseleinheiten mit einer Nennlast von je 2 900 kW wurden in einem bereits bestehenden Gebäude einer ehemaligen Heizzentrale - 70 m von der Grundlastanlage entfernt - installiert. Die Spitzenlastanlage nimmt in diesem mehrstöckigen

Gebäude nur ein Stockwerk ein. Es wird hier deshalb der Materialaufwand für die Errichtung eines einstöckigen Gebäudes betrachtet. Die notwendigen Baustoffmengen wurden mit Hilfe eines Architekturbüros ermittelt.

Die massenmäßig relevanten Baustoffe sind Beton, Kalksandstein, Zementestrich, Mineralwolle und Glasfaserkunststoff. Die Baustoffaufwendungen wurden aus den in den Bauplänen angegebenen Volumina rückgerechnet. Die Gebäude wurden aus Stahlbeton, unbewehrtem Beton und Kalksandstein errichtet. Hinzu kommen Estrich und Dämmmaterial.

Tabelle 0-3: Technische Daten der Bohrungsverrohrungen [Geothermische Tiefbohrungen Riehen 1 und 2, 1989]

	Einheit	Riehen 1	Riehen 2
Standrohr			
Bohrlochdurchmesser	["]	24	24
Rohrdurchmesser außen	["]	18 5/8	18 5/8
Wandstärke	[mm]	11,05	11,05
Verbindung		API STC	API STC
Qualität		H 40	H 40
Gewicht	[kg/m]	125,88	125,88
Absetzteufe	[m]	24,05	27,45
Gesamtmasse	[kg]	3 027,4	3 455,4
13 3/8" Rohrtour			
Bohrlochdurchmesser	["]	17 1/2	17 1/2
Rohrdurchmesser außen	["]	13 3/8	13 3/8
Wandstärke	[mm]	10,92	10,92
Verbindung		API STC	API STC
Qualität		J 55, nahtlos	J 55, nahtlos
Gewicht	[kg/m]	88,55	88,55
Absetzteufe	[m]	599,1	418,7
Gesamtmasse	[kg]	53 050,3	37 075,8
9 5/8" Rohrtour			
Bohrlochdurchmesser	["]	12 1/4	12 1/4
Rohrdurchmesser außen	["]	9, 5/8	9 5/8
Wandstärke	[mm]	8,94	8,94
Verbindung		API LTC	API LTC
Qualität		J 55, nahtlos	J 55, nahtlos
Gewicht	[kg/m]	51,92	51,92
Absetzteufe	[m]	1204,4	890,2
Gesamtmasse	[kg]	62 532,4	46 219,2
7" Rohrtour			
Bohrlochdurchmesser	["]	8 1/2	8 1/2
Rohrdurchmesser außen	["]	7	7
Wandstärke	[mm]	8,05	8,05
Verbindung		API LTC	API LTC
Qualität		J 55, nahtlos	J 55, nahtlos
Gewicht	[kg/m]	33,68	33,68
Eingebaute Verrohrung	[m]	305	275,5
Gesamtmasse	[kg]	10 272,4	9 278,8

Tabelle 0-4: Zementmengen Riehen 1 und Riehen 2 [Geothermische Tiefbohrungen Riehen 1 und 2, 1989]

Rohrdurchmesser ["]	Zement	Riehen 1 Verpreßt [m ³]	Riehen 1 Masse [t]	Riehen 2 Verpreßt [m ³]	Riehen 2 Masse [t]
18 5/8	Portland	2,80	5,18	3,20	5,92
13 3/8	Sulfacem	45,17	83,56	36,60	67,71
9 5/8	Sulfacem	29,00	53,65	28,00	51,80
7	Sulfacem	6,70	12,40	4,60	8,51

Baumaterialien. Für die Errichtung der Gebäude wurden 1 828 m³ Stahlbeton verbaut [Baupläne, 1992-93].

Ein Kubikmeter des aufgewendeten Stahlbetons hat ein Gewicht von etwa 2,5 t und enthält durchschnittlich 160 kg Stahl [Gehring, 1995]. Insgesamt wurden die in Tabelle 0-5 darge-

stellten Baustoffmassen für die Errichtung der Heizzentrale Riehen eingesetzt. Weiterhin wurden 10 t Mineralwolle und 12 t Glasfaserkunststoff eingesetzt.

Stahl. Für die Ermittlung der benötigten Stahlmengen werden die Anlagenkomponenten, der Stahlanteil im Stahlbeton sowie die Leitungsrohre bilanziert.

Der Stahlanteil im Stahlbeton beträgt für das Hauptgebäude etwa 221 t, für das Bohrungsgebäude Riehen 1 etwa 23 t, für das Bohrungsgebäude Riehen 2 etwa 5 t und für die Spitzenlastanlage etwa 43 t. Für die Lüftungsanlage der Grundlastzentrale errechnet sich aus den Bauplänen der Anlage ein Stahlaufwand von 0,7 t. Zwei Abgasrohre für die Blockheizkraftwerke sind nicht direkt in der Grundlastanlage, sondern aus bautechnischen Gründen in der Spitzenlastanlage installiert. Es handelt sich um doppelrohrige, aus Stahl hergestellte Schornsteine mit einer Stahlgesamtmasse etwa 2 t Stahl [Baupläne 1992-93].

Der zusätzliche Stahlbedarf für Armaturen wird durch einen 10 %igen Zuschlag auf die Gesamtmasse berücksichtigt.

Tabelle 0-5: **Baustoffaufwand Heizzentrale** [Baupläne, 1992-93].

	Volumen [m ³]	Masse [t]
Beton (Stahlbeton)	1828	4202
Kalksandstein	53	95
Zementestrich	20	60
Hartbetonestrich	40	112
Beton (unbewehrt)	9	18

In Tabelle 0-6 sind die Stahlaufwendungen für den Bau der Heizzentrale zusammengefaßt dargestellt. Unter dem Punkt Stahlbeton ist der Stahlinhalt des Stahlbetons zu verstehen. Die Massen und Materialien der Anlagenkomponenten stammen aus Angaben der Firma GRUNeko. Es wurden demnach insgesamt 537 t Stahl für den Bau der Heizzentrale Riehen eingesetzt.

Aluminium. Aufgrund der Wärmedämmung sind einige Rohrleitungen sowie die Wärmespeicher mit Aluminium ummantelt. Die Verbindungsleitungen zwischen Grundlast- und Spitzenlastanlage sind ebenfalls wärme gedämmt verlegt. Es wurden zum Fixieren der Mineralwolle etwa 1,146 t Aluminium benötigt. Pro Wärmespeicher wurden zusätzlich 0,47 t Aluminium verbaut [Huser, 1995]. Insgesamt wurden demnach 2,55 t Aluminium eingesetzt.

4.2.2 Energieaufwand

Bohrungen. Die Betrachtung des Energieaufwandes während der Bohrphase beschränkt sich auf den benötigten Dieseldieselkraftstoff sowie den Strombedarf der Bohranlage. Diesel wird für den An- und Abtransport des Bohrgerätes und des zugehörigen Materials, für den Betrieb des Bohrgerätes während der Bohrung sowie für den Betrieb der Pumpaggregate benötigt. Dabei werden nur die für das Bohrgerät notwendigen Transporte bilanziert. Die Transportaufwendungen für die Materialanlieferung sind in den vorgelagerten Prozeßketten bereits enthalten.

Die genauen An- und Abtransportentfernungen konnten nicht ermittelt werden. Deshalb wird davon ausgegangen, daß die Bohranlage von einem Bohrplatz (unbekannt) nach Riehen 1 und von dort nach Riehen 2 transportiert wurde. Der Abtransport wird nicht bilanziert, da dieser der nachfolgenden Bohrung des Bohrgerätes angelastet wird. Es wird eine Transportentfernung zu den unbekanntem Bohrlokationen von 50 km angesetzt. Die Entfernung von Riehen 1 nach Riehen 2 beträgt 1,5 km.

Dabei wird von 30 Transporten mit Lastkraftwagen (LKW) mit einem Ladevermögen von 20 t für die Einrichtung eines Bohrplatzes ausgegangen [Polte, 1995]. Es ergibt sich demnach eine Gesamtstrecke für 30 LKW's für beide Bohrungen inklusive Umzug von 3 090 km.

Der Dieseltreibstoffbedarf für LKW's mit einer maximalen Zuladung von 20 t beträgt 3,6 MJ/tkm [Fritsche et al./GEMIS, 1995]. Es wird darin ein Mix von je 50 % Innerorts- und Außerortsverkehr sowie eine Auslastung der LKW's von 50 % zugrundegelegt. Diese Auslastung beinhaltet u. a auch die Leerfahrten der Transportfahrzeuge. Für die insgesamt zurückzulegende Transportentfernung von 3 090 km ergibt sich demnach ein Kraftstoffverbrauch von 0,22 TJ.

Aufgrund der räumlichen Nähe der Bohrungen zueinander werden den beiden Bohrungen jeweils 50 % des Energiebedarfes der Transportarbeiten angelastet.

Tabelle 0-6: Stahlaufwendungen Errichtung Heizzentrale

Anlagenteil	Anzahl	Leistung	Material	Masse	Masse
	Länge			[t/Stk.]	[t]
Hauptgebäude					
Plattenwärmetauscher GTK/ZK	3	max. 1 900 kW	Titan Stahl	3,06	9,18
Plattenwärmetauscher ZK/FW	2	max. 710 kW	Stahl	0,56	1,12
BHKW-Motorblock	2	834 kWth	div. Metalle	6,00	12,00
BHKW Wämetauscher	2	834 kWth	div. Metalle	5,00	10,00
WP Verdichterblock	2	1 410 kWth	div. Metalle	3,50	7,00
WP Wärmetauscherblock	2	1 410 kWth	div. Metalle	5,90	11,80
Strahlungs-Wärmepumpe	1	300 kWth	div. Metalle	4,50	4,50
Leitungen			Stahl		15,54
Wärmespeicher	3		Stahl	12,60	37,80
Lüftungsanlage	1		Stahl		0,69
Abgasanlage	1		Stahl		2,22
Stahlbeton			Stahl		221,42
Riehen 1					
Entnahmepumpe	1	20 kg/s	Stahl	1,01	1,01
Pumpendruckleitung	380 m		Stahl	0,01 t/m	3,91
Leitungen			Stahl		0,55
Stahlbeton			Stahl		23,10
Riehen 2					
Verpreßpumpe	2	20 kg/s	Stahl	0,80	1,60
Leitungen			Stahl		0,17
Stahlbeton			Stahl		4,8
Spitzenlastanlage					
Kessel	3	max. 2900 kW	Stahl	10,90	32,70
Brenner	3		Stahl	1,00	3,00
Tank	3	134 000 l	Stahl	18,00	54,00
Tank	1	126 600 l	Stahl	15,00	15,00
Abgasanlage	1		Stahl	5,90	5,90
Leitungen	661,3 m		Stahl		14,98
Stahlbeton			Stahl		43,44

GTK = Geothermie-Kreislauf; ZK = Kreislauf Heizzentrale; FW = Fernwärmenetz; WP = Wärmepumpe

Da keine Angaben zum Diesel- und Stromverbrauch der Bohrungen Riehen 1 und Riehen 2 existieren, müssen diese aus einer gleichartigen Bohrung abgeleitet werden. Als Vergleichsbohrung dient eine Bohrung der Firma BOHR-KNECHT, die in Binz auf Rügen auf eine Endteufe von 1 175 m abgeteuft wurde. Bei den Bohrungen in Binz und Riehen wurden jeweils ähnliche Formationen durchteuft [Bußmann, 1994; Polte, 1995]. Einschließlich der Ausbaurbeiten betrug der Energieaufwand für die Bohrung Binz 150 MWh an elektrischer Energie und 94 981 l an Dieseltreibstoff. Das Bohrgerät benötigte dabei nur etwa 20 % des verbrauchten Dieseltreibstoffes. Den Hauptteil von etwa 80 % benötigten die beiden Pumpaggregate mit einer Leistung von je 500 kW. 97 % des von den Pumpaggregaten verbrauchten

Kraftstoffes wurde für die Zirkulation der Spülung und etwa 3 % für die Zementation des Bohrloches eingesetzt [Polte, 1995].

Eine direkte Übertragbarkeit der Angaben auf die Bohrung Riehen ist nicht möglich. Da die Einsatzdauer des Bohrgeräts nicht bekannt ist, kann der Verbrauch nicht zeitbezogen berechnet werden. Dies wäre deshalb sinnvoll, da der Energieverbrauch infolge der unterschiedlichen geologischen Bedingungen in erster Linie von der Einsatzzeit des Bohrgeräts abhängig ist. Deshalb muß hier - grob vereinfachend - eine Umrechnung über die abgeteuften Meter durchgeführt werden. Demnach wurden etwa 8,1 TJ in Form von Diesel und 1,3 TJ in Form von Strom für die gesamten Bohrarbeiten eingesetzt.

Heizzentrale. Der Energieaufwand für die Errichtung der Anlage ist nur ansatzweise zu ermitteln. Es wird deshalb als energiebestimmende Größe der Kraftstoffverbrauch der eingesetzten Baumaschinen ermittelt. Alle weiteren Energieaufwendungen sind kaum abschätzbar und werden daher vernachlässigt.

Die Baumaschinen wurden eingesetzt für den Aushub der Baugruben, für das Erstellen des Grabens für die Verbindungsleitungen jeweils zwischen den Bohrungen und der Grundlastanlage sowie für 10stündige Planierarbeiten für die Spitzenlastanlage. Die Verbindungsleitungen zwischen Spitzen- und Grundlastzentrale wurden oberirdisch verlegt, demnach war hier kein Erdaushub notwendig.

Die Verbindungsleitung zwischen der Bohrung Riehen 1 und der Grundlastanlage hat eine Länge von 700 m, die Verbindungsleitung Grundlastanlage-Bohrung Riehen 2 eine Länge von 500 m. Die Rohrleitungen wurden in 1,1 m Tiefe verlegt. Die Breite des Grabens betrug 0,5 m [Huser, 1995]. Als daraus resultierende, insgesamt bewegte Erdmasse ergeben sich 660 m^3 .

Die benötigten Erdmassen, die aufgrund der Errichtung der Gebäude bewegt werden mußten, ergeben sich aus den Bauplänen. Für das Hauptgebäude sind dies etwa $5 \cdot 100 \text{ m}^3$, für das Bohrungsgebäude Riehen 1 etwa 500 m^3 , für das etwas kleinere Bohrungsgebäude Riehen 2 etwa 50 m^3 . Es wurden demnach insgesamt, einschließlich Graben, $6 \cdot 310 \text{ m}^3$ Erdmassen bewegt.

Für die Erdbewegungen wird der Einsatz eines für Arbeiten dieser Art typischen Hydraulikbaggers angenommen. Der Dieselverbrauch eines derartigen Baggers mit der oben genannten Leistung beträgt 117,5 g pro Kubikmeter bewegte Erde [Ökoinventare für Energiesysteme, 1995].

Hinzu kommt der etwa zehnstündige Einsatz einer Planierraupe. Es wird von einem durchschnittlichen Baumaschinen-Dieselmotor mit einem Verbrauch von 19 kg Diesel pro Stunde ausgegangen [Ökoinventare für Energiesysteme, 1995].

Für die Errichtung des Hauptgebäudes waren 790 kg Dieseldieselkraftstoff notwendig. Dies entspricht einem Energieaufwand von 0,0338 TJ. Für die Errichtung des Bohrungsgebäudes Riehen 1 wurden etwa 60 kg Dieseldieselkraftstoff eingesetzt, dies entspricht 0,0026 TJ. Für das Gebäude der Bohrung Riehen 2 ergibt sich ein Energiebedarf von 0,0002 TJ bei etwa 5 kg eingesetztem Dieseldieselkraftstoff. Für die Planierarbeiten für die Spitzenlastanlage wurden zusätzlich 190 kg Diesel eingesetzt. Dies entspricht 0,0081 TJ.

4.2.3 Emissionen

Die in Tabelle 0-7 dargestellten direkt entstandenen Emissionen aufgrund der Bohrungen ergeben sich aus den eingesetzten Energieträgern für die notwendigen Transporte und die Bohrarbeiten. Die Transportfahrten werden den Bohrungen zu gleichen Teilen angelastet. Die aufgrund der Errichtung der Heizzentrale direkt entstandenen Emissionen ergeben sich aus dem eingesetzten Dieseldieselkraftstoff für den Erdaushub und die Planierarbeiten. Es wird von einem

Hydraulikbagger und einer Planierraupe mit handelsüblichem Dieselantrieb ausgegangen. Tabelle 0-7 zeigt die entstandenen Emissionen.

Tabelle 0-7: Emissionen aufgrund der Errichtung [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

Emission	Transportfahrten Bohrungen [kg]	Bohrarbeiten [kg]	Baumaschinen Heizzentrale [kg]
SO ₂	0,74	495,31	2,43
NO _x	92,70	11 773,79	57,87
Staub	6,18	227,36	1,12
CO ₂	6 736,20	588 121,17	2 890,68
CO	30,90	3 605,22	17,72
CH ₄	2,47	38,16	0,19
NMVOG	24,72	2 614,59	12,85
N ₂ O	0,01	15,43	0,08

4.2.4 Gesamtbilanz

Unter der Gesamtbilanz wird hier die Verknüpfung der Bilanzdaten für die Errichtung der Heizzentrale Riehen mit den vorgelagerten Material- und Energie-Prozessketten verstanden (vgl. Kapitel 4.1); die entsprechenden Untersuchungen der vorgelagerten Prozessketten setzen die Bilanzgrenze frei Verbraucher. Hier werden als ergebnisbestimmende Materialien Stahl und Zement sowie die verschiedenen fossilen Energieträger ganzheitlich bilanziert. Beton hat zwar nur einen Zementanteil von 14,4 Gew.%, jedoch ist Zement der einzige herstellungsin- intensive Grundstoff im Beton [Fritsche et al./GEMIS, 1995]. Die übrigen 85,6 Gew.% entfallen auf Wasser und Sand bzw. Kies. Reduziert auf Zement und Stahl ergeben sich als Mate- rialanteile für die Bohrungen 289 t Zement und 225 t Stahl sowie für die Heizzentrale 711 t Zement und 537 t Stahl.

Tabelle 4-8, 4-9 und 4-10 stellen die für die Errichtung der Anlage notwendigen Primärener- gieaufwendungen und die insgesamt, vor Ort und aufgrund der vorgelagerten Prozessketten entstandenen Emissionen dar.

Tabelle 0-8: Gesamtbilanz Bohrungen [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Stahl	Zement	Diesel Transporte	Diesel Bohr- arbeiten	Strom Bohrgerät	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	4,54	1,27	0,24	8,69	4,13	5,81	8,93	14,74
SO ₂ [t]	0,76	0,12	0,01	1,00	0,18	0,88	1,02	1,90
NO _x [t]	1,03	0,69	0,10	12,05	0,30	1,73	12,15	13,88
Staub [t]	0,13	0,29	0,01	0,26	0,03	0,42	0,27	0,69
CO ₂ [t]	350,40	259,28	8,47	651,40	0,25	609,68	659,87	1.269,55
CO [t]	5,38	0,12	0,03	3,69	0,21	5,49	3,72	9,22
CH ₄ [t]	1,53	0,49	0,01	0,15	0,63	2,02	0,16	2,18
NMVOG [t]	0,13	0,00	0,03	2,77	0,03	0,13	2,80	2,94
N ₂ O [t]	0,00	0,06	0,00	0,02	0,01	0,06	0,02	0,07

Tabelle 0-9: Gesamtbilanz Errichtung Grundlastanlage [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gru- neko AG, 1994]

	Stahl	Zement	Aluminium	Diesel Baugeräte	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	7,44	2,64	0,49	0,04	10,58	0,04	10,62
SO ₂ [t]	1,25	0,24	0,08	0,00	1,58	0,00	1,58
NO _x [t]	1,69	1,44	0,07	0,06	3,20	0,06	3,26
Staub [t]	0,22	0,60	0,01	0,00	0,84	0,00	0,84
CO ₂ [t]	573,84	539,58	31,20	3,20	1.144,62	3,20	1.147,82
CO [t]	8,80	0,24	0,32	0,02	9,36	0,02	9,38
CH ₄ [t]	2,50	1,02	0,03	0,00	3,56	0,00	3,56
NMVOG [t]	0,22	0,00	0,00	0,01	0,22	0,01	0,24
N ₂ O [t]	0,00	0,12	0,00	0,00	0,12	0,00	0,12

Tabelle 0-10: Gesamtbilanz Errichtung Spitzenlastanlage [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Stahl	Zement	Aluminium	Diesel Baugeräte	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	3,41	0,49	0,14	0,01	4,04	0,01	4,05
SO ₂ [t]	0,57	0,04	0,02	0,00	0,64	0,00	0,64
NO _x [t]	0,78	0,27	0,02	0,01	1,06	0,01	1,08
Staub [t]	0,10	0,11	0,00	0,00	0,22	0,00	0,22
CO ₂ [t]	263,17	100,33	8,89	0,65	372,39	0,65	373,04
CO [t]	4,04	0,04	0,09	0,00	4,17	0,00	4,18
CH ₄ [t]	1,15	0,19	0,01	0,00	1,35	0,00	1,35
NMVOG [t]	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,11
N ₂ O [t]	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02

Abbildung 0-5 macht deutlich, daß der Einsatz der Materialien einen größeren Anteil an den Primärenergieaufwendungen hat als der Einsatz der Energieträger. Es zeigt sich außerdem, daß von den Materialien Stahl die größten Primärenergieaufwendungen verursacht. Obwohl Aluminium massenmäßig mit nur 2,54 t nahezu unbedeutend ist, hat es aufgrund der energieintensiven Herstellung einen Anteil von etwa 3 %.

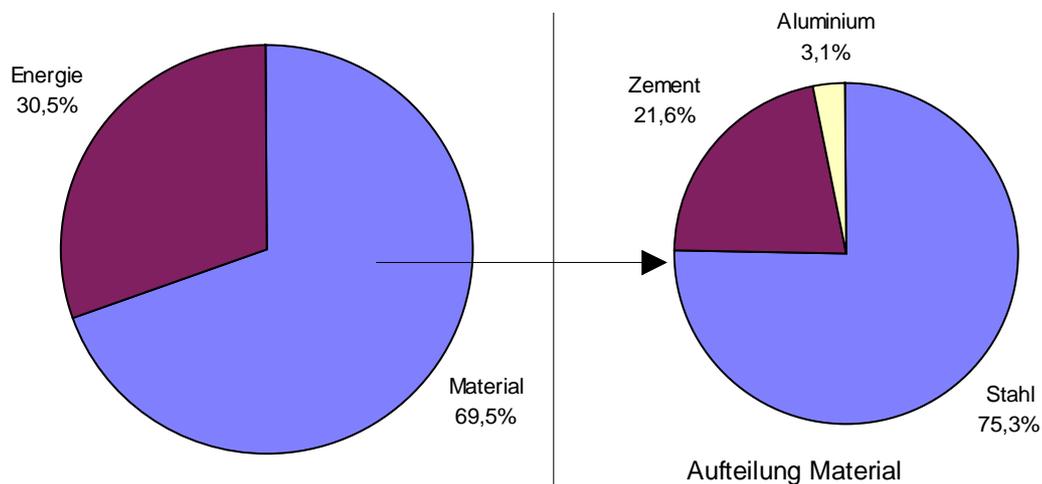


Abbildung 0-5: Primärenergieaufwendungen

4.3 Betrieb

4.3.1 Materialaufwand

Materialaufwendungen fallen während des Betriebes der Heizzentrale mit Ausnahme eines Inhibitors zur Verhinderung der Ausfällungen von Mineralien kaum an. Dieser Inhibitor wird nicht berücksichtigt, da zum einen der Hersteller keinerlei Angaben bezüglich der Zusammensetzung des Zusatzes macht und zum anderen jährlich nur etwa 3 m³ zugesetzt werden [Baupläne, 1992-93].

Materialaufwendungen fallen aber bei der Wartung und Instandsetzung der Anlage an. Da auch diese zukünftigen Aufwendungen derzeit noch nicht bekannt sind, wird VDI-Richtlinie 2067 zugrunde gelegt. Diese bestimmt die Lebensdauer wesentlicher Anlagenkomponenten. Tabelle 0-11 zeigt die danach festgelegte durchschnittliche Lebensdauer einzelner, in Wärmezentralen eingesetzter Bauteile. Demnach müssen im Laufe von 25 Jahren, abgesehen von den Rohrleitungen und Gebäuden, alle Bauteile mindestens einmal ausgetauscht werden.

Tabelle 0-11: Lebensdauer von Anlagenbauteilen nach VDI-2067 [VDI 2067]

	Lebensdauer [a]
Gebäude (inkl. Schornstein)	50
Einbaupumpe	10
Wärmetauscher	20
Rohrleitungen	40
BHKW-Block mit Zubehör	15
Wärmepumpe	18
Tank	20
Kessel (Öl oder Gas)	20
Brenner (Öl oder Gas)	12

Auch im Falle der Förderpumpe und der Brenner wird davon ausgegangen, daß nur ein Austausch während der Lebenszeit der Anlage notwendig ist. Entscheidend hierbei ist, daß die angegebenen Lebensdauern nur als Richtwert verstanden werden können. So würden die Wärmetauscher bei einer Lebenserwartung der Heizzentrale von 25 Jahren sicherlich nicht nach 20 Jahren ausgewechselt werden. Trotzdem muß von einem einmaligen Austausch der Wärmetauscher, bei jedoch unbestimmtem Zeitpunkt während der Lebensdauer der Anlage, ausgegangen werden.

Tabelle 4-12 gibt die Anlagenkomponenten der Grundlastanlage und Spitzenlastanlage an, die aufgrund von Wartung und Instandsetzung über einen Zeitraum von 25 Jahren ersetzt werden müssen.

Tabelle 0-12: Materialaustausch innerhalb von 25 Jahren; Grundlastzentrale [DIN-Norm 2448; VDI 2067]

	Anzahl; Länge	Masse [t/Stk.]	Masse [t]
Grundlastanlage			
Plattenwärmetauscher GTK/ZK	3	3,060	9,2
Plattenwärmetauscher ZK/FW	2	0,557	1,1
Entnahmepumpe	1	1,008	1,0
Pumpendruckleitung	380 m	10,3 kg/m	3,9
Verpreßpumpe	2	0,800	1,6
BHKW Motorblock	2	6,000	12,0
BHKW Wärmetauscher	2	5,000	10,0
Wärmepumpe Verdichterblock	2	3,500	7,0
Wärmepumpe Wärmetauscherblock	2	5,900	11,8
Strahlungs-Wärmepumpe	1	4,500	4,5
Spitzenlastanlage			
Kessel	3	10,9	32,7
Brenner	3	1,0	3,0
Tank	3	18,0	54,0
Tank	1	15,0	15,0

Im Falle der Grundlastanlage müssen während des Betriebes etwa 52 % und im Falle der Spitzenlastanlage etwa 84 % der ursprünglich für die Errichtung der Anlagen notwendigen Stahlmengen, abzüglich des im Stahlbeton enthaltenen Stahls, ausgetauscht werden.

4.3.2 Energieaufwand und Emissionen

Energieaufwendungen während des Betriebes entstehen durch den Einsatz der Energieträger Erdgas, Erdöl und Strom. Die Heizzentrale Riehn stellt jährlich etwa 114 TJ thermische Energie zur Verfügung. Die in Abbildung 0-6 dargestellte geordnete Jahresdauerlinie macht den Einsatzbereich der Grundlastanlage unter Nutzung der hydrothermalen Energie deutlich. Der Transport für die Entsorgung der ausgetauschten Materialien wird in Kapitel 4.4 behandelt.

Abbildung 0-6: Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs und Abdeckung mit Grundlast- und Spitzenlastanlage [Huser, 1994]

Abbildung 0-7 gibt die Anteile der verschiedenen Energieträger an der Energiebereitstellung an [Kampel, 1995]. Es handelt sich hierbei um projektierte Werte, da die Anlage zum jetzigen Zeitpunkt erst einen Ausbaustand von 85 % erreicht hat [Huser, 1995].

Die Erdgas- und Heizölmengen aus Abbildung 0-7 beziehen sich auf den Eingang der Heizzentrale und werden benötigt, um die abgeforderte Energiemenge zu gewährleisten. Das in

Abbildung 0-8 dargestellte Energieflußdiagramm macht diese Zusammenhänge deutlich und gibt die zu erwartenden Verluste an.

Strom wird ausschließlich der Grundlastanlage angelastet [Gehring, 1995]. Der jährliche Energieaufwand aufgrund des Einsatzes von Energieträgern beträgt für die Grundlastanlage 49,49 TJ/a in Form von Erdgas und 1,68 TJ/a als Strom. Die Spitzenlastanlage benötigt 20,42 TJ/a in Form von leichtem Heizöl.

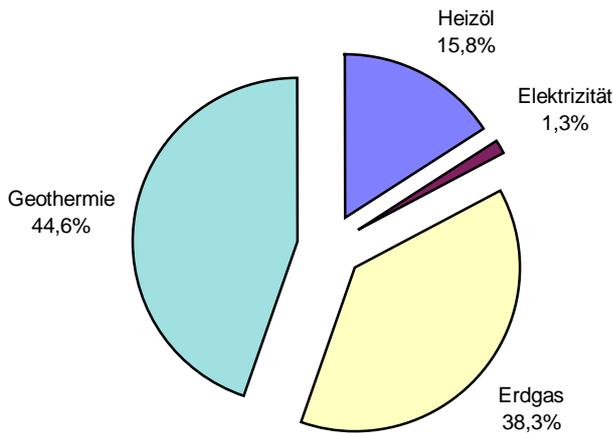


Abbildung 0-7: Energieträgeranteile (Input=100%) Wärmeverbund Riehen (Basis: 129,21 TJ/a) [Huser, 1994]

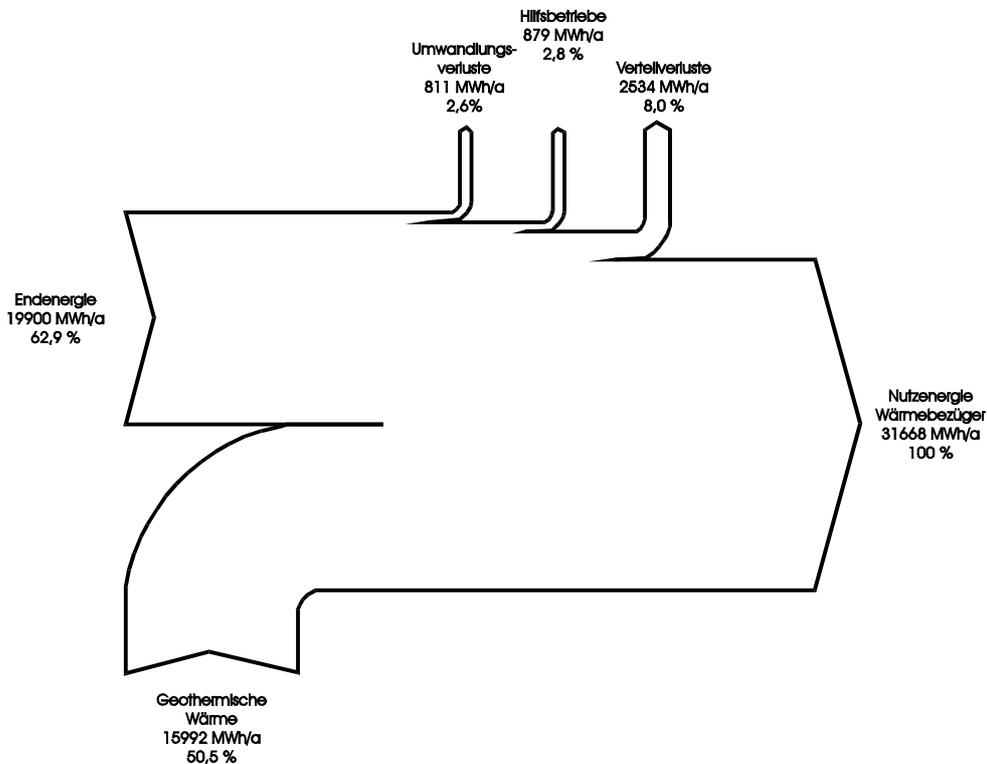


Abbildung 0-8: Energieflußdiagramm Wärmeverbund (Vollausbau, Output=100%) [Huser, 1994]

Emissionen. Direkte Emissionen während des Betriebes entstehen aufgrund der Verbrennung von leichtem Heizöl und Erdgas. Die spezifischen Emissionsfaktoren der Blockheizkraftwerke und der Kessel wurden von der Firma GRUNEKO angegeben. Die Daten wurden um die Werte für CH₄, NMVOC und N₂O erweitert [Fritsche et al./GEMIS, 1995]. Für die Berechnung der Emissionen werden die oben ermittelten eingesetzten Energieträgermengen zugrundegelegt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 0-13 dargestellten Emissionen.

Tabelle 0-13: Betriebsemissionen [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Grundlastanlage Basis: 49,5 TJ/a [t/a]	Spitzenlastanlage Basis: 20,4 TJ/a [t/a]
SO ₂	0,02	1,92
NO _x	1,21	0,69
Staub	0,00	0,06
CO ₂	2 721,95	1 504,95
CO	3,56	0,31
CH ₄	0,23	0,10
NMVOC	0,39	0,16
N ₂ O	0,08	0,03

4.3.3 Gesamtbilanz

Für die ganzheitliche Bilanzierung der Heizzentrale wird entsprechend Kapitel 4.2 eine Lebensdauer von 25 Jahren unterstellt. Mögliche Veränderungen, wie beispielsweise die der Emissionsfaktoren, die im Verlauf dieses Zeitraumes zu erwarten sind, werden aber aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten nicht berücksichtigt.

Der Materialaufwand während des Betriebs der Anlage beschränkt sich auf Wartung und Instandhaltung der eingesetzten Materialien. Tabelle 0-14 stellt die für den Betrieb der Anlage notwendigen Primärenergieaufwendungen dar.

Tabelle 0-14: Gesamtbilanz Betrieb [Fritsche et al./GEMIS, 1995, Huser, 1995]

	Heizöl	Erdgas	Strom	Stahl Grundlast	Stahl Spitzenlast	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	546,24	1.323,86	135,24	1,25	2,11	3,37	2.005,33	2.008,70
SO ₂ [t]	79,73	2,23	5,95	0,21	0,36	0,57	87,91	88,48
NO _x [t]	34,66	44,48	9,77	0,29	0,48	0,77	88,90	89,67
Staub [t]	3,55	0,74	0,96	0,04	0,06	0,10	5,25	5,35
CO ₂ [t]	41.602,18	71.395,51	8,31	96,61	163,12	259,73	113 006,00	113 265,73
CO [t]	13,07	104,86	6,73	1,48	2,50	3,98	124,66	128,64
CH ₄ [t]	9,44	189,67	20,50	0,42	0,71	1,13	219,62	220,75
NMVOC [t]	13,89	10,52	0,94	0,04	0,06	0,10	25,34	25,44
N ₂ O [t]	0,87	2,10	0,32	0,00	0,00	0,00	3,29	3,29

Demnach wird nahezu der gesamte Primärenergieaufwand für die Bereitstellung und den Verbrauch der Energieträger benötigt. Die Aufwendungen für Wartung und Instandsetzung haben fast keinen Einfluß auf die Gesamtbilanz.

4.4

Entsorgung

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Entsorgung der Heizzentrale Riehen noch nicht endgültig geklärt. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß die Gebäude der Grundlast- und Spitzenlastzentrale nicht abgerissen, sondern nach Beendigung des Betriebes für andere Zwecke genutzt werden; die Bohrungsgebäude dagegen werden höchstwahrscheinlich abgerissen. Die Bohrungen werden mit Kies oder Sand verfüllt und die wasserleitenden Horizonte durch Zementpfropfen gegeneinander abgedichtet.

Weiterhin kann von einer Deponierung der Nichtmetalle und Baustoffe sowie von der Rückführung der Metalle ausgegangen werden. Hier wird die Betrachtungsschnittstelle an die Werkstore der Deponie und des metallaufarbeitenden Betriebes gesetzt.

4.4.1 Materialaufwand

Die wasserleitenden Horizonte müssen mit Zementpfropfen gegeneinander abgedichtet werden. Hierfür wird von einem 50 m langen Zementpfropfen im Bereich des Aquifers und von einem weiteren, ebenfalls 50 m langem Zementpfropfen oberhalb des Aquifers ausgegangen. Weiterhin werden die Bohrlöcher mit Betonplatten (2 m × 2 m × 0,3 m) gesichert [Wolff, 1996].

Für die Bohrung Riehen 1 sind entsprechend dem Bohrlochvolumen etwa 99 m³ und für die Bohrung Riehen 2 etwa 55 m³ Verfüllkies notwendig. Für das Abdichten der wasserleitenden Horizonte und für die Betonplatten werden für die Bohrlöcher 21 t Zement eingesetzt.

4.4.2 Energieaufwand und Emissionen

Es werden die Energieaufwendungen und Emissionen aufgrund des Abrisses der Bohrungsgebäude sowie die Transportfahrten zur Deponie und zum Stahlwerk betrachtet.

Abrißarbeiten. Für den Abriß der beiden Bohrungsgebäude kann von einem 15 stündigen Baumaschineneinsatz ausgegangen werden. Da nicht sicher ist, welche Baumaschinen für den Abriß eingesetzt werden, wird hier von Hydraulikbaggern und/oder Planiertrauben ausgegangen [Kampel, 1995].

Der stündliche Dieselverbrauch von Baumaschinen beträgt durchschnittlich 19 kg/h [Huser, 1994]. Es ergibt sich ein Gesamtdieselverbrauch für den Abriß von 285 kg. Folglich würden 0,0122 TJ für den Abriß der Gebäude eingesetzt werden.

Transportfahrten. Insgesamt werden 245 t Stahl der Heizzentrale einem Stahlverarbeitungswerk zugeführt. Hinzu kommen 167 t Stahl aus Austausch von Anlagenkomponenten während des 25jährigen Betriebes der Heizzentrale. Es werden 451 t Nichtmetalle der Grundlastanlage (Bohrungsgebäude) der Deponie zugeführt. Der im Stahlbeton der Grundlastzentrale enthaltene Stahl wurde dabei von der Stahlgesamtmasse subtrahiert.

Kies hat eine Dichte von durchschnittlich 1,5 t/m³; demnach werden 231 t transportiert. Die Entfernung zur nächsten Deponie beträgt 20 km, die Entfernung zum nächsten metallaufarbeitenden Betrieb 50 km und die Entfernung zur nächsten Kiesgrube 15 km [Huser, 1995].

Es wird analog der Errichtung der Anlage von Transportfahrzeugen mit einer Zuladung von 20 t ausgegangen. Für den Transport der Nichtmetalle werden 23, für den Transport der Metalle 21 sowie für die Kiestransport 12 Fahrten angenommen. Hinzu kommen die Leerfahrten. Der Energiebedarf für die Transportfahrten für den Transport der Nichtmetalle für die Grundlastanlage liegt bei 0,066 TJ. Der Energiebedarf für den Transport der Metalle beträgt 0,151 TJ. Für die Kiestransporte sind 0,026 TJ notwendig.

Insgesamt ist demnach ein Energieaufwand von 0,2556 TJ für die Entsorgung der Heizzentrale notwendig.

Emissionen. Analog den vorangegangenen Untersuchungen ergeben sich aufgrund der Entsorgung der Heizzentrale die in Tabelle 0-15 dargestellten Emissionen.

Tabelle 0-15: Direkte Emissionen Entsorgung Grundlastanlage [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Transporte Grundlastanlage [kg]	Baumaschinen Grundlastanlage [kg]	Transporte Spitzenlastanlage [kg]
SO ₂	0,52	0,74	0,29
NO _x	64,80	17,69	36,60
Staub	4,32	0,34	2,44
CO ₂	4 708,80	883,50	2 659,60
CO	21,60	5,42	12,20
CH ₄	1,73	0,06	0,98
NMVOC	17,28	3,93	9,76
N ₂ O	0,00	0,02	0,00

4.4.3 Gesamtbilanz

Tabelle 0-16 zeigt die für die Entsorgung der Anlage notwendigen Primärenergieaufwendungen und die insgesamt, vor Ort und aufgrund der vorgelagerten Prozeßketten entstandenen Emissionen.

Während die Baumaschinen für den Abriß der Gebäude nur einen sehr geringen Anteil an den gesamten Emissionen einnehmen, sind die Transportfahrten die wesentliche Einflußgröße.

Tabelle 0-16: Gesamtbilanz Entsorgung [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Diesel Transporte Grundlastanlage	Diesel Transporte Spitzenlastanlage	Diesel Abriß Bohrungsgebäude	Summe
Primärenergie [TJ]	0,17	0,09	0,01	0,27
SO ₂ [t]	0,01	0,01	0,00	0,02
NO _x [t]	0,07	0,04	0,02	0,13
Staub [t]	0,00	0,00	0,00	0,01
CO ₂ [t]	5,92	3,34	0,98	10,24
CO [t]	0,02	0,01	0,01	0,04
CH ₄ [t]	0,00	0,00	0,00	0,01
NMVOC [t]	0,02	0,01	0,00	0,04
N ₂ O [t]	0,00	0,00	0,00	0,00

4.5 Gesamtbilanz

Die gesamten notwendigen Primärenergieaufwendungen und die insgesamt entstehenden Emissionen während der gesamten technischen Lebensdauer von 25 Jahren, einschließlich aller vor- und nachgelagerten Prozeßketten sind in Tabelle 0-17 dargestellt.

Tabelle 0-17: Gesamtbilanz 25 Jahre Lebensdauer [Fritsche et al./GEMIS, 1995]

	Errichtung	Betrieb	Entsorgung	Summe
Primärenergie [TJ]	29,41	2.008,70	0,27	2.038,38
SO ₂ [t]	4,12	88,48	0,02	92,62
NO _x [t]	18,22	89,67	0,13	108,01
Staub [t]	1,74	5,35	0,01	7,10
CO ₂ [t]	2 790,41	113 265,73	10,24	116 066,39
CO [t]	22,77	128,64	0,04	151,45
CH ₄ [t]	7,09	220,75	0,01	227,84
NMVOG [t]	3,28	25,44	0,04	28,75
N ₂ O [t]	0,22	3,29	0,00	3,51

Es zeigt sich, daß die Errichtung und Entsorgung nahezu keinen Einfluß auf die Gesamtbilanz haben. Trotz der relativ hohen Errichtungsaufwendungen übt der Betrieb der Anlage den wesentlichen Einfluß auf die Bilanzen. Die hohen Aufwendungen und Emissionen während des Betriebes werden zu etwa 60 % durch den Einsatz des Erdgases und zu etwa 30 % durch den Einsatz des Heizöls verursacht. Eine ausführliche Diskussion der Bilanzen erfolgt in Kapitel 6.

5 Bilanzen der Vergleichsanlage

Eine Beurteilung der durch die Errichtung, den Betrieb und die Nutzung der Geothermieanlage Riehen entstehenden Umwelteffekte ist nur durch einen Vergleich mit anderen, fossil gefeuerten Energiebereitstellungssystemen möglich. Deshalb wird angenommen, daß an Stelle der gegebenen Heizzentrale mit geothermaler Nutzung eine heizölgefeuerte Heizzentrale eingesetzt werden soll.

Der Vergleich der Heizzentrale Riehen mit einer fossil gefeuerten Heizzentrale macht für das Vergleichssystem eine Bilanzierung auf derselben Basis notwendig. Deshalb wird im folgenden ein Alternativsystem konstruiert werden, das die gleichen Voraussetzungen wie die Heizzentrale Riehen, also die Lieferung einer geforderten thermischen Nutzenergie von jährlich 114 TJ erfüllt.

5.1 Errichtung

Es wird von der Errichtung eines einstöckigen Gebäudes mit der Grundfläche der unterirdischen Spitzenlastzentrale mit vier Räumen ausgegangen.

5.1.1 Materialaufwand

Die Raumhöhe des zu errichtenden Gebäudes beträgt 4 m. Die in Tabelle 0-1 aufgeführten Materialien wurden mit Unterstützung eines Architekturbüros ermittelt [Kampel, 1995].

Um die Vergleichbarkeit der Heizzentralen zu verbessern, wird die zu konstruierende Ölheizzentrale auf Basis der Daten für die Errichtung der Spitzenlastanlage konzipiert. Es wird von der Installation mehrerer Kesseleinheiten ausgegangen, da die Wärmenachfrage über das Jahr und auch während des Tages stark schwankt. Dadurch kann eine gute Anpassung an diese Leistungsschwankungen gewährleistet werden. Auch sind Wartung und Instandsetzung unter Gewährleistung der notwendigen Versorgungssicherheit für die Abnehmer leicht zu realisieren.

Die Spitzenlastanlage der Heizzentrale Riehen hat eine Nennlast von 8,7 MW, bereitgestellt von drei Kesseleinheiten mit je 2,9 MW. Da die Nennlast der Grundlastanlage von 5,25 MW durch die zu konstruierende Ölheizzentrale ebenfalls abgedeckt werden muß, wird von der Installation zwei weiterer 2,9 MW-Kessel mit dazugehörigen Rohrleitungen ausgegangen.

Tabelle 0-1: **Baustoffaufwand Errichtung Gebäude Ölheizzentrale** [Baupläne, 1992-93].

[Kampel, 1995]

Baustoff	Volumen [m ³]	Masse [t]
Nichtmetalle		
Betonanteil (Stahlbeton)	325,76	749,26
Zementestrich	8,10	24,30
Beton (unbewehrt)	2,40	4,80
Metalle		
Stahlanteil Stahlbeton	6,68	52,12

Der Materialaufwand für die Abgasanlage ändert sich ebenfalls. Für die beiden zusätzlichen Kessel sind zwei weitere Abgasrohre zu installieren. Der Materialaufwand für ein Abgasrohr beträgt 1,6 t (vergleiche Kapitel 4.1.2). Hinzu kommt der Materialaufwand für zwei zusätzliche Ölbehälter mit einem Füllvolumen von je 134 m³. Dagegen reduzieren sich die Materialaufwendungen um die Verbindungsleitungen zwischen Grundlast- und Spitzenlastanlage mit

dazugehöriger Aluminiumumantelung und Wärmedämmung, so daß ein Aluminiumaufwand von 0,7 t verbleibt. Als Materialaufwendungen verbleiben für die Ölheizzentrale die in Tabelle 0-2 dargestellten Stahlaufwendungen.

Tabelle 0-2: Stahlaufwand Ölheizzentrale

Bauteil	Anzahl; Länge	Leistung; Inhalt	Masse [t/Stk.]	Masse [t]
Kessel	5	max. 2 900 kW	10,90	54,5
Brenner	5		1,00	5,0
Tank	5	134 000 l	18,00	90,0
Tank	1	126 600 l	15,00	15,0
Abgasanlage	1			8,0
Leitung	ca. 450 m			3,0
Stahlbeton				56,4

5.1.2 Energieaufwand und Emissionen

Die oberirdische Errichtung der Ölheizzentrale macht einen 10-stündigen Einsatz einer Planierdraupe notwendig [Kampel, 1995]. Es wird von einem durchschnittlichen Baumaschinen-Dieselmotor mit einem Verbrauch von 19 kg Diesel pro Stunde ausgegangen [Ökoinventare für Energiesysteme, 1995]. Demnach werden 190 kg Diesel eingesetzt. Dies entspricht 0,00813 TJ. Daraus lassen sich mit den entsprechenden Emissionsfaktoren die in Tabelle 0-3 dargestellten Emissionen ermitteln.

Tabelle 0-3: Emissionen Errichtung Ölheizzentrale [Fritsche et al./GEMIS, 1995]

	Planierdraupe [kg]
SO ₂	0,50
NO _x	11,79
Staub	0,23
CO ₂	588,86
CO	3,61
CH ₄	0,04
NMVOG	2,62
N ₂ O	0,02

5.1.3 Gesamtbilanz

Tabelle 0-4 zeigt die für die Errichtung der Anlage notwendigen Primärenergieaufwendungen und die insgesamt vor Ort und aufgrund der vorgelagerten Prozeßketten entstandenen Emissionen.

Tabelle 0-4: Gesamtbilanz Errichtung

	Stahl	Zement	Aluminium	Diesel Baumaschinen	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	4,60	0,59	0,17	0,01	5,36	0,01	5,37
SO ₂ [t]	0,77	0,05	0,03	0,00	0,86	0,00	0,86
NO _x [t]	1,05	0,32	0,02	0,01	1,39	0,01	1,40
Staub [t]	0,14	0,13	0,00	0,00	0,28	0,00	0,28
CO ₂ [t]	354,58	120,39	11,01	0,65	485,98	0,65	486,63
CO [t]	5,44	0,05	0,11	0,00	5,60	0,00	5,61
CH ₄ [t]	1,55	0,23	0,01	0,00	1,79	0,00	1,79
NMVOG [t]	0,14	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,14
N ₂ O [t]	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03

Abbildung 0-1 zeigt die prozentualen Anteile der einzelnen Materialien an den gesamten Primärenergieaufwendungen für die Materialbereitstellung. Die Stahlbereitstellung verursacht demnach die deutlich größten Primärenergieaufwendungen.

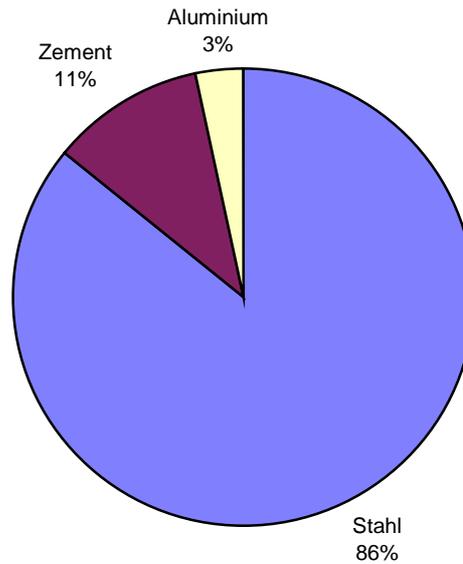


Abbildung 0-1: Primärenergieaufwendungen Materialbereitstellung

5.2 Betrieb

5.2.1 Materialaufwand

Während der unterstellten 25-jährigen Betriebsdauer müssen die in Tabelle 0-5 aufgelisteten Anlagenbauteile mindestens einmal ausgewechselt werden.

Tabelle 0-5: Materialaustausch innerhalb von 25 Jahren; Ölheizzentrale [DIN-Norm 2448]

Komponente	Anzahl; Länge	Masse [t]
Kessel	5	54,5
Brenner	5	5,0
Tank	5	90,0
Tank	1	15,0

5.2.2 Energieaufwand und Emissionen

Während des Betriebes wird ausschließlich leichtes Heizöl benötigt. Bei einem Wirkungsgrad der Kesselanlage von 0,92 ergibt sich bei einer geforderten Wärmeabgabe von 114 TJ/a ein benötigter Energiebedarf von 123,92 TJ/a [Huser, 1995].

Emissionen während des Betriebes entstehen durch die Erdölverbrennung. Diese können mittels der entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet werden. Es entstehen die in Tabelle 0-6 dargestellten Emissionen.

Tabelle 0-6: Jährliche Betriebsemissionen Heizölverfeuerung Low NO_x-Kessel; [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Huser, 1995]

	Ölheizzentrale [t/a]
SO ₂	11,63
No _x	4,20
Staub	0,38
CO ₂	9 132,17
CO	1,86
CH ₄	0,58
NMVOOC	0,97
N ₂ O	0,20

5.2.3 Gesamtbilanz

Für die ganzheitliche Bilanzierung der Ölheizzentrale wird eine Lebensdauer von 25 Jahren unterstellt. Veränderungen beispielsweise bei den Emissionsfaktoren sind über diesen Zeitraum zu erwarten, werden aber aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt.

Der Materialaufwand während des Betriebs der Anlage beschränkt sich auf Wartung und Instandhaltung der eingesetzten Materialien. Insgesamt ergeben sich während des Betriebes der Ölheizzentrale die in Tabelle 0-7 dargestellten Primärenergieaufwendungen und Emissionen.

Tabelle 0-7: Gesamtbilanz Betrieb [Fritsche et al./GEMIS, 1995, Huser, 1995]

	Heizöl	Stahl	Gesamt Material	Gesamt Energieträger	Summe
Primärenergie [TJ]	3314,86	3,32	3,32	3314,86	3318,18
SO ₂ [t]	483,88	0,56	0,56	483,88	484,44
NO _x [t]	210,32	0,76	0,76	210,32	211,08
Staub [t]	21,56	0,10	0,10	21,56	21,66
CO ₂ [t]	252 465,31	256,29	256,29	252 465,31	252 721,61
CO [t]	79,31	3,93	3,93	79,31	83,24
CH ₄ [t]	57,31	1,12	1,12	57,31	58,43
NMVOOC [t]	84,27	0,10	0,10	84,27	84,36
N ₂ O [t]	5,27	0,00	0,00	5,27	5,27

5.3 Entsorgung

Das Gebäude der Ölheizzentrale wird nach Beendigung des Betriebes nicht abgerissen, sondern für andere Zwecke genutzt. Die Stahlbauteile werden in ein Stahlverarbeitungswerk rückgeführt. Als Betrachtungsschnittstelle wird das Werkstor des Stahlwerkes gesehen.

5.3.1 Energieaufwand und Emissionen

Insgesamt werden 232 t Stahl einem Stahlverarbeitungswerk zur Weiterverarbeitung zugeführt. Hinzu kommen 165 t Stahl die während des Betriebes ausgetauscht wurden und hier miterfaßt werden. Die Entfernung zum nächsten Stahlverarbeitungswerk beträgt 50 km [Huser, 1995]. Analog den vorangegangenen Berechnungen ergibt sich bei notwendigen 17 Transportfahrten ein Energiebedarf von 0,122 TJ.

Emissionen entstehen ausschließlich aufgrund der Transportfahrten. Sie lassen sich entsprechend der bisherigen Vorgehensweise berechnen. Es ergeben sich die in Tabelle 5-8 dargestellten Emissionen.

Tabelle 0-8: Emissionen Entsorgung; Transportfahrten [Fritsche et al./GEMIS, 1995]

		Transportfahrten
		[kg]
SO2	[kg]	0,04
NOx	[kg]	45,00
Staub	[kg]	3,00
CO2	[kg]	3 270,00
CO	[kg]	15,00
CH4	[kg]	1,20
NMVOG	[kg]	12,00
N2O	[kg]	0,00

5.3.2 Gesamtbilanz

Die Gesamtbilanz für die Entsorgung faßt die direkten Emissionen vor Ort und die Emissionen aufgrund der Bereitstellung von Dieselkraftstoff zusammen (Tabelle 0-9).

Tabelle 0-9: Gesamtbilanz Entsorgung [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

		Transportfahrten
		Entsorgung
Primärenergie	[TJ]	0,13
SO2	[t]	0,01
NOx	[t]	0,06
Staub	[t]	0,00
CO2	[t]	4,66
CO	[t]	0,02
CH4	[t]	0,00
NMVOG	[t]	0,02
N2O	[t]	0,00

5.4 Gesamtbilanz

Die gesamten notwendigen Primärenergieaufwendungen und die insgesamt entstehenden Emissionen während der gesamten technischen Lebensdauer von 25 Jahren, einschließlich aller vor- und nachgelagerten Prozeßketten sind in Tabelle 0-10 dargestellt.

Entsprechend der geothermischen Heizzentrale Riehen ist der Betrieb der Anlage die wesentliche Einflußgröße auf die Gesamtbilanz; Errichtung und Entsorgung sind energetisch und emissionsbezogen nahezu unbedeutend.

Während des Betriebes der Anlage werden fast die gesamten Aufwendungen durch den Einsatz des leichten Heizöls verursacht, Wartung und Instandsetzung sind demgegenüber (fast) bedeutungslos. Eine ausführliche Diskussion der Bilanzen erfolgt in Kapitel 6.

Tabelle 0-10: Gesamtbilanz [Fritsche et al./GEMIS, 1995; Informationsblatt Gruneko AG, 1994]

	Errichtung	Betrieb	Entsorgung	Summe
Primärenergie [TJ]	5,37	3318,18	0,13	3.323,68
SO ₂ [t]	0,86	484,44	0,01	485,30
NO _x [t]	1,40	211,08	0,06	212,54
Staub [t]	0,28	21,66	0,00	21,94
CO ₂ [t]	486,63	252 721,61	4,66	253 212,90
CO [t]	5,61	83,24	0,02	88,87
CH ₄ [t]	1,79	58,43	0,00	60,22
NMVOG [t]	0,14	84,36	0,02	84,52
N ₂ O [t]	0,03	5,27	0,00	5,29

6 Auswertung

Die ermittelten Ergebnisse werden im folgenden unter Einbeziehung der Energie- und Materialbilanzen energetisch und emissionsbezogen interpretiert und diskutiert.

6.1 Energieaufwendungen

Für eine zielführende Ergebnisdiskussion ist zunächst die Bildung verschiedener Kenngrößen notwendig, die aus den dargestellten Ergebnissen resultieren, um entsprechende Aussagen bei einem Vergleich der diskutierten Bilanzen zu ermöglichen.

6.1.1 Energetische Kenngrößen

Als Maß für den Ressourcenverzehr an erneuerbaren Energieträgern wird der kumulierte Energieaufwand berechnet. Darunter wird der primärenergetisch bewertete Energieaufwand sämtlicher vor- und nachgelagerter Prozeßstufen verstanden, der im Verlauf der zu erwartenden technischen Lebensdauer einer Anlage notwendig ist. Er wird auf den Nutzen, in diesem Fall eine Einheit bereitgestellter Energie, bezogen und berücksichtigt alle energetischen Aufwendungen, die innerhalb einer definierten Zeitspanne direkt oder indirekt (z. B. in Form von Energie, die in Stoffen gespeichert ist) in die Energiebereitstellung einfließen [Kaltschmitt und Wiese, 1995].

Zusätzlich werden weitere Kenngrößen berechnet, die in der Vergangenheit in der Diskussion um Energiebilanzen verschiedener Systeme zur Energiewandlung Bedeutung erhalten haben, nämlich die Kenngrößen

- primärenergetischer Erntefaktor und
- primärenergetische Amortisationszeit.

Kumulierter Energieaufwand. Der kumulierte Energieaufwand müßte strenggenommen für jeden einzelnen Energieträger (z. B. Steinkohle, Erdgas, Uran) ausgewiesen werden, um zu belastbaren Aussagen über den Ressourcenverzehr jedes einzelnen Energieträgers zu kommen. Darauf wird in dieser Studie aufgrund bisher noch nicht verfügbarer Daten verzichtet. Es wird nur der gesamte kumulierte Energieaufwand ausgewiesen, der ein Maß für den Verbrauch an fossilen und nuklearen und damit nicht erneuerbaren Energieressourcen ist.

Der kumulierte Energieaufwand wird in Primärenergieäquivalenten angegeben. Er setzt sich zusammen aus dem kumulierten Energieaufwand der Herstellung (KEA_H), der Nutzung (KEA_N) sowie der Entsorgung (KEA_E). Die verschiedenen Terme setzen sich folgendermaßen zusammen:

- Der energetische Herstellungsaufwand (KEA_H) bestimmt sich aus der Summe sämtlicher energetischer Aufwendungen für die Herstellung der Energiewandlungsanlage einschließlich aller vorgelagerten Prozeßketten.
- Der kumulierte Energieaufwand für die Nutzung (KEA_N) beinhaltet sämtliche energetischen Aufwendungen, die während der Nutzung der Anlage anfallen. Auch hier werden die vorgelagerten Prozeßketten im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung einbezogen.
- Der Entsorgungsaufwand (KEA_E) berücksichtigt die energetischen Aufwendungen, die im Zusammenhang mit der Entsorgung aller Anlagen und Betriebsmittel entstehen.

Der kumulierte Energieaufwand wird auf die insgesamt von der Anlage während der gesamten technischen Lebensdauer bereitgestellte Energie am Anlagenausgang bezogen. Damit ist der

kumulierte Energieaufwand verschiedener Anlagen vergleichbar [Kaltschmitt und Wiese, 1995].

Primärenergetischer Erntefaktor. Der primärenergetische Erntefaktor gibt an, wievielmehr Primärenergie eine Konversionsanlage zur Energiebereitstellung während ihrer technischen Lebensdauer substituiert, als zu ihrer Herstellung, ihrem Betrieb und ihrer Entsorgung aufgewendet werden muß. Der Energieinhalt des Brennstoffes wird dabei nicht berücksichtigt. Der primärenergetische Erntefaktor (EF_{Prim}) wird durch die Gleichung

$$EF_{\text{Prim}} = E_{\text{Netto, Prim}} / (KEA_{\text{H}} + KEA_{\text{N}} + KEA_{\text{E}})$$

beschrieben.

$E_{\text{Netto, Prim}}$ beschreibt dabei die im Verlauf der technischen Lebensdauer bereitgestellte primärenergetisch bewertete bzw. substituierte Energie. Für die primärenergetische Bewertung der Energieerzeugung von Nutzungssystemen regenerativer Energie ist die Substitutionsmethode geeignet. Dabei wird die Nettoenergieerzeugung mit demjenigen Anteil fossiler Primärenergie bewertet, der durch den Betrieb des regenerativen Erzeugungssystems gegenüber einer vergleichbaren konventionellen Referenzanlage eingespart wird [Kaltschmitt und Wiese, 1995]. Für Geothermieanlagen bedeutet dies, daß die durch die Nutzung des geothermischen Potentials zur Verfügung gestellte Nettoenergie mit demjenigen Anteil fossiler Primärenergie bewertet wird, der durch die geothermische Nutzung eingespart wird. Hier wird von der Substitution einer erdölgefeuerten Heizzentrale ausgegangen.

Primärenergetische Amortisationszeit. Die primärenergetische Amortisationszeit beschreibt den Zeitraum, innerhalb dessen eine Energiewandlungstechnik so viel an Primärenergie substituiert hat, wie für ihre Herstellung und ihren Betrieb im Verlauf dieser Amortisationszeit aufgewendet werden muß; nach Ablauf dieser Zeitspanne liefert die Anlage damit netto Energie. Der Energieinhalt des Brennstoffes wird dabei nicht berücksichtigt; würde er betrachtet, ergäbe sich die physikalisch sinnlose Angabe einer negativen energetischen Amortisationszeit.

Grundsätzlich ergibt sich die primärenergetische Amortisationszeit als Quotient aus der Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Errichtung und den Anteil des kumulierten Energieaufwandes des Betriebes während der Amortisationszeit und dem jährlichen Energiebedarf. Die energetische Amortisationszeit kann wie folgt berechnet werden [Kaltschmitt und Wiese, 1995]:

$$AZ_{\text{Prim}} = (KEA_{\text{H}} \times L) / (E_{\text{Netto, Prim}} - KEA_{\text{N}})$$

Demnach ist die energetische Amortisationszeit definiert als das Verhältnis zwischen dem Produkt aus dem kumuliertem Herstellungsaufwand KEA_{H} und der technischen Lebensdauer L der Anlage und der Differenz zwischen der primärenergetisch bewerteten im Verlauf der Anlagenlebensdauer bereitgestellten Energie $E_{\text{Netto, Prim}}$ und dem kumulierten Energieaufwand für die Nutzung KEA_{N} (ohne Berücksichtigung der fossilen Brennstoffenergie). Geothermische Energie wird dabei durch die eingesparte fossile Energie bewertet.

6.1.2

Diskussion der Ergebnisse

Grundlage der Ergebnisdiskussion sind die nach Kapitel 6.1.1 ermittelten energetischen Kenngrößen. Es werden dabei die Ergebnisse für die verschiedenen Anlagen verglichen.

Kumulierter Energieaufwand. Für die beiden Anlagen ergeben sich die folgenden kumulierten Energieaufwendungen:

- Heizzentrale Riehen: 2 038,4 TJ
- Ölheizzentrale: 3 323,6 TJ

Demnach ist die geothermische im Vergleich zu einer fossilen Bereitstellung der gleichen Nutzenergie mit einem um rund ein Drittel geringeren Einsatz an nicht erneuerbaren Energieressourcen verbunden. Damit kommt es infolge der Nutzung dieser hydrothermalen Erdwärmevorkommen zu einer Einsparung von 1 250 bis 1 300 TJ an fossiler und nuklearer Primärenergie.

Abbildung 0-1 stellt die kumulierten Energieaufwendungen für die verschiedenen Lebensabschnitte der Anlagen graphisch dar. Es zeigt sich, daß die Energieaufwendungen nahezu ausschließlich durch den Betrieb der Anlagen bestimmt werden. Die energetischen Aufwendungen für die Entsorgung der Heizzentrale Riehen und die Aufwendungen für die Entsorgung der Ölheizzentrale sind demgegenüber nahezu vernachlässigbar.

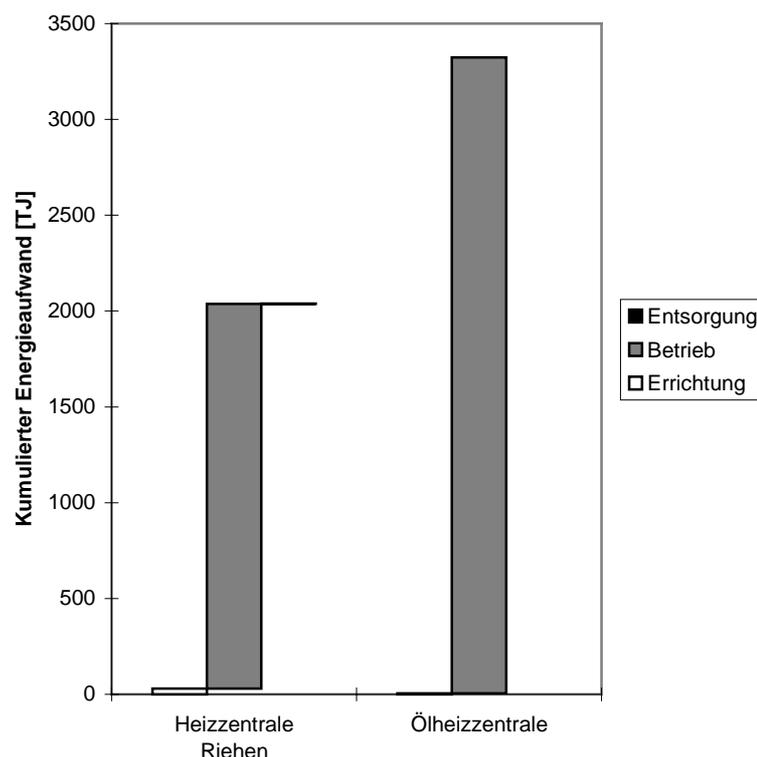


Abbildung 0-1: Vergleich kumulierter Energieaufwendungen

Bezogen auf die gesamte, während der Lebenszeit der Anlagen zur Verfügung gestellte Endenergie am Anlagenausgang von 2 850 TJ (114 TJ/a) ergeben sich folgende Umsetzungsgrade, bezogen auf die eingesetzte nicht erneuerbare Primärenergie:

- Heizzentrale Riehen: $0,72 \text{ TJ}_{\text{Prim}}/\text{TJ}_{\text{End}}$
- Ölheizzentrale: $1,17 \text{ TJ}_{\text{Prim}}/\text{TJ}_{\text{End}}$

Demnach ist Bereitstellung von 1 TJ Endenergie an Wärme frei Anlagenausgang bei der geothermischen Heizzentrale mit einem Aufwand an fossiler und nuklearer Primärenergie von rund 0,72 TJ verbunden. Im Unterschied dazu ist die Bereitstellung der gleichen Endenergie auf fossiler Basis mit einem Primärenergieaufwand von 1,17 TJ verbunden; davon fallen rund 0,17 TJ an Verlusten in den vorgelagerten Ketten (u. a. Transport des Rohöls nach Deutschland, Umwandlung in der Raffinerie) und insbesondere bei der letzten Umwandlung (d. h. Verbrennung im Heizwerk) an. Im Vergleich zu der mit leichtem Heizöl gefeuerten Anlage werden damit durch die geothermische Heizzentrale $0,45 \text{ TJ}_{\text{Prim}}/\text{TJ}_{\text{End}}$ an Primärenergie eingespart.

Werden im Gegensatz zu den oben ermittelten kumulierten Energieaufwendungen nur die Energieaufwendungen betrachtet, die in die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung der Anlage eingehen und die fossilen Brennstoffenergien (d. h. der Brennstoff) nicht betrachtet, kann die sogenannte graue Energie ermittelt werden. Sie bewegt sich bei den beiden betrachteten Anlagen in der im folgenden dargestellten Größenordnung im Verlauf der gesamten technischen Lebensdauer.

- Heizzentrale Riehen: $251,6 \text{ TJ}_{\text{Prim}}$
- Ölheizzentrale: $225,6 \text{ TJ}_{\text{Prim}}$

Bezogen auf die gesamte während der Lebenszeit der Anlagen zur Verfügung gestellte Endenergie von 2 850 TJ ergeben sich folgende Werte:

- Heizzentrale Riehen: $0,088 \text{ TJ}_{\text{Prim}}/\text{TJ}_{\text{End}}$
- Ölheizzentrale: $0,079 \text{ TJ}_{\text{Prim}}/\text{TJ}_{\text{End}}$

In diesen Zahlen wird deutlich, daß der primärenergetisch bewertete Aufwand für die eigentliche Anlage zur Wärmebereitstellung (d. h. ohne den fossilen und nuklearen Primärenergieeinsatz) sehr gering ist und bei beiden betrachteten Fällen deutlich unter 10 % der eingesetzten Primärenergie liegt; sie spielen damit bei einer Gesamtenergiebilanz nur eine untergeordnete Rolle. Aus der Relation zwischen der geothermischen Heizzentrale und dem mit leichtem Heizöl betriebenen Heizwerk geht aber auch hervor, daß der Primärenergieaufwand für die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung der Anlage zur Nutzung der hydrothermalen Wärmenvorkommen rund 10 % höher ist als der der fossil gefeuerten Heizungsanlage.

Infolge dieser Zusammenhänge machen sich Unterschiede bezüglich des Errichtungsaufwandes - bezogen auf die Lebensdauer der Anlage - kaum bemerkbar. Grobe Annahmen oder Einschätzungen im Rahmen der Bilanzierung, beispielsweise bei der Bestimmung der Häufigkeit von Transportfahrten oder eine Fehleinschätzung der Arbeitszeit von Baumaschinen, haben auf das Gesamtergebnis nahezu keinen Einfluß.

Primärenergetischer Erntefaktor. Für die verschiedenen Anlagen ergeben sich die folgenden primärenergetischen Erntefaktoren:

- Heizzentrale Riehen: 12,26
- Ölheizzentrale: 13,51

Bei einem Erntefaktor kleiner als 1 ist der Einsatz eines Energiewandlungssystems aus energetischer Sicht nicht zu vertreten; damit ist eine Anlage um so positiver zu bewerten, je größer der primärenergetische Erntefaktor ist. Bezogen auf die hier untersuchten Systeme zeigt sich damit, daß beide Anlagen deutlich positiv zu bewerten sind. Auch bewegen sich die Erntefaktoren bei beiden Optionen in einer vergleichbaren Größenordnung. Beide Anlagen können etwa das 12 bis 14-fache an Energie bereitstellen, als insgesamt während ihrer Lebenszeit aufgewendet werden muß. Trotzdem ist der Erntefaktor bei der geothermischen Heizzentrale mit rund einem Zehntel geringfügig geringer. Der etwa um 10 % größere Wert für die fossil gefeuerte Anlage im Verhältnis zur leistungsgleichen Geothermieanlage begründet sich in erster Linie durch die unterschiedlichen Errichtungsaufwendungen; die Energieaufwendungen für die Errichtung der Geothermieanlage übersteigen die der Ölheizzentrale um etwa das 5 bis 6-fache.

Primärenergetische Amortisationszeit. Für die verschiedenen Anlagen ergeben sich folgende primärenergetischen Amortisationszeiten:

- Heizzentrale Riehen: 3,1 Monate
- Ölheizzentrale: 0,6 Monate

Bezogen auf die Gesamtlebensdauer der Anlagen von 25 Jahren ist die Heizzentrale Riehen nach 1,03 % und die Ölheizzentrale nach 0,2 % der Lebensdauer energetisch ausgeglichen.

Die primärenergetische Amortisationszeit wird zwar durch weitere Faktoren wie den Energieaufwand während des Betriebes oder die primärenergetische Bewertung der bereitgestellten Endenergien beeinflusst; jedoch kann der Errichtungsaufwand als wesentlicher Grund für die unterschiedlichen Amortisationszeiten angesehen werden.

Im folgenden wird die Zeit ermittelt, innerhalb derer sich die erhöhten Energieaufwendungen für die Errichtung der Geothermieanlage gegenüber den niedrigeren Energieaufwendungen für die Errichtung der fossil gefeuerten Anlage ausgleichen. Nach Inbetriebnahme sind jährlich Energieaufwendungen in Form von Energieträgern notwendig. Es läßt sich durch Bezug aller Energieaufwendungen auf die Lebensdauer der Anlagen in etwa der Zeitpunkt bestimmen, zu dem die Mehraufwendungen für die Errichtung der Geothermieanlagen ausgeglichen sind.

In Abbildung 0-2 sind die Energieaufwendungen für die Heizzentrale Riehen und die Ölheizzentrale vergleichend über die Betriebszeit der Anlagen dargestellt. Es zeigt sich, daß nach etwa 5,5 Monaten ein Gleichstand erreicht ist.

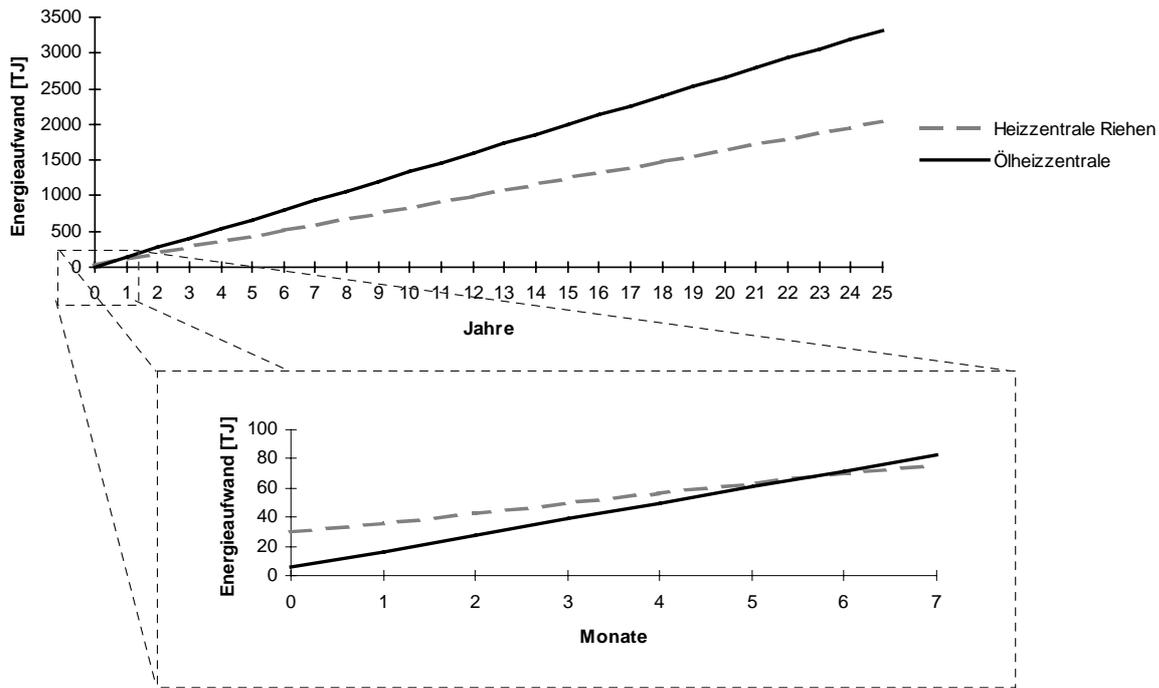


Abbildung 0-2: Energieaufwendungen, Vergleich zwischen der Heizzentrale Riehn und einer Ölheizzentrale

6.2 Ergebnisdiskussion Emissionen

Neben der Energiebilanz sind die Stofffreisetzungen eine weitere kennzeichnende Größen für der Beurteilung von Energiebereitstellungssystemen. Diese werden - soweit sie bilanziert wurden - im folgenden analysiert. Es werden die Treibhausgase sowie die human- und ökotoxischen Stofffreisetzungen der verschiedenen Anlagen verglichen und diskutiert.

6.2.1 Treibhausgase

Bei der Quantifizierung des Beitrags zum anthropogenen Treibhauseffekt ist es notwendig, von den hier bilanzierten Emissionen neben CO_2 auch N_2O und CH_4 in die Überlegungen einzubeziehen. Diese sind ebenfalls für den Treibhauseffekt relevant. Bezogen auf CO_2 haben diese Spurengase jedoch ein unterschiedliches Treibhauspotential. Nach IPCC 1994 wird CO_2 mit dem Faktor 1, CH_4 mit dem Faktor 24,5 und N_2O mit dem Faktor 320 gewichtet [The 1994 Report Radiative Forcing IPCC, 1994], um die entsprechenden CO_2 -Äquivalente und das gesamte Treibhausgaspotential zu ermitteln, wenn eine Verweilzeit der klimawirksamen Gase in der Atmosphäre von 100 Jahren unterstellt wird.

Abbildung 0-3 zeigt die kumulierten CO₂-Freisetzungen sowie die CO₂-Äquivalente einschließlich der vorgelagerten Prozeßketten für die einzelnen Lebensphasen der Anlagen. Es wird deutlich, daß die CO₂-Emissionen und auch die CO₂-Äquivalente nahezu ausschließlich vom Betrieb der Anlagen beeinflusst werden.

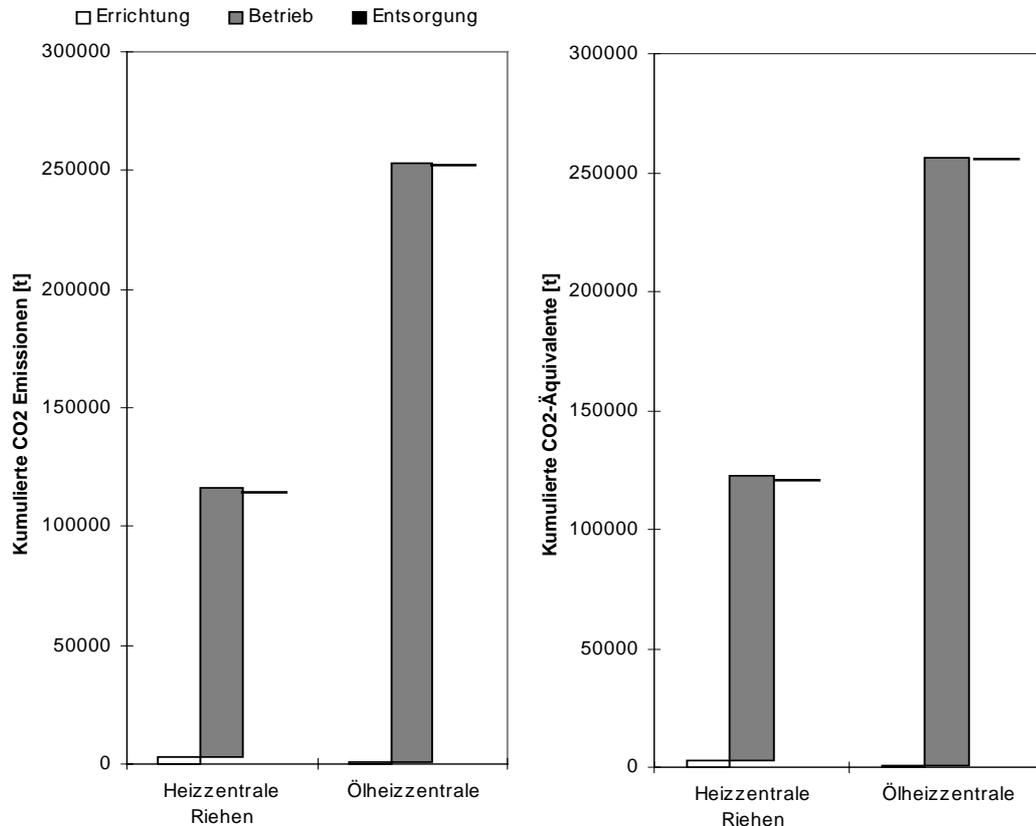


Abbildung 0-3: CO₂-Emissionen (links), CO₂ Äquivalente (rechts)

Auf die Wärmebereitstellung der Anlagen bezogen ergibt sich für die geothermische Heizzentrale Riehen folgende Bilanz der CO₂- und CO₂-Äquivalente:

- 40,7 t/TJ_{Nutz} CO₂
- 43,1 t/TJ_{Nutz} CO₂-Äquivalente

Für die ebenfalls betrachtete Ölheizzentrale ergeben sich die folgenden Größenordnungen.

- 88,8 t/TJ_{Nutz} CO₂
- 89,9 t/TJ_{Nutz} CO₂-Äquivalente

Die bei der Errichtung und der Entsorgung der Anlagen freigesetzten Stoffe haben auf die Gesamtbilanz nahezu keinen Einfluß. Obwohl die CO₂-Emissionen und auch die CO₂-Äquivalente, die bei der Errichtung der Heizzentrale Riehen emittiert werden, mit 2 790 t die Emissionen von 487 t für die Errichtung der Ölheizzentrale um etwa das 6-fache übersteigen, sind die Mehremissionen - bezogen auf die bereitgestellte Endenergie am Anlagenausgang im Verlauf der gesamten Lebensdauer der Heizzentrale - für die Ölheizzentrale letztlich um etwa das Doppelte höher.

Die Mehremissionen für die Errichtung der Geothermieanlagen werden jedoch durch Emissionseinsparungen während des Betriebes, der im Vergleich zu dem des fossil gefeuerten Heizwerkes mit merklich geringeren Stofffreisetzungen verbunden ist, um ein Vielfaches wieder ausgeglichen.

Im folgenden wird die Zeit ermittelt, innerhalb derer sich die erhöhten Errichtungsemissionen der Geothermieanlagen gegenüber den niedrigeren Errichtungsemissionen der fossil gefeuerten Anlagen ausgleichen. Nach Inbetriebnahme werden jährlich Emissionen für die Bereitstellung der Betriebsmittel (Energieträger) sowie durch die Energieumwandlung in der Anlage selbst frei. Es läßt sich durch Bezug aller weiteren Emissionen auf die Lebensdauer der Anlagen in etwa der Zeitpunkt bestimmen, zu dem die Mehremissionen für die Errichtung der Geothermieanlagen ausgeglichen sind.

Für die Heizzentrale Riehen und deren Vergleichsanlage beträgt der Unterschied der Emissionen vor Inbetriebnahme der Anlagen 2 304 t an CO₂ und 2 495 t an CO₂-Äquivalenten. Die Differenz der CO₂-Emissionen bzw. der CO₂-Äquivalente während des Betriebes beträgt 454 bzw. 465 t/Monat. Daraus ergibt sich ein Zeitraum bis zum Ausgleich der CO₂-Emissionen von 5 Monaten und der CO₂-Äquivalente von 5,5 Monaten. Diese Werte können aber nur als Rechenwerte verstanden werden, da der Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlagen und somit die stark schwankende Wärmeabnahme während des Jahres nicht berücksichtigt werden.

In Abbildung 0-4 sind die CO₂-Äquivalente für die Heizzentrale Riehen und die Ölheizzentrale vergleichend über die Betriebszeit der Anlagen dargestellt. Die CO₂-Emissionen verhalten sich während der Lebensdauer der Anlagen in etwa entsprechend den CO₂-Äquivalenten.

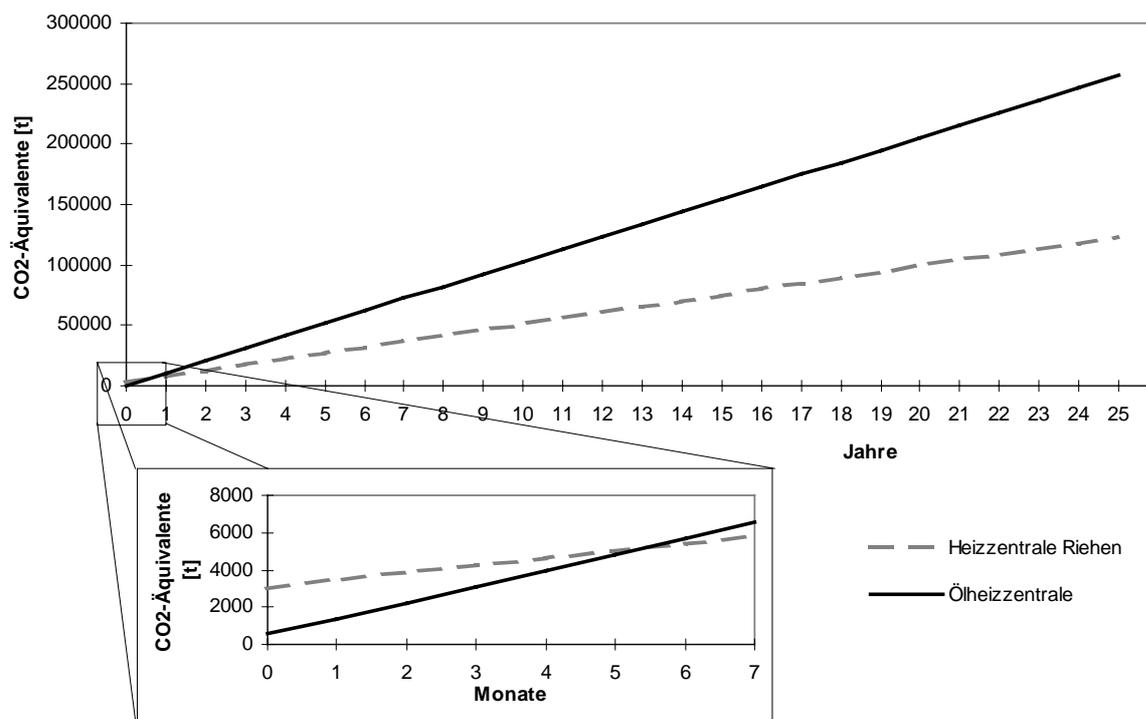


Abbildung 0-4: CO₂-Äquivalente; Heizzentrale Riehen - Ölheizzentrale

Zusätzlich sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der ganzheitlichen Bilanzen und der ausschließlich infolge des Betriebs freigesetzten Emissionen von Interesse; sie werden im folgenden analysiert.

Abbildung 0-5 zeigt die möglichen Emissions-Einsparungen durch Substitution der fossil gefeuerten Anlage durch die Geothermieanlage. Es ist zum einen die sich durch eine ganzheitliche Bilanzierung ermittelte Einsparung und zum anderen die durch die Betriebsemissionen möglichen Einsparung dargestellt.

Durch Substitution der fossil gefeuerten Anlagen durch Geothermieanlagen wird hier demnach während der technischen Lebensdauer zusätzlich zu den Betriebsemissionen etwa 11 % an CO₂-Emissionen und etwa 8 % CO₂-Äquivalente, die in den vorgelagerten Ketten freigesetzt werden, eingespart.

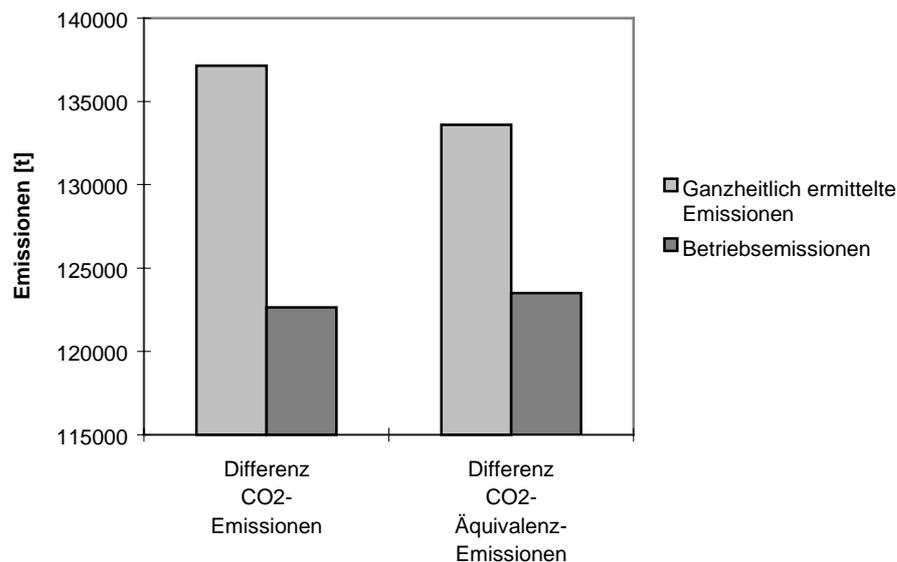


Abbildung 0-5: Einsparungen an CO₂-Emissionen und CO₂-Äquivalenten aufgrund der Substitution fossil gefeuerter Anlagen durch Geothermieanlagen

6.2.2 Human- und ökotoxische Stofffreisetzungen

SO₂, CO, NO_x und Staub wurden als human- und ökotoxische Luftschadstoffe bilanziert. Anders als bei der Betrachtung der Treibhausgase ist es nicht möglich, pauschale wirkungsspezifische Aussagen zu diesen Schadstoffen zu machen. Deshalb werden hier nur die Stofffreisetzungen der verschiedenen Anlagen einschließlich der vorgelagerten Prozeßketten gegenübergestellt.

Abbildung 0-6 stellt die Mengen der emittierten Schadstoffe für die Lebensabschnitte der beiden Anlagen gegenüber.

Schwefeldioxid. Schwefeldioxid entsteht hauptsächlich bei der Verbrennung von leichtem Heizöl oder Diesel. Aufgrund des großen Einflusses des Betriebes auf die Gesamtbilanz haben die Errichtung und die Entsorgung nahezu keinen Einfluß auf die Gesamtemissionen. Die durch das Bohrgerät verursachten SO₂-Emissionen sind gering im Vergleich zu den SO₂-Emissionen der Ölheizzentrale während des Betriebes.

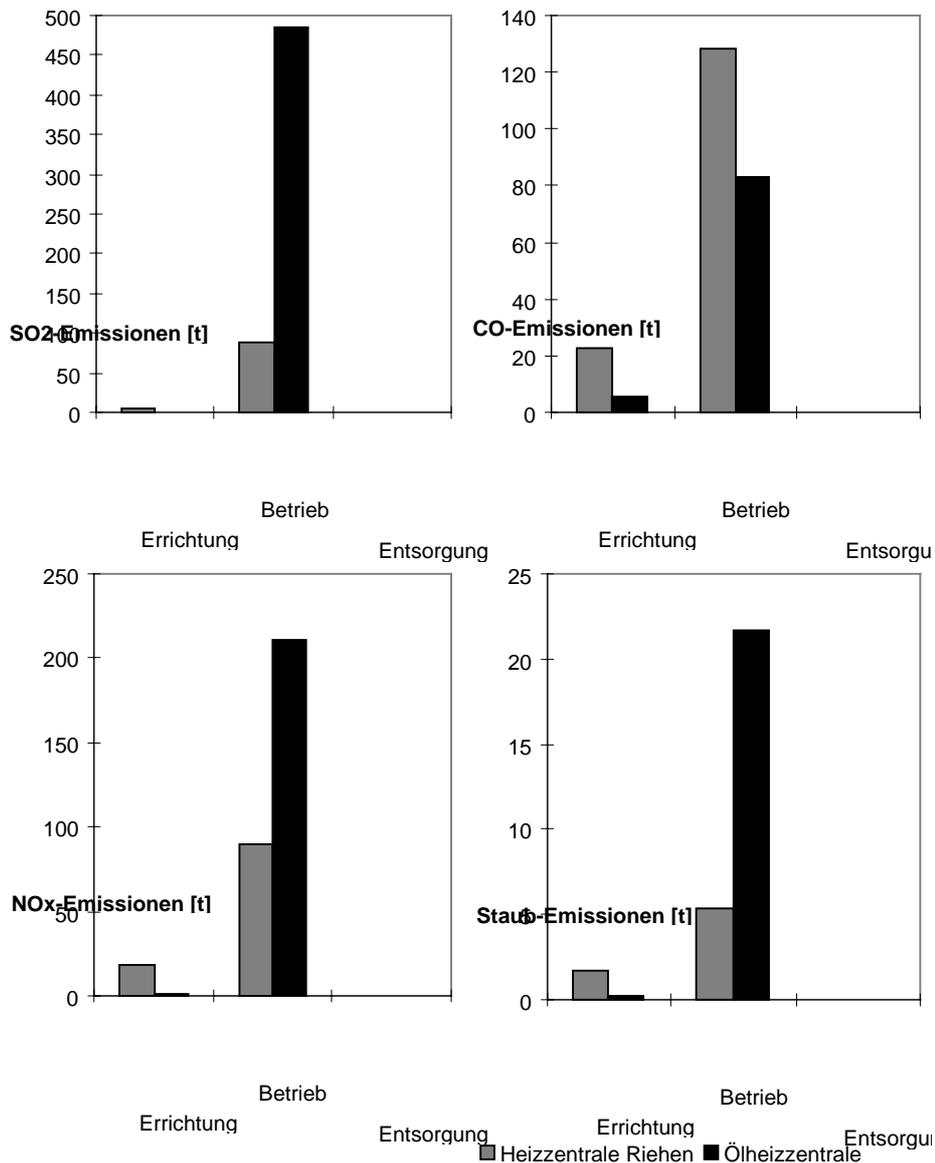


Abbildung 0-6: Freisetzung human- und ökotoxischer Stoffe

Kohlenmonoxid. Bei den Kohlenmonoxid-Emissionen ist die Geothermieanlage durch höhere Stofffreisetzungen gekennzeichnet. Dies liegt in den CO-Emissionen durch den Einsatz der gasbetriebenen Blockheizkraftwerke und den hohen CO-Freisetzungen aufgrund der Stahlbereitstellung begründet [Huser, 1995], da bei der Geothermieheizzentrale eine größere Stahlgesamtmasse als bei der fossil gefeuerten Anlage eingesetzt wird. Die Emissionen der Erdgasverbrennung sind hier im Verhältnis zu den Emissionen der Heizölverbrennung ungünstiger [Huser, 1995]. Außerdem zeigen sich höhere Emissionen aufgrund des Einsatzes des Bohrgerätes, der eingesetzten Baumaschinen für den Abriß sowie der Transportfahrzeuge.

Stickoxide. Die Ölheizzentrale setzt während der gesamten Lebensdauer deutlich mehr NO_x als die Geothermieanlage frei. NO_x wird hier am stärksten durch die Verbrennung des Heizöls gebildet. Weiterhin verursachen der Einsatz des Bohrgerätes, der Baumaschinen für den Abriß sowie der Transportfahrzeuge Stickoxid-Emissionen.

Staub. Auch hier setzt die Ölheizzentrale über die gesamte Lebensdauer deutlich mehr Stoffe als die Geothermieanlage frei. Staub wird am meisten durch die Verbrennung des Heizöls verursacht, jedoch haben auch das Bohrgerät und die Transportfahrten einen deutlichen Anteil an den Emissionen.

7 Schlußbetrachtung

Ziel und Inhalt dieser Untersuchung ist es, eine Bereitstellung von Wärme aus hydrothermalen Vorkommen mit der aus fossilen Energieträgern zu vergleichen hinsichtlich energetischer Kenngrößen und Bilanzen ausgewählter Stofffreisetzungen (u. a. SO₂, NO_x, CO₂, CH₄, N₂O). Diese Bilanzen werden unter Berücksichtigung sämtlicher vor- und ggf. nachgelagerter Prozesse jeweils für die Anlagenerstellung, den Betrieb und die Entsorgung konkret am Beispiel einer existierenden geothermischen Heizzentrale ermittelt. Dazu wird der methodische Ansatz der ganzheitlichen Bilanzierung zugrunde gelegt. Im Rahmen dieser Untersuchung hat sich diesbezüglich gezeigt,

- daß die ganzheitliche Bilanzierung ein geeignetes Instrument darstellt, die mit einer Möglichkeit zur Energiebereitstellung verbundenen Energie- und Stoffflüsse zu erfassen und damit einerseits die Voraussetzung für eine Schwachstellenanalyse zu schaffen und andererseits einen methodisch sauberen Vergleich verschiedener Alternativen zu ermöglichen;
- daß jedoch insbesondere für die Erstellung der Wirkungsbilanz (u. a. Treibhauspotential) und für die Bewertung die benötigten Daten und die notwendigen methodischen Ansätze bisher nur teilweise verfügbar sind und in Zukunft weitergehend erarbeitet werden müssen.

Aus den unabhängig von den noch anstehenden Aufgaben bisher erzielten Ergebnissen lassen sich die folgenden zusammenfassenden Aussagen ableiten.

- Der Energieaufwand und folglich auch die notwendigerweise damit verbundenen Stofffreisetzungen für die Anlagenerrichtung sind bei einer geothermischen Heizzentrale im Vergleich zu einer mit leichtem Heizöl oder Erdgas gefeuerten Anlage - bei gleicher Endenergiebereitstellung am Anlagenausgang- rund 5-fach höher.
- Der Energieaufwand und die Emissionen beim Betrieb der geothermischen Heizzentrale sind - wieder verglichen mit einer fossil gefeuerten Heizungsanlage - deutlich geringer; sie werden - abgesehen von dem Verbrauch an elektrischer Energie und den dafür im Kraftwerkspark oder durch den Betrieb eines Blockheizkraftwerks freigesetzten Emissionen - im wesentlichen durch den zusätzlich eingesetzten fossilen Brennstoff bestimmt.
- Die Entsorgung einer geothermischen Heizzentrale ist aufwendiger als die eines fossil gefeuerten Heizwerks; jedoch sind die Energieaufwendungen und die Emissionen insgesamt gesehen gering.
- Zusammengekommen kann deshalb davon ausgegangen werden, daß es durch eine geothermische Wärmebereitstellung zu einer erheblichen Einsparung an fossiler Primärenergie kommt, da der Anlagenbetrieb im wesentlichen die Energiebilanzen dominiert. Entsprechend kommt es auch zu einer merklichen Reduzierung der mit der Wärmebereitstellung verbundenen Stofffreisetzungen.
- Eine Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Erdwärmevorkommen kann damit einen merklichen Beitrag zu einer umwelt- und klimaverträglicheren Energieversorgung leisten, zumal sie durch eine ähnliche Versorgungssicherheit und eine weitgehend betriebssicher verfügbare Technik gekennzeichnet ist. Außerdem kann durch die Reduzierung des Einsatzes fossiler Energieträger ein Beitrag zum Schutz der fossilen Energieressourcen geleistet werden.

Bezogen auf die konkret untersuchte geothermische Heizzentrale in Riehen bei Basel in der Schweiz können die erzielten Ergebnisse wie folgt zusammengefaßt werden.

- Die untersuchte Anlage benötigt pro bereitgestelltem TJ an Endenergie frei Anlagenausgang nur rund 0,72 TJ an Primärenergie; dadurch kommt es im Vergleich zu einer mit

leichtem Heizöl gefeuerten Anlage zur Bereitstellung der gleichen Endenergie zu einer Einsparung von 0,45 TJ an nicht erneuerbarer Energie pro TJ bereitgestellter Endenergie. Damit kann durch die Nutzung hydrothermalen Wärmevorkommen hier zwischen 35 und 40 % der eingesetzten fossilen und nuklearen Primärenergie eingespart werden.

- Die geothermische Heizzentrale stellt während ihrer technischen Lebensdauer etwa 12mal mehr Primärenergie bereit, als für die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung ohne Berücksichtigung der Brennstoffenergie aufgewendet wurde.
- Innerhalb von etwa 3 Monaten sind sämtliche notwendigen Primärenergieaufwendungen energetisch ausgeglichen; die Anlage hat sich dann energetisch amortisiert.
- Im Vergleich zu einer Wärmebereitstellung aus leichtem Heizöl zeigt sich, daß die untersuchte Heizzentrale nur die Hälfte an Kohlendioxid freisetzt. Werden zusätzlich die anderen relevanten klimawirksamen Spurengase (N_2O und CH_4) berücksichtigt, wird deutlich, daß auch das Global Warming Potential um rund 50 % reduziert werden kann. Die höheren Stofffreisetzungen infolge der - im Vergleich zu einem fossil gefeuerten Heizwerk - aufwendigeren Errichtung der Geothermieanlage sind bereits nach etwa 5 Monaten ausgeglichen.
- Die durch die Errichtung und die Entsorgung sowie durch die vorgelagerten Ketten (z. B. Stahlerzeugung, Dieselölbereitstellung) verursachten Stofffreisetzungen sind - verglichen mit den beim Betrieb abgegebenen Emissionen - nur von untergeordneter Bedeutung. Beispielsweise resultieren nur rund 15 % der CO_2 -Äquivalente bzw. 11 % der CO_2 -Emissionen bei der geothermischen Heizzentrale aus diesen vorgelagerten Prozessen.
- Auch die energiebedingten Freisetzungen an human- und ökotoxischen Stoffen können durch eine Wärmebereitstellung aus hydrothermalen Wärmevorkommen als Ersatz für eine Energiebereitstellung aus fossilen Brennstoffen deutlich reduziert werden.

Weitergehender Forschungsbedarf ist noch hinsichtlich einer besseren Analyse im Bereich der vor- und nachgelagerten Prozeßketten gegeben. Speziell die Ermittlung spezifischer Primärenergieaufwendungen und Stofffreisetzungen für die Bereitstellung einzelner Baustoffe (z. B. Stahl, Zement) würde zu genaueren Ergebnissen führen. Da die Errichtung und Auslegung von Geothermieanlagen sowohl von geologischen Parametern als auch von der Energieabnehmerstruktur stark abhängig ist, wäre für die Gewinnung allgemeingültiger Aussagen die Bilanzierung weiterer Anlagen dringend notwendig.

8 Literatur

- Baupläne der Heizzentrale Riehen*, Interne Unterlagen Gruneko AG, Basel, 1992-93.
- Bußmann, W., *Riehen: Geothermie im Wärmeverbund*, Geothermische Energie, Heft 9, Seite 8 ff., 1994.
- DIN-Norm 2448, *Nahtlose Stahlrohre mit glatten Enden*.
- Fritsche, U. R., J. Leuchtner, F. C. Matthes, L. Rausch und K.-H. Simon (Hrsg.), Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), ISBN 3-89274-120-4, Wiesbaden, 1995.
- Gehring, *Mündliche Information*, Gesellschaft für Stahlbetonbewehrung e.V., München, 1995.
- Geothermische Tiefbohrungen Riehen 1 und 2*, Geologischer und technischer Bericht, Baudepartement Basel-Stadt, Riehen, 1989.
- Huser, M., *Mündliche Information*, Gruneko AG, Basel, 1995.
- Huser, M., Informationsblatt der Firma Gruneko Basel, *Technische Beschreibung Wärmeverbund Riehen*, Basel, 1994.
- Informationsblatt der Firma Gruneko AG, *Anlage- und Funktionsbeschreibung Heizzentrale Riehen*; Basel, 1994.
- Informationsblatt Gemeinde Riehen, "Wärmeverbund mit Geothermienutzung", Riehen, 1994.
- Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.), Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995.
- Kaltschmitt, M. und G. A. Reinhardt, (Hrsg.), Ganzheitliche ökologische Bilanzierung nachwachsender Energieträger; Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1996.
- Kaltschmitt, M. und G. Reinhardt, *Zur energetischen Bilanzierung von Bioenergieträgern*, VDI-Tagung "Kumulierter Energieaufwand", Würzburg, November 1995.
- Kampel, J., *Mündliche Information*, Architektin, Holbeinstr. 11; 12205 Berlin, 1995.
- Konrad, *Mündliche Information*, Firma Wirth GmbH, Erkelenz, 1995.
- Lambrecht, U. und A. Patyk, Ganzheitliche Bilanzierung von nachwachsenden Energieträgern unter verschiedenen ökologischen Aspekten, Projektgemeinschaft Bioenergieträger, 1996.
- Mayerhofer, P. et al., *Externe Kosten der Energieversorgung*, 2. Zwischenbericht zum Forschungsbereich II; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, Oktober 1992.
- Ökoinventare für Energiesysteme, Laboratorium für Energiesysteme; Erste Technische Hochschule Zürich, 1995.
- Pilitz, H., S. Härig und W. Schulz, Technologie der Baustoffe, 6. Auflage, Dr. Lüdecke-Verlagsgesellschaft mbH, Haslach i. K.
- Polte, M., *Schriftliche Information*, Firma Bohr-Knecht, Crailsheim, 1995.
- Stephan, W., *Mündliche Information*, TAU-Tankanlagenbau, Berlin, 1995.
- The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC*, Radiative Forcing of Climate Change, Summary for Policy Makers, Cambridge, 1994.

UBA-Texte 23/95, Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen. Wirkungsbilanz und Bewertung, Juli 1995.

VDI 2067, Blatt 1, Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie "VDI 4600", Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden; Entwurf vom Mai 1995; Beuth Verlag, Berlin, 1995.

Wiese, A. et al., *Ganzheitliche Bilanzierung von Stromerzeugungssystemen*, Tagungsband, Jahrestagung Fachverband für Strahlenschutz, Wolfenbüttel, 25.- 26. 9., 1995.

Wolff, H., *Mündliche Information*, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Berlin, 1996.