

Schlussbericht März 2005

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Wärme

Vorstudie und Arbeitsprogramm

ausgearbeitet durch

Rudolf Minder
Minder Energy Consulting
Ruchweid 22
CH-8917 Oberlunkhofen

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Wärme

Vorstudie und Arbeitsprogramm

Inhalt

Abstract.....	3
1. Einleitung.....	4
1.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	5
1.2 Methodik	6
1.3 Abgrenzung.....	6
2. Systematik der Umwandlungsprozesse	10
2.1 Klassifizierung der Prozesstypen.....	10
2.2 Festkörperphysikalische Prozesse (solid state conversion processes).....	10
2.3 Thermodynamische Prozesse	12
2.3.1 Organic Rankine-Cycle (ORC).....	12
2.3.2 Kalina-Cycle	15
2.3.3 Weitere Umwandlungsprozesse	16
3. Auswahl der relevanten Prozesse.....	17
3.1 Kurz- und mittelfristig verfügbare Prozesse	17
3.2 Wichtigste Konzepte zur Nutzung der geothermischen Wärme	18
3.3 Langfristig relevante Prozesse	18
4. Folgerungen und Empfehlungen.....	20
4.1 Kurz- und mittelfristig verfügbare Prozesse	20
4.2 Langfristig relevante Prozesse	21
Referenzen	22
Anhang: Ausgewählte Konzepte für die Nutzung geothermischer Energie	

8. März 2005

Rudolf Minder

Minder Energy Consulting, CH-8917 Oberlunkhofen

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Wärme

Vorstudie und Arbeitsprogramm

Abstract

Die bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der tiefen Geothermie konzentrierten sich primär auf die Ressource und deren Erschliessung. Fragen der Umwandlung und Nutzung der gewonnenen geothermischen Wärme wurden in geringerem Umfang behandelt, mit der Begründung, dass die Verfahren zur Stromerzeugung aus Wärme im Prinzip bekannt sind, da sie bereits seit Jahren in geothermischen Kraftwerken sowie auch anderen Anlagen eingesetzt werden.

Die Arbeiten in Zusammenhang mit den Schweizer EGS-Aktivitäten haben gezeigt, dass zur Optimierung einer Anlage die gegenseitige Abstimmung von Ressource und Energieumwandlungsanlage von grosser Bedeutung ist. Aus diesem Grund sollen die geothermie-spezifischen Fragen der Energiekonversion in einem neuen Forschungsprogramm näher untersucht werden.

Das Projekt verfolgt folgende Hauptziele: (i) Übersicht über die verschiedenen Umwandlungsprozesse, (ii) Vertiefte Behandlung kurz- und mittelfristig einsetzbarer Technologien mit besonderem Interesse für Projekte in der Schweiz, (iii) Koordination und Informationsaustausch im In- und Ausland und (iv) Identifikation wichtiger F+E-Bedürfnisse.

In einer ersten Phase werden die verfügbaren Prozesse systematisch erfasst sowie anhand eines Kriterienkatalogs beurteilt. Neben den im Zentrum stehenden thermodynamischen Zyklen werden auch festkörperphysikalische Prozesse kurz beleuchtet. Die Resultate werden anschliessend an einem Workshop mit Experten diskutiert. Als Ergebnis der ersten Phase werden Forschungsziele definiert und ein Arbeitsprogramm für die nächsten Phasen entwickelt.

1. Einleitung

Die bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der tiefen Geothermie konzentrierten sich primär auf Fragestellungen, welche die Ressource und deren Erschließung betreffen, d.h. vor allem Probleme der Geologie, der Bohrtechnik, Reservoir-Engineering und ähnliches. Fragen der Umwandlung und Nutzung der gewonnenen geothermischen Wärme wurden zwar auch behandelt, jedoch in vergleichsweise geringem Umfang. Die Begründung dafür war, dass die Verfahren zur Stromerzeugung aus Wärme niedriger bis mittlerer Temperatur im Prinzip bekannt sind, da sie bereits seit Jahren in geothermischen Kraftwerken sowie auch anderen Anlagen, z.B. für die Nutzung von Industrie-Abwärme oder Biomasse eingesetzt werden.

Die genauere Betrachtung der Situation zeigt jedoch, dass die Nutzung der geothermischen Wärme verschiedene Besonderheiten aufweist, die einen grossen Einfluss auf die Systemwahl haben können. Die wichtigsten Aspekte diesbezüglich sind:

1. Starke Sensitivität der Erschliessungskosten bezüglich der Nutzungstemperatur. Die Bohrlochkosten nehmen überproportional zur Bohrtiefe (und damit zur Reservoirtemperatur) zu.
2. Die Nutzungstemperatur nimmt über die Lebensdauer eines geothermischen Systems ab.
3. Der Druckverlust im Primärkreislauf und somit die Leistung der Zirkulationspumpen sind erheblich. Dies begrenzt den Massendurchsatz und damit die entnehmbare thermische Leistung.
4. Die Reinjektionstemperatur ist gegen unten begrenzt, was ebenfalls die entnehmbare thermische Leistung limitiert.
5. Die Wasserverluste im Primärkreislauf können die Gesamteffizienz des Systems ebenfalls stark beeinflussen.

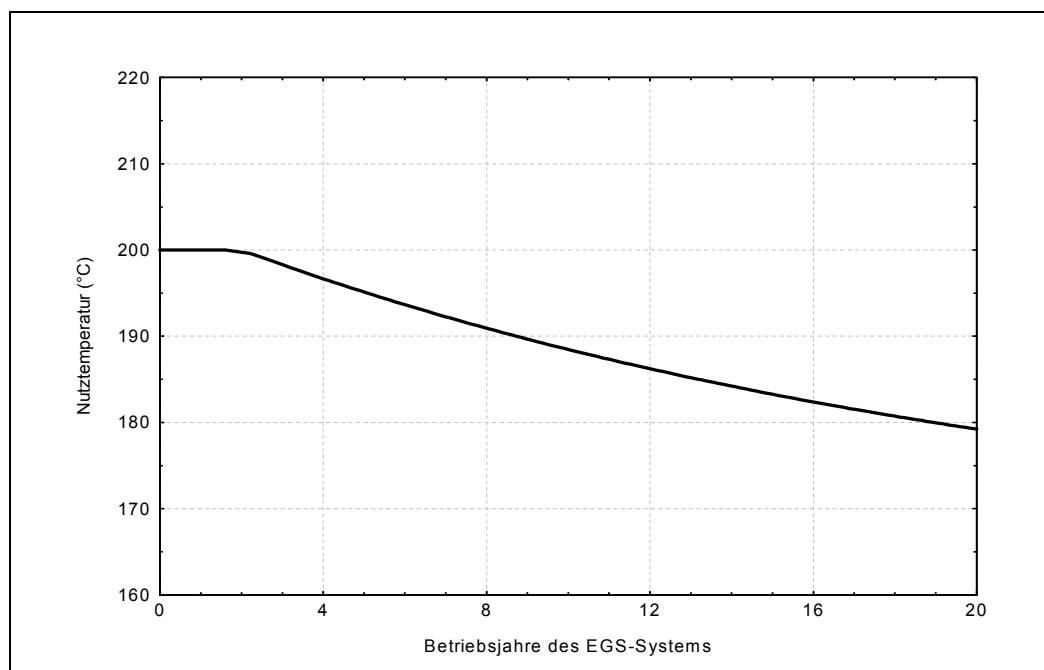


Bild 1: Hypothetischer langfristiger Temperaturverlauf einer EGS-Anlage

Die thermischen Eigenschaften eines EGS-Systems sind erst in einem relativ späten Projektstadium genau bekannt. Erst nach erfolgreichem Nachweis einer stabilen Zirkulation im Primärkreislauf kann die detaillierte Planung der energietechnischen Anlagen erfolgen. Auch bei nachgewiesener erfolgreicher Zirkulation bleibt die zeitliche Entwicklung der Temperatur und des Massenflusses eine langfristig unbekannte Grösse. Aus diesem Grund muss das vorgesehene Energieumwandlungssystem bezüglich dieser Parameter flexibel ausgelegt werden. Diese Flexibilität kann entweder durch die Wahl eines geeigneten Prozesses und/oder durch die Kombination mit einer externen, steuerbaren Wärmequelle wie z.B. einer Gasturbine erzielt werden.

Die im Rahmen dieses Projekts präsentierten Überlegungen und die vorgeschlagenen Untersuchungen müssen deshalb auch einen breiten Bereich der wesentlichen Betriebsgrössen abdecken und sind folglich als Parameterstudien vorzusehen.

Obwohl die Auslegung der oberirdischen Systeme erst in einem späten Projektstadium erfolgen kann, ist es wichtig, dass bereits bei der Planung der Reservoir-Erschliessung die wichtigsten Zusammenhänge und Sensitivitäten bekannt sind. Nur so können wirtschaftlich optimale Anlagen realisiert werden.

Es kann sich beispielsweise zeigen, dass bei einer Tiefbohrung von 5000 m eine Gesteinstemperatur von 190 °C statt der erwarteten 210°C gemessen wird. Nun muss die Frage beantwortet werden, ob eine weitere Abteufung der Bohrung ökonomisch sinnvoll ist, d.h. ob die Mehrkosten durch die zu erwartende Mehrproduktion gerechtfertigt sind.

Das vorliegende Forschungsprojekt "Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Wärme" soll mithelfen, dass EGS-Projekte von Beginn an ganzheitlich betrachtet und damit auch gesamtwirtschaftlich optimiert werden können. Parallel dazu sollen die Ergebnisse jedoch auch für die Nutzung anderer Quellen in ähnlichem Temperaturbereich – wie z.B. Abwärme oder Wärme aus Biomasse-Nutzung – verwendet werden können.

1.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Das Projekt verfolgt folgende Hauptziele:

- (1) Übersicht über die verschiedenen Umwandlungsprozesse (grundlegende Eigenschaften, Anwendungsmöglichkeiten, Stand der Technik, Perspektiven, ökologische und wirtschaftliche Aspekte...)
- (2) Vertiefte Behandlung kurz- und mittelfristig (5 Jahre) einsetzbarer Technologien mit besonderem Interesse für Projekte in der Schweiz (Schwerpunkt EGS, mit DHM Basel und GGP Genf als Fallbeispiele). Neben „reinen“ geothermischen Systemen sollen auch Hybridsysteme auf der Basis fossiler oder nachwachsender Brennstoffe vertieft untersucht werden.
- (3) Koordination und Informationsaustausch zwischen Schweizerischen Forschungsstellen und privaten Akteuren sowie internationalen Aktivitäten mit CH-Beteiligung (EU-Soultz, IEA-GIA, ...)
- (4) Identifikation wichtiger F+E-Bedürfnisse, Formulierung von Forschungszielen, Bildung von Forschungsteams

1.2 Methodik

Das Projekt gliedert sich zunächst in zwei Phasen:

(1) Vorbereitungsphase (Bestandesaufnahme, 2004/2005):

- Erarbeitung einer vorläufigen Systematik der verfügbaren Prozesse (vgl. Bild 2) sowie deren Charakterisierung. Es wird dabei zwischen Einzelprozessen und kombinierten Prozessen (Hybrid, „Booster,...“) unterschieden
- Erstellen einer „Relevanzmatrix“ für die Anwendungen unter schweizerischen Verhältnissen
- Kontakte und Fachdiskussionen mit interessierten bzw. in der einschlägigen F+E tätigen Experten. Ziele: (i) Vervollständigung der Bestandesaufnahme, (ii) Identifikation von wichtigen Fragestellungen, welche in der zweiten Phase bearbeitet werden sollen, (iii) Zusammenstellung der relevanten F+E-Ressourcen bei CH-Instituten und Firmen
- Synthese und Vorschlag für ein Arbeitsprogramm für 2005

(2) Durchführungsphase (2005/2006)

- Vergabe von Aufträgen für die ausgewählten Arbeitspakete
- Koordination der Arbeiten, Termin- und Kostenkontrolle
- Arbeitssitzungen mit den Auftragnehmern, gegenseitige Information
- Berichterstattung: Einzelberichte und Synthesebericht, Folgerungen für weitere Arbeiten

1.3 Abgrenzung

Die Arbeiten sollen primär der Nutzung geothermischer Ressourcen dienen. Die Umwandlung von Wärme niedriger und mittlerer Temperatur (100...300 °C) ist jedoch auch für weitere Energietechniken von Interesse, insbesondere Abwärmenutzung, Verbrennung von Abfällen und Biomasse, Kombination mit Umwandlungsprozessen im höheren Temperaturbereich (Gasturbine, Festoxid-Brennstoffzelle...). Ebenfalls ist die kombinierte Nutzung von Wärme (Fernwärme) und Strom zu berücksichtigen.

Leistungsmässig werden nur Systeme berücksichtigt, welche auch für grössere Anwendungen - typischerweise im MW-Bereich - in Frage kommen. Dazu gehören auch modular aufgebaute Energiekonverter, wie beispielsweise thermoelektrische Elemente.

Vom Zeithorizont her sollen in erster Priorität heute bzw. kurzfristig verfügbare Technologien untersucht werden.

Zusammengefasst ist die Abgrenzung wie folgt festgelegt:

- Leistungsbereich 100 KW_e – einige 10 MW_e
- Temperaturbereich 100°C – 300°C
- "Monovalente" Geothermie sowie auch Hybridsysteme fossil/nachwachsend, Kombination mit anderen Wärmequellen zur Wirkungsgradverbesserung
- Reine Stromproduktion sowie Wärme-Kraft-Kopplung
- Thermodynamische und nicht-thermodynamische Prozesse
- Schwerpunkt auf kurz und mittelfristig verfügbaren Prozessen

In der Schweiz hat für die Stromerzeugung die EGS-Technik (Hot Dry Rock, Hot Wet Rock) das grösste Potential, hydrothermale Quellen mit höherer Temperatur sind nur begrenzt verfügbar. In erster Priorität interessieren deshalb die Energiekonversionstechniken, welche sich für EGS-Anlagen eignen.

Die Eigenschaften von EGS-Systemen als Wärmequelle hängen wie bereits erwähnt stark von der lokalen Geologie ab und lassen sich nur grössenordnungsmässig vorhersagen. Im Rahmen der Arbeiten an den Projekten Deep Heat Mining sowie IEA Geothermal Implementing Agreement (Task III, Hot Dry Rock) wurde versucht, typische Kennwerte eines EGS-Systems unter Schweizer Verhältnissen abzuschätzen. Auf Grund dieser Arbeiten wurde die folgende Tabelle 1 erarbeitet, welche solche Kennwerte sowie die zugehörige Bandbreite enthält. Diese Werte sollen einen Anhaltspunkt über die Bedingungen liefern, unter denen ein geothermisches Kraftwerk konzipiert werden muss.

ES wird dabei von einer Konfiguration ausgegangen, wie sie in Bild 2 dargestellt ist. Das Reservoir wird durch eine Injektions- und zwei Produktionsbohrungen erschlossen. Diese Konfiguration entspricht auch derjenigen des im Bau befindlichen Projekts "Deep Heat Mining" in Basel [1].

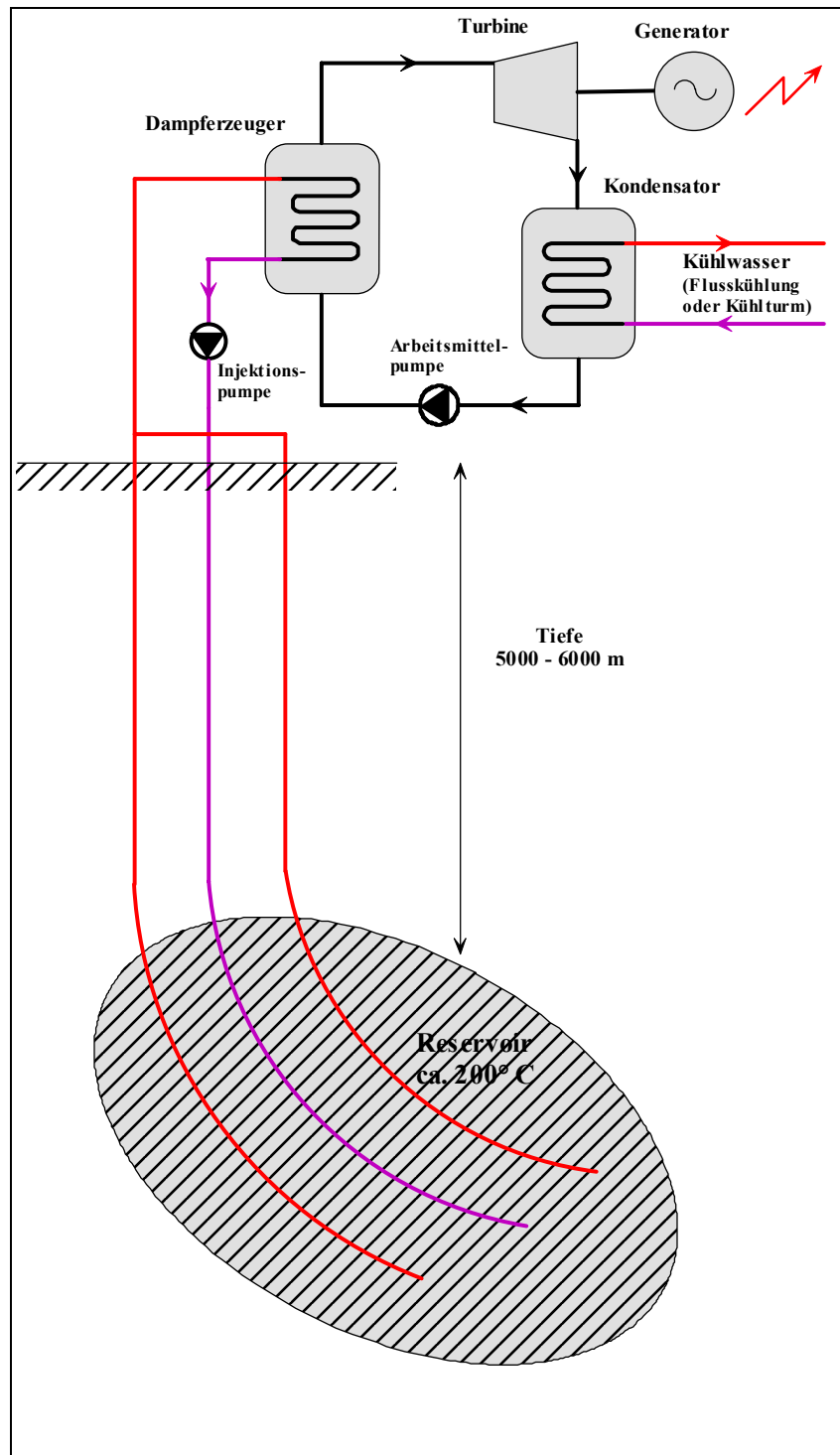


Bild 2:
Prinzip eines EGS-
Kraftwerks

		Unit	Design point	Minimum	Maximum	Remarks
1 Primary loop						
No. of boreholes injection / extraction			1 / 2			
No. of boreholes extraction			2			
mass flow injection		kg s ⁻¹	100	80	120	
water loss		kg s ⁻¹	10	0	25	
overall pressure loss		Mpa	10	5	20	Including thermosyphon gain (Soulitz: 20 MPa, decreasing)
Temperature at extraction		°C	200	170	230	
Temperature at injection (electr. prod.)		°C	120	100	150	after mixing with fresh water
Temperature at injection (heat prod.)		°C	100	90	120	after mixing with fresh water
Injection pump efficiency		%	0.75	0.65	0.85	
Injection pump input power		kW	1333			
Extracted thermal power (electr. prod.)		kW	30146			
Extracted thermal power (heat. prod.)		kW	37683			
2 Power conversion unit (PCU)						
Turbine inlet temperature		°C	185	160	210	
Condenser temperature		°C	25	20	35	
Cooling water inlet temperature		°C	15	10	32	
Cooling water outlet temperature		°C	20	15	35	legal restrictions, use of pre-mixing (Vorfluter)?
Cooling water mass flow		kg s ⁻¹	1000	800	1500	
PCU gross output		kW	4500	3000	6000	
PCU net output		kW	3000	1800	4500	including PCU aux. power and injection pumps
Waste heat thermal power		kW	20935			
No. of full operation hours/year		h	3000	2500	4000	Summer production only
Net electricity production/year		MW/h	9000			Summer production only
No. of full operation hours/year		h	7000	5000	8000	All year production
Net electricity production/year		MW/h	21000			All year production
3 District heating system (DHS)						
Main heat exchanger outlet temp.		°C	170	160	180	
Main heat exchanger return temp.		°C	100	80	120	
secondary loop mass flow		kg s ⁻¹	122.14			
Thermal power injected into DHS		kW	35799			Heat use efficiency: 95 %
Electric power consumption		MW/h	6000	4000	8000	including DHS aux. power and injection pumps
No. of full operation hours/year		h	4000	3000	5000	
Net heat production/year		MW/h	143195			

calculated values

Tabelle 1: Wichtigste Parameter und Bandbreiten einer EGS-Anlage

2. Systematik der Umwandlungsprozesse

2.1 Klassifizierung der Prozesstypen

Die in die bisherige Bestandesaufnahme einbezogenen Prozesstypen sind in Bild 3 hierarchisch dargestellt. Die wichtigsten Hauptgruppen sollen im Folgenden kurz beschrieben und diskutiert werden. Die Darstellung in Bild 3 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, im weiteren sind bei den kombinierten Systemen (hybrid cycles) eine grössere Anzahl weiterer Kombinationen denkbar.

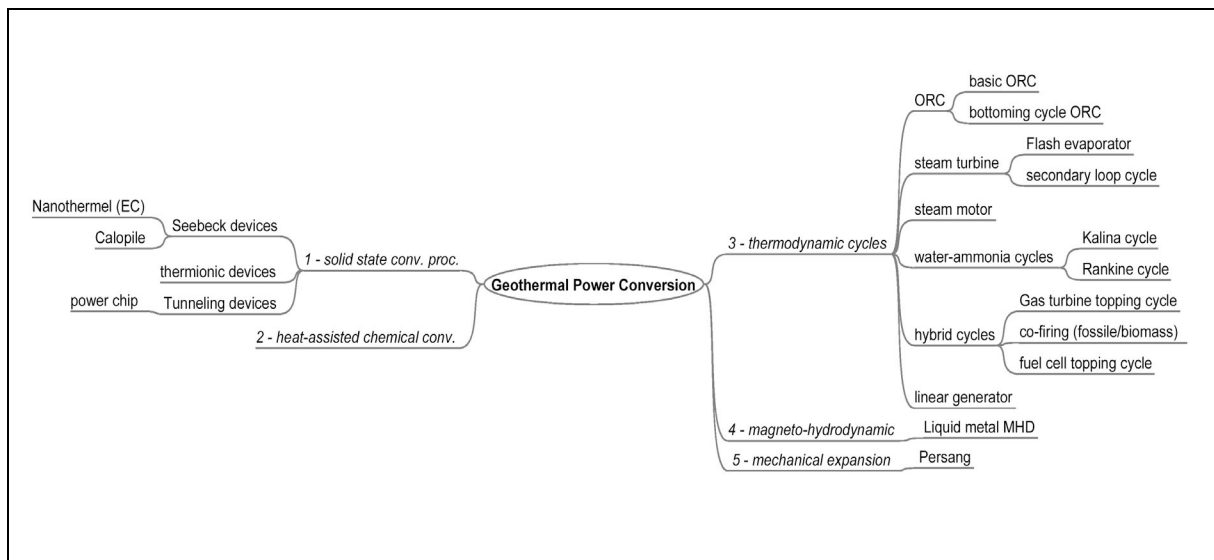


Bild 3: Klassifizierung der Prozesstypen

2.2 Festkörperphysikalische Prozesse (solid state conversion processes)

Der bekannteste Effekt in dieser Kategorie ist der thermoelektrische bzw. Seebeck-Effekt, der bisher in der Praxis vor allem für Temperaturmessungen (Thermoelemente) Anwendung fand. Das Prinzip ist in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Seebeck-Elemente zur Energiekonversion sind erst in kleinen Mengen und Leistungsbereichen verfügbar und weisen bislang noch bescheidene Wirkungsgradwerte auf. Die US-Firma Hi-Z Technology, Inc. [2] offeriert solche Elemente auf der Basis von BiTe, welche mit einer Fläche von ca. 50 cm² eine elektrische Leistung von etwa 30 Watt liefern. Dabei wird eine Temperaturdifferenz von 250 K benötigt und ein Umwandlungswirkungsgrad von etwa 4.5 % erzielt. Die Kosten pro Watt sind vergleichbar mit den Kosten von Solarzellen (3 – 5 US\$/Watt).

Bezüglich Wirkungsgrad liegen diese Elemente derzeit noch um etwa einen Faktor 4 unter den Werten thermodynamischer Systeme. Falls es gelänge, den Wirkungsgrad bei gleichen Kosten um diesen Faktor zu verbessern, wären solche Elemente auch bezüglich der spezifischen Kosten konkurrenzfähig. Ob es grundsätzlich möglich sein wird, Verbesserungen in diesem Ausmass zu erzielen, ist ungewiss und hängt davon ab, ob sich geeignete Materialien finden lassen, bei denen gleichzeitig ein hoher Seebeck-Koeffizient, eine gute

elektrische und eine geringe thermische Leitfähigkeit vorhanden ist. Gewisse Hoffnungen werden z.B. auf komplexe Metalloxide und spezielle Metalllegierungen [3] gesetzt.

In der Schweiz befasst sich die Forschungsgruppe Festkörperchemie der EMPA Dübendorf mit der Synthese und Charakterisierung von potentiellen thermoelektrischen Materialien [4]. Diese Arbeiten werden ebenfalls vom BfE unterstützt.

Wie die Entwicklung der Hochtemperatur-Supraleitung gezeigt hat, sind bei komplexen Materialien (positive) Überraschungen nicht auszuschliessen, auch wenn derzeit keine theoretischen Modelle solche thermoelektrischen "Supermaterialien" voraussagen.

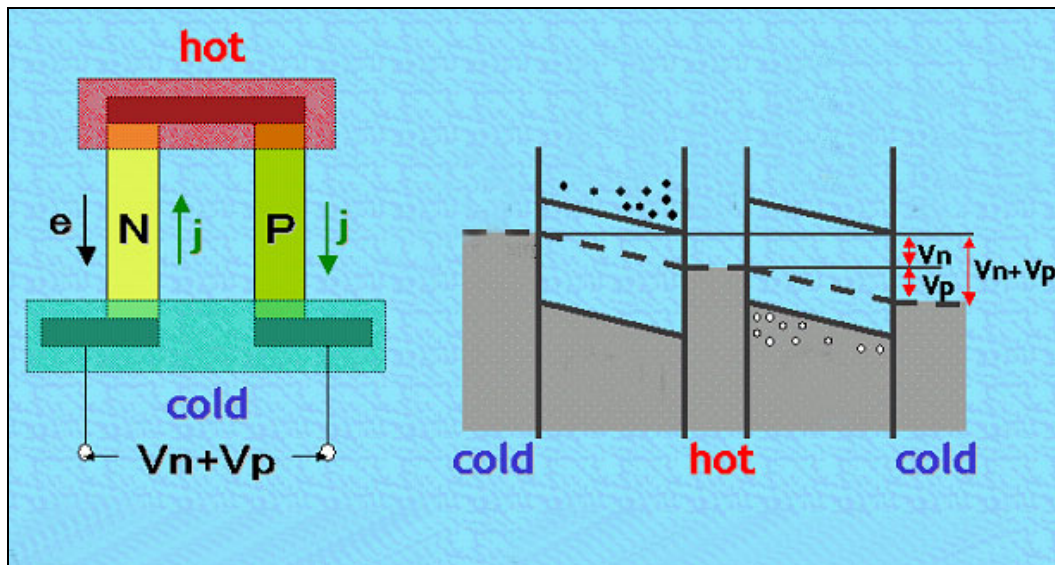
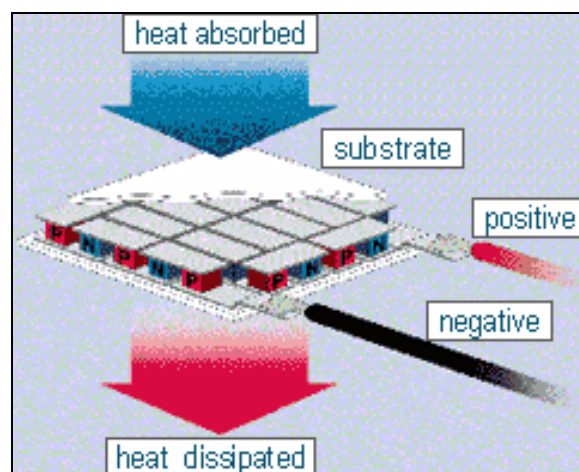


Bild 4: Prinzip der thermoelektrischen Stromerzeugung (Seebeck-Effekt). Die rechte Bildhälfte stellt ein vereinfachtes Bändermodell der links skizzierten Struktur dar.

Bild 5:

Thermoelektrisches Modul, bestehend aus einer Vielzahl elektrisch in Serie und thermisch parallel geschalteter Thermopaare



Ähnliche Probleme sind zu lösen, um den Wirkungsgrad von Peltier-Elementen zu verbessern. Auch die thermoelektrische Kühlung ist diesbezüglich den thermodynamischen Zyklen noch deutlich unterlegen, was den Anwendungsbereich dieser Technik stark begrenzt. Eine effiziente "Peltier-Wärmepumpe" für den Massenmarkt ist jedenfalls noch nicht in Sicht.

Die EU unterstützte im 5. Rahmenprogramm Forschungsarbeiten im Bereich der thermoelektrischen Konversion. Unter dem Namen NanoThermel wurde in den Jahren 2001 – 2004 ein internationales Projekt durchgeführt [5].

Eine französische Gruppe hat im Internet eine auf dem Seebeck-Effekt basierende Entwicklung mit der Bezeichnung "Calopile" vorgestellt [6]. Die dort gemachten Angaben muten äusserst optimistisch an: Bei einer Temperatur auf der heissen Seite von 372 K und auf der kalten Seite von 293 K soll der Umwandlungswirkungsgrad über 15 % betragen. Der Carnot-Wirkungsgrad bei diesen Bedingungen liegt bei ca. 20%, womit dieses Element deutlich besser als ORC-Systeme wäre. Rückfragen bei Calopile betreffend Kosten und Verfügbarkeit wurden zwar beantwortet, jedoch ohne konkrete Angaben.

Ähnlich hohe Wirkungsgrade werden von der in Gibraltar ansässigen Firma PowerChips [7] antizipiert. Die zugrundeliegende Technologie unterscheidet sich grundsätzlich von den Seebeck-Elementen. Die Thermospannung wird durch thermische Tunnelung von Ladungsträgern durch eine Vakuum-Isolationsschicht von einigen 10 Å erzeugt, was eine bessere Trennung von elektrischer und thermischer Leitung ermöglichen soll. Rückfragen ergaben, dass die Firma zunächst Elemente zur Kälteerzeugung vermarkten will ("CoolChips") und dafür bereits auf grosse "Bestellungen" verweist. Die Realisierung von Elementen mit einer 10 Å – Vakuumschicht und einer Gesamtfläche von mindestens einigen cm² dürfte eine sehr grosse technische Herausforderung darstellen. Aus diesem Grund ist nicht zu erwarten, dass diese Technologie kurzfristig zu kommerziell verfügbaren Produkten führt.

Generell kann gesagt werden, dass Konversionssysteme, welche auf festkörperphysikalischen Prozessen basieren für kurz- und mittelfristige Anwendungen in höherem Leistungsbereich nicht verfügbar sein werden. Langfristig können diese Systeme jedoch durchaus interessant sein. Arbeiten in diesem Gebiet konzentrieren sich demnach auch auf die Materialforschung und Technologie-Entwicklung.

2.3 Thermodynamische Prozesse

Die kommerzielle Erzeugung von elektrischer Energie aus Wärme basiert heute praktisch ausschliesslich auf thermodynamischen Umwandlungsprozessen. Bei optimaler Wahl des Zyklus lassen sich Wirkungsgrade erzielen, die das durch die thermodynamischen Gesetze vorgegebene theoretische Potential weitgehend ausschöpfen. Insbesondere im Bereich grösserer Leistung – ab einigen 10 MWe – werden solche Systeme auch längerfristig bezüglich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit Systeme Marktführer bleiben. Während im Bereich grosser Leistungen und hoher Temperaturen die Wasserdampf-Turbine alle Bedürfnisse abdeckt, stehen bei kleineren Leistungen und niedrigen bis mittleren Temperaturen, wie sie für geothermische Kraftwerke charakteristisch sind, neben den Wasserdampf-Turbinen eine ganze Palette von möglichen Zyklen zur Auswahl (vgl. auch [8]).

2.3.1 Organic Rankine-Cycle (ORC)

Kommerziell in grösserem Umfang eingesetzt werden vor allem ORC-Systeme, welche den Temperaturbereich von etwa 100 °C bis 250°C und den Leistungsbereich von etwa 100 kW bis etwa 20 MWe abdecken. ORC-Anlagen grösserer Leistung werden meist durch Parallelschaltung mehrerer kleinerer Module realisiert.

ORC-Systeme basieren wie der Name sagt auf einem geschlossenen Kreislauf mit einem organischen Arbeitsmittel. Dieses wird auf Grund der Temperatur der Wärmequelle sowie der Kondensationstemperatur gewählt. ORC-Anlagen werden oft auch zur Abwärmenutzung eingesetzt, sie können beispielsweise bei Diesel-Kraftwerken den Gesamtwirkungsgrad spürbar verbessern. Bei geothermischen Kraftwerken werden sie sowohl als Hauptsystem als auch als Zusatzsystem verwendet, beispielsweise zur Nutzung der Restwärme der Sole vor der Reinjektion.

Die ORC-Technik kann heute sicher als bewährte Technik bezeichnet werden, wenn es auch erst wenige Lieferanten gibt und deshalb der Wettbewerb nicht besonders gut spielt. Seit Jahren ist die amerikanisch-israelische Firma ORMAT [9] weltweit Marktführerin im ORC-Bereich. ORMAT liefert nicht nur die technischen Anlagen sondern baut, besitzt und betreibt auch selber geothermische Kraftwerke.

Bild 6 stellt das Prinzipschema eines einfachen ORC-Kreislaufs dar. Die Kombination eines Wasserdampf-Kreislaufs mit direkter Dampf-Nutzung ("flash evaporator") mit einem nachgeschalteten ORC-System ist in Bild 7 dargestellt. Dieses Prinzip ist von Interesse bei geothermischen Quellen mit höheren Temperaturen.

In Europa ist im Gebiet ORC vor allem die italienische Firma Turboden [10] bekannt, die auch in der Schweiz zwei Anlagen zur Stromerzeugung aus Biomasse realisiert hat. In Altheim, Oesterreich hat Turboden eine erste Anlage zur Nutzung einer geothermischen Warmwasser-Quelle realisiert. Die Anlage ist in Bild 8 gezeigt, die Hauptdaten in Tabelle 2.

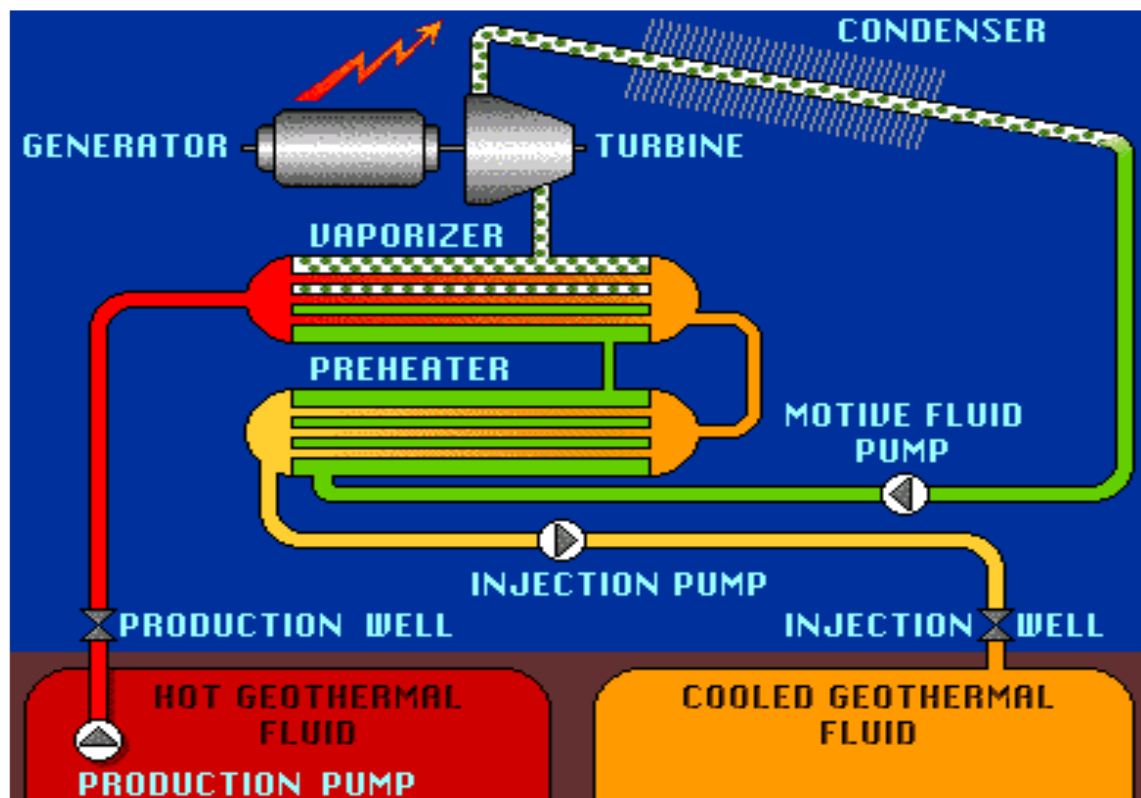


Bild 6: ORC-Kreislauf zur Produktion von Elektrizität aus geothermischer Wärme

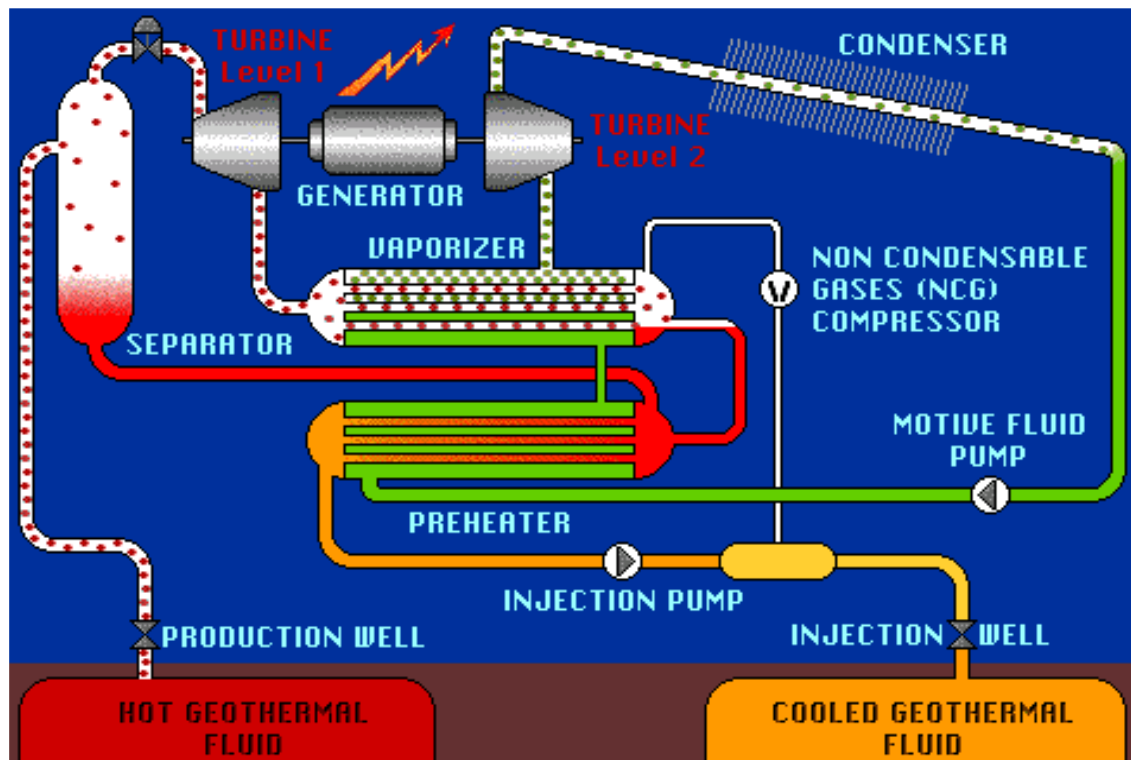


Bild 7: Kombiniertes Wasserdampf/ORC-Prozess (Bild 6 u. 7: ORMAT)



Bild 8: ORC-Turbogenerator der Geothermie-Anlage Altheim (A)

Thermal power input from geothermal water	12.4 MW _{th}
Geothermal water inlet temperature	106 °C
Geothermal water outlet temperature (about)	70 °C
Geothermal water flow rate	86 l/s
Cooling water inlet temperature	10 °C
Cooling water outlet temperature	18 °C
Cooling water flow rate (about)	340 l/s
Net electric power output (*)	1000 kW _{el}

(*) Net of the Turbogenerator internal auxiliaries, excluding the electric consumption for the geothermal fluid and the cooling water pumps.

Tabelle 2: Hauptdaten der Geothermie-Anlage Altheim (A), aus [11]

2.3.2 Kalina-Cycle

Ein weiterer thermodynamischer Kreisprozess, der in letzter Zeit vermehrt diskutiert wird, ist der sogenannte Kalina-Prozess oder Kalina-Cycle. Dabei handelt es sich um ein in den 70er Jahren vom russischen Ingenieur Alexander Kalina entwickeltes Verfahren, das auf dem Einsatz eines binären Arbeitsmediums, einer Mischung aus Wasser und Ammoniak beruht. Das Mischungsverhältnis der Medien im Kreislauf kann beliebig verändert werden, was einen weiteren Freiheitsgrad in der Anpassung an die Wärmequelle bedeutet. Im Gegensatz zu reinen Arbeitsmedien wie z. B. Wasser oder Pentan siedet das Ammoniak-Wasser-Gemisch über einen großen Temperaturbereich bei vorgegebenem Druck.

Technisch entspricht das Verfahren einem Binärverfahren mit indirekter Nutzung der Wärmequelle, teilweise spricht man auch von einem Clausius-Rankine-Prozess. Gegenüber einem Organic-Rankine-Cycle (ORC) soll der Wirkungsgrad deutlich höher sein. Hierdurch kann schon bei geringeren Bohrtiefen ein Erdwärmekraftwerk betrieben werden. Gemäss Angaben von Siemens kann mit einer Kalina-Anlage bei einer Thermalwassermenge von 100 l/s mit einer Temperatur von 150°C ca. 4,1 MW elektrische Nettoleistung erzeugt werden.

Zur Zeit arbeiten weltweit erst wenige geothermische Kraftwerke nach diesem Prinzip, die einzige Anlage in Europa ist in Husavik, Island [12]. Die bisher vorliegenden Erfahrungsberichte erlauben es noch nicht, die Überlegenheit des Kalina-Prozesses – z.B. im Vergleich zum ORC-Prozess – klar nachzuweisen.

Das Kalina-Verfahren ist durch verschiedene Patente der kalifornischen Firma Exergy, Inc. geschützt, Siemens ist Lizenznehmerin für Europa. Eine vereinfachte Darstellung des Prozesses ist in Bild 9 gezeigt.

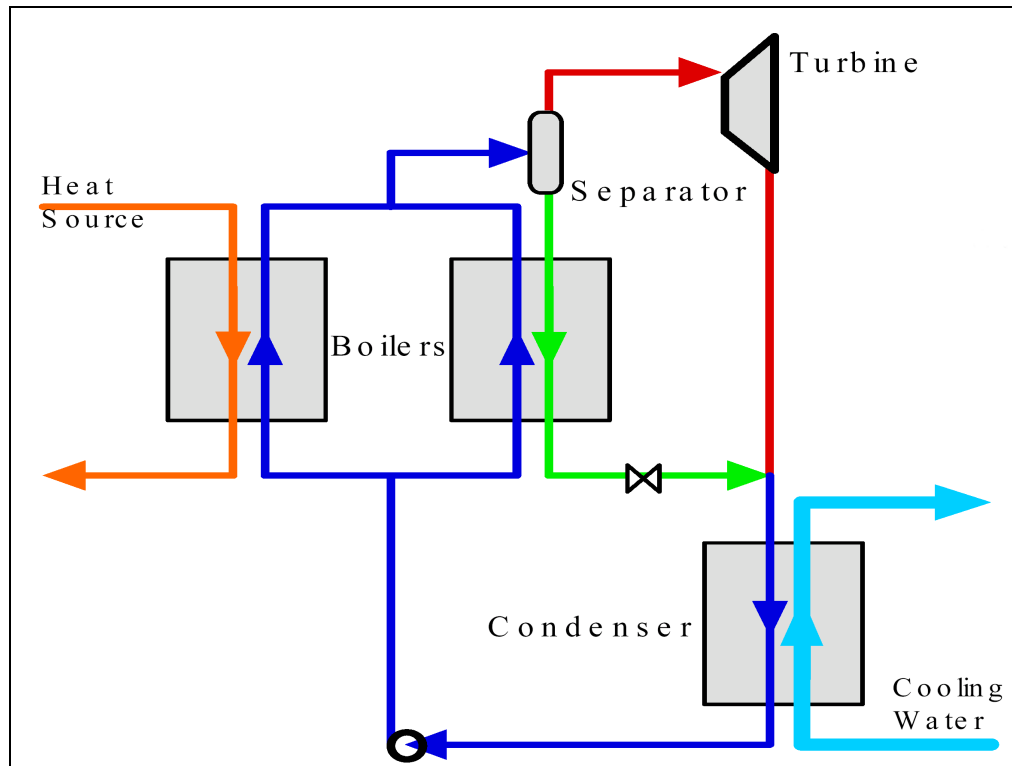


Bild 9: Prinzipschema des Kalina-Cycle KCS34g

Ein Gemisch aus Wasser und Ammoniak als Arbeitsmittel kann auch bei "klassischen" Dampfturbinen-Kreisläufen Vorteile bringen, wie eine im Rahmen des Schweizerischen Geothermie-Projekts Deep Heat Mining erarbeitete Studie der ETH Lausanne gezeigt hat [13]. Interessant ist insbesondere die Möglichkeit, das Mischungsverhältnis H_2O/NH_4 zu verändern, um damit den Kreislauf an die im Verlaufe des Betriebs abnehmende Reservoirtemperatur (vgl. Bild 1) anzupassen. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Modellrechnungen haben gezeigt, dass im Vergleich zu einem optimierten Rankine-Kreislauf mit Rekuperation der Kalina-Zyklus nur geringe Wirkungsgrad-Vorteile aufweist. Ob sich der Kalina-Prozess in den nächsten Jahren am Markt durchsetzen wird, ist im Moment noch offen. Dies wird vor Allem von weiteren Erfahrungen mit Pilotanlagen abhängen.

2.3.3 Weitere Umwandlungsprozesse

Die weiteren in Bild 3 dargestellten Prozesse

- 2 - heat-assisted chemical conversion
4 - magneto-hydrodynamic generator
5 - mechanical expansion

können im Rahmen dieser Vorstudie nicht näher beschrieben werden, sie werden jedoch in der nachfolgenden Übersichtstabelle – soweit darüber Informationen verfügbar sind – aufgeführt. Dies gilt ebenfalls für einzelne Untergruppen wie z.B. den thermionischen Generator oder den Lineargenerator. Falls sich im Verlauf der detaillierten Untersuchungen zeigt, dass gewisse Prozesse von besonderem Interesse sind, können sie später in die Liste der prioritär zu behandelnden Verfahren aufgenommen werden.

3. Auswahl der relevanten Prozesse

3.1 Kurz- und mittelfristig verfügbare Prozesse

Die Auswahl der für kurz- und mittelfristige Anwendungen wichtigsten Prozesse basiert auf folgenden Fragestellungen:

- a) Welche Geothermie-Projekte mit Stromerzeugung können in diesem Zeitraum in der Schweiz realisiert werden?
- b) In welcher Größenordnung liegen die Hauptparameter der nutzbaren geothermischen Quellen?

Wie bereits erwähnt hat die EGS-Technik sicher das für die Schweiz interessanteste Potential für die geothermische Stromerzeugung. Damit ist auch der Bereich der Hauptparameter – wie in Tabelle 1 dargestellt – vorgegeben. Im weiteren liegen in diesem Anwendungsgebiet bereits konkrete Projekte vor – DHM Basel und GGP Genève – die von den Resultaten der Untersuchungen profitieren können.

Die zu untersuchenden Fragen teilen sich auf in F&E-orientierte Fragen sowie in anwendungsorientierte Fragen. Zu den ersten gehören beispielsweise die Optimierung von Kreisprozessen oder die Untersuchung neuer Arbeitsmittel, welche für den definierten Leistungs- und Temperaturbereich in Frage kommen. Bei den anwendungsorientierten Fragen geht es beispielsweise um die Schaltungstechnik und die Auslegung von kombinierten Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung.

Ausgehend von der in Bild 3 gezeigten Übersicht sowie unter der Annahme dass die EGS-Technik für die Schweiz von primärem Interesse ist wurden die verschiedenen Umwandlungsprozesse bezüglich kurz-, mittel- und langfristiger Bedeutung charakterisiert und in einer Relevanzmatrix – Tabelle 3 – dargestellt. Diese Tabelle bildet die Grundlage für die Definition weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet der Umwandlung geothermischer Wärme in Elektrizität.

Die Prozesse mit der höchsten Relevanz bezüglich kurz- und mittelfristiger Anwendung sind thermodynamische Kreisläufe mit Wasser, organischen Verbindungen oder Gemischen als Arbeitsmedien sowie Turbinen als Maschinen. Besonders aufgeführt sind die hybriden Prozesse, bei denen neben der geothermischen Wärme auch Fremdenergie eingesetzt wird. Solche Hybridsysteme basieren teilweise auf denselben Kreisläufen wie die "reinen" geothermischen Anlagen, sie arbeiten jedoch unter anderen Betriebsbedingungen.

3.2 Wichtigste Konzepte zur Nutzung der geothermischen Wärme

Bei der Konzipierung einer geothermischen Anlage geht es darum, für einen definierten Verbraucher bzw. eine Verbrauchergruppe Elektrizität und/oder Wärme aus einer geothermischen Quelle möglichst effizient zu gewinnen. Dabei kann – in beschränktem Rahmen – die Quelle an den Verbraucher angepasst werden, beispielsweise durch die Bohrtiefe (Temperatur), Anzahl und Durchmesser der Bohrungen (Wassermenge). Auch betrieblich kann eine Anpassung erfolgen, z.B. durch die Variation der Pumpleistung.

Im Allgemeinen wird man jedoch aus wirtschaftlichen Gründen die geothermische Quelle möglichst gut ausnützen wollen, d.h. man wird einen Bandbezug an Wärme anstreben. Der Ausgleich zwischen dem konstanten Angebot und dem (saisonal und tageszeitlich) schwankenden Bedarf muss dann durch das Management der Lasten und steuerbarer Erzeugungsanlagen erfolgen.

Im Elektrizitätsbereich ist dies in der Schweiz auch längerfristig kein Problem, da bereits jetzt mit den ebenfalls Bandenergie produzierenden Kernkraftwerken mehrere GW installierter Leistung vorhanden sind und der Ausgleich mit den Speicherwerken und dem internationalen Handel erfolgen kann.

Bei der Wärmenutzung ist die Situation schwieriger, da die Wärme lokal verwendet werden muss und sehr grosse saisonale Bedarfsunterschiede bestehen. Anlagen, welche sowohl Elektrizität als auch Wärme produzieren, müssen folglich flexibel ausgelegt sein, sodass z.B. im Winter vorwiegend Wärme und im Sommer nur Strom produziert wird.

Im Anhang werden einige wichtige Konzepte mit den zugehörigen Prinzipschemas aufgelistet.

3.3 Langfristig relevante Prozesse

Wie in Tabelle 3 dargestellt werden zwei Gruppen der festkörperphysikalischen Prozesse als langfristig relevant beurteilt: "Seebeck devices" und "tunneling devices". Wie bereits erwähnt ist es schwierig, die Erfolgschancen dieser und ähnlicher Verfahren heute abzuschätzen. Auch sind die bisher erzielten Konversions-Wirkungsgrade noch weit von den mit thermodynamischen Maschinen erreichbaren Werten entfernt. Auf der andern Seite hätten solche Elemente eine Reihe grundlegender Vorteile, insbesondere

- Keine beweglichen Teile: hohe Lebensdauer und geringer Unterhalt
- Keine Arbeitsmedien mit toxischen und/oder ökologisch problematischen Eigenschaften
- Modularer Aufbau, d.h. fast beliebiger Leistungsbereich
- Breites Anwendungsspektrum: von der Haustechnik bis zu Grossanlagen, für Stromerzeugung und Kälteerzeugung/Wärmepumpen

Die festkörperphysikalischen Prozesse weisen somit ein grosses Marktpotentials auf, falls es gelingt, effiziente Elemente zu entwickeln und wirtschaftlich herzustellen.

	Entwicklungs- stand	Temperatur- bereich	Leistungs- bereich	Wirkungsgrad (% v. Carnot)	Relevanz kurzfristig	Relevanz mittelfristig	Relevanz langfristig
1 - solid state conv. proc.							
Seebeck devices					3	2	1
Nanothermel (EC)	F&E	?	W	?			
Calopile	F&E	< 300°C	W	75			
Hi-Z	Kommerziell	< 300°C	W	25			
thermionic devices	F&E	> 1000°C	W	?	3	3	2
Tunneling devices					3	3	1
power chip	F&E	< 300°C	W	75			
2 - heat-assisted chemical conv.		> 300°C	kW	?	3	3	2
3 - thermodynamic cycles							
ORC					1	1	2
basic ORC	Kommerziell	80 - 300°C	kW	> 50			
bottoming cycle ORC	Kommerziell	80 - 200°C	kW	> 50			
steam turbine					1	1	2
Flash evaporator	Kommerziell	< 500°C	MW	75			
secondary loop cycle	Kommerziell	< 500°C	MW	75			
steam motor	Kommerziell	150 - 300°C	kW	< 50	3	3	3
water-ammonia cycles					1	1	2
Kalina cycle	Pilot	100 - 300°C	MW	75			
Rankine cycle	Pilot	100 - 300°C	MW	75			
hybrid cycles					1	1	1
Gas turbine topping cycle	Kommerziell		MW	> 75			
co-firing (fossile/biomass)	Kommerziell		MW	75			
fuel cell topping cycle	F&E		kW	> 75			
linear generator		80 - 200°C	kW	?	3	3	3
4 - magneto-hydrodynamic							
Liquid metal MHD	F&E	> 300°C	kW	?	3	3	3
5 - mechanical expansion					3	3	3
Persang	F&E	?	kW	?			

Tabelle 3: Relevanzmatrix für die verschiedenen Umwandlungsprozesse

4. Folgerungen und Empfehlungen

4.1 Kurz- und mittelfristig verfügbare Prozesse

Wie in Tabelle 3 dargestellt sind die Prozesse mit der höchsten Relevanz bezüglich kurz- und mittelfristiger Anwendung thermodynamische Kreisläufe. Turbinen, welche organische Verbindungen, Gemische oder auch Wasser als Arbeitsmedien verwenden eignen sich für die Konversion von geothermischer Wärme in Elektrizität am besten. Je nach Situation können solche Kreisprozesse in komplexere Systeme integriert werden, beispielsweise in Hybridanlagen, bei denen neben der geothermischen Wärme auch Fremdenergie eingesetzt wird oder in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, falls neben der Stromproduktion auch ein Wärmebedarf besteht.

Obwohl die genannten Kreisprozesse im Prinzip seit langer Zeit bekannt sind und auch eingesetzt werden, bedeutet dies nicht, dass für geothermische Anwendungen optimale Lösungen verfügbar sind. Die Charakteristika der geothermischen Quellen – wie in Kap. 1 aufgeführt – unterscheiden sich von fossil erzeugter Wärme deutlich. Um ein mit hohen Investitionen erschlossenes geothermisches Reservoir optimal auszunutzen, kann eine wirkungsgradmässige Optimierung der Kraftwerksanlage entscheidend für die Gesamtwirtschaftlichkeit sein. Dabei sind auch die von der Abnehmerseite her vorgegebenen Randbedingungen einzubeziehen.

Auf Grund dieser Überlegungen lassen sich Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich ableiten, welche nachfolgend stichwortartig beschrieben sind.

a. Charakterisierung der geothermischen Wärmequellen

Die in Tabelle 1 dargestellten, teilweise grob geschätzten Werte für EGS sind unter Verwendung von Daten aus andern Projekten zu überprüfen und zu ergänzen. Soweit möglich sind Zusammenhänge zwischen den aufgeführten Werten und den geologischen Eigenschaften des Reservoirgesteins zu quantifizieren.

b. Bestimmung optimaler Konversionszyklen

Ausgehend von den Quelleneigenschaften sind für verschiedene Konzepte (reine Stromerzeugung, Wärmekraftkopplung, Hybridsysteme...) die grundsätzlich geeignetsten Kreisprozesse zu identifizieren (Leistungsgrösse, Wahl des Arbeitsmittels, Aufbau des Kreislaufs, Kühlkonzept...). Vergleich der untersuchten Zyklen bei für geothermische Anwendungen typischen Bedingungen.

c. Parameterstudien

Design- und Parameterstudie für ausgewählte Systeme auf der Basis der DHM-Projekte Basel und Genf. Vergleich verschiedener Konzepte (inkl. Hybridanlagen) bezüglich Energieproduktion, Kosten und Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (CO₂-Einsparung), bezogen auf den gesamten Lebenszyklus der Anlage. Bestimmung der Sensitivitäten bezüglich kritischer Parameter, z.B. Reservoirtemperatur, Pumpenleistung/hydr. Impedanz, Wasserverlust, Degradation...

Wichtiges Ziel dieser praxisorientierten Arbeiten ist die Unterstützung der Entwickler von konkreten Projekten bezüglich der Optimierung der Reservoir-Erschliessung.

d. Teilnahme am IEA-GIA, Annex VI - Geothermal Power Generation Cycles

Die Teilnahme an diesem noch nicht implementierten Annex wäre eine effiziente Möglichkeit, die Erfahrungen und Erkenntnisse im Bereich geothermischer Konversionszyklen international auszutauschen. In [14] ist dieser Annex wie folgt beschrieben:

This proposed annex would develop scenarios as a basis for comparison of cycles, plant performance and availability, economics and environmental impact and mitigation. The output would be a database and guidelines of best practice.

A draft of this Annex has been prepared, though no further consideration was given to it in 2003. The Executive Committee agreed that it would be implemented as soon as two or more participants agreed to join.

4.2 Langfristig relevante Prozesse

Die in Tabelle 3 als langfristig relevant beurteilten Prozesse benötigen noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen bis eine kommerzielle Verwertung ins Auge gefasst werden kann. Thermoelektrische Elemente auf der Basis von festkörperphysikalischen Effekten werden wohl zuerst in Spezialanwendungen mit kleinem Leistungsbedarf eingesetzt werden, bei denen auch die spezifischen Kosten nicht kritisch sind. Um eine echte Alternative zu thermodynamischen Maschinen darzustellen, müssen vergleichbare Wirkungsgradwerte und Kosten erzielbar sein, was eine Verbesserung um – grob geschätzt – einen Faktor fünf bedeutet. Ob eine solche Verbesserung durch neue Materialien (Seebeck-Elemente) oder durch eine spezielle Technologie (z.B. Nanostrukturen mit Thermo-Tunneling) erzielt werden kann muss im Moment offen bleiben.

In Anbetracht des grossen Potentials kann die Unterstützung von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich empfohlen werden, sofern geeignete Forschungsstätten und Fachkompetenzen vorhanden sind. Zu prüfen wäre beispielsweise eine Intensivierung der Forschungsarbeiten der Gruppe Festkörperchemie an der Empa, wo derzeit ein Projekt "Solare Thermokraft" mit Unterstützung des BfE durchgeführt wird. Diese Arbeiten befassen sich mit der Synthese und Charakterisierung von potentiellen thermoelektrischen Materialien.

Forschungsarbeiten dieser Art sollten allerdings nicht an ein spezifisches Ressort wie die Geothermie gebunden sein, da das Spektrum möglicher Anwendungen sehr breit ist und die Geothermie kaum das wichtigste Marktsegment für solche Elemente darstellt.

Referenzen

- [1] <http://www.dhm.ch>, <http://geothermal.ch/downloads/vortragps.pdf>
- [2] <http://www.hi-z.com/>
- [3] Disordered zinc in Zn₄Sb₃ with phonon-glass and electron-crystal thermoelectric properties, G. Jeffrey Snyder et al., nature materials, Vol 3, July 2004
www.nature.com/naturematerials
- [4] Synthesis and Characterisation of Nanostructured Complex Cobalt Oxides as Potential Materials for Solar Thermoelectric Power Generators
R. Robert, S. Romer, A. Reller and A. Weidenkaff, Submitted to Adv. Eng. Mat., 2005
- [5] <http://www.nanothermel.org/>,
<ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/nanothermel.pdf>
- [6] <http://calopile.free.fr/calopile.html>
- [7] <http://www.powerchips.gi/index.shtml>
- [8] Cycles de conversion énergétique / Energy conversion in geothermal applications
Fachtagung 2004 der SVG/SGS, Basel, 22./23. Oktober 2004
François Maréchal, LENI, EPF-Lausanne
- [9] www.ormat.com
- [10] <http://www.turboden.it>
- [11] Low-Enthalpy Power Generation with ORC-Turbogenerator - The Altheim Project
Gerhard Pernecker, Stephan Uhlig, GHC Bulletin Vol 23, No. 1
- [12] Design and Start-up of the 2 MW Kalina Cycle® Orkuveita Húsavíkur Geothermal Power Plant in Iceland
Henry A. Mlcak, PE, Exergy, Inc., EGE 2nd Business Seminar 2001, Altheim, Austria
- [13] Modélisation et étude d'une centrale de type Deep Heat Mining pour la mise en valeur du potentiel géothermique profond en Suisse
F. Brand, D. Favrat, LENI, EPFL, Rapport pour l'association DHM, juin 1999
- [14] http://www.iea-gia.org/research_tasks.asp

Allgemeine Referenzen ohne Textverweis

Geothermische Stromerzeugung: Stand der Technik und Perspektiven
VDI-GET-Workshop, Potsdam, 17./18. Oktober 2002

Energie aus der Tiefe - Geothermische Stromerzeugung – eine Lösung für die Zukunft?
A. Bitschi, W. Gehrer, K. Fröhlich, Bulletin SEV/AES 9/04

Anhang

Ausgewählte Konzepte für die Nutzung geothermischer Energie

Inhalt

A1	Systeme mit reiner Stromerzeugung	2
A1.1	Einfacher Kreislauf	2
A1.2	Kreislauf mit Zusatzbefeuerung ("Hybridkraftwerk")	3
A1.3	Kombi-Kraftwerk mit Gasturbine.....	4
A2	Systeme mit kombinierter Wärme- und Stromerzeugung	5
A2.1	Wärme-Kraft-Koppelung (Gegendruck-Turbine).....	5
A2.2	Andere Schaltungen zur Strom- und Wärmeerzeugung	6
A2.3	Schaltungen zur reinen Wärmeerzeugung	6

Im folgenden werden einige wichtige Konzepte für die Nutzung geothermischer Energie aus EGS-Systemen dargestellt und diskutiert. Die Konzepte sind teilweise auch auf die Nutzung hydrothermaler Quellen übertragbar.

A1 Systeme mit reiner Stromerzeugung

A1.1 Einfacher Kreislauf

Bei geothermischen Kraftwerken, welche in Gebieten ohne grössere Wärmeverbraucher gebaut werden ist die Maximierung der Stromproduktion massgebend für die Wirtschaftlichkeit. Eine optimale Abstimmung des thermodynamischen Kreislaufs auf die verfügbare Wassermenge und –temperatur sowie eine möglichst tiefe Kondensationstemperatur sind für die Energieausbeute entscheidend.

Bild A1 zeigt das Konzept mit einem einfachen Kreislauf, der – je nach Temperaturverhältnissen aus einem Wasserdampf, einem ORC oder einem Rankine-Cycle mit gemischtem Arbeitsmittel bestehen kann. ORC-Systeme dieser Art sind als Standardmodule erhältlich. Nachteilig ist bei diesem Konzept, dass eine Anpassung des Kreislaufs an veränderte Quellenbedingungen und/oder an Lastprofile nur begrenzt möglich ist.

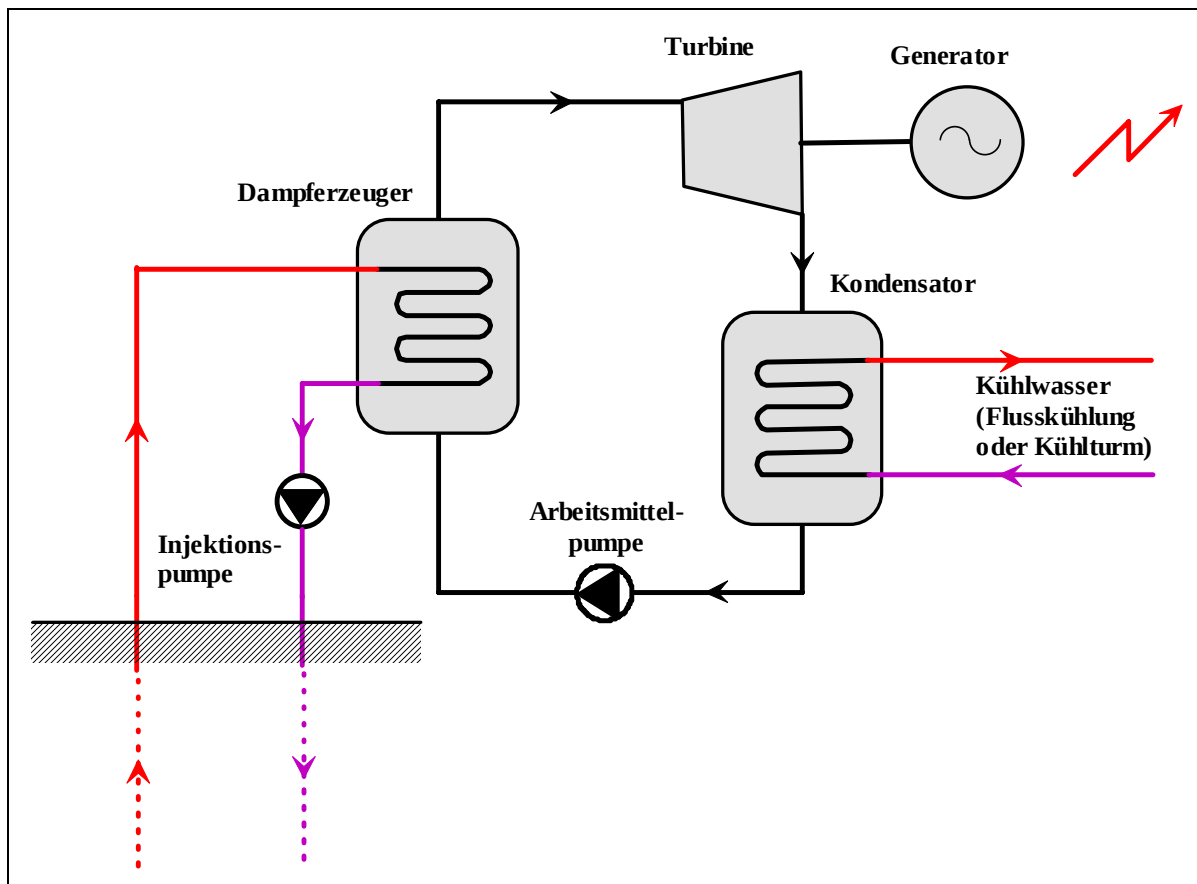


Bild A1: Einfacher Kreislauf für die reine Stromerzeugung aus geothermischen Quellen
(Anmerkung: In diesem sowie den nachfolgenden Schemas werden kreislaufinterne Elemente zur Wirkungsgradverbesserung wie Vorwärmer, "economizer" etc. weggelassen)

A1.2 Kreislauf mit Zusatzbefeuerung ("Hybridkraftwerk")

Bei diesem Konzept liefert die geothermische Quelle die Vorwärmungs- und Verdampfungsenergie, der Zusatz-Heizkessel (fossil oder mit nachwachsenden Rohstoffen befeuert) dient zur Überhitzung des Dampfs. Durch die Temperaturüberhöhung arbeitet der Kreislauf mit einem besseren Wirkungsgrad, d.h. die Brennstoffzufuhr führt auch zu einer besseren Nutzung der geothermischen Wärme. Zusätzlich kann die Zusatzheizung auch ein Absinken der Reservoirtemperatur kompensieren.

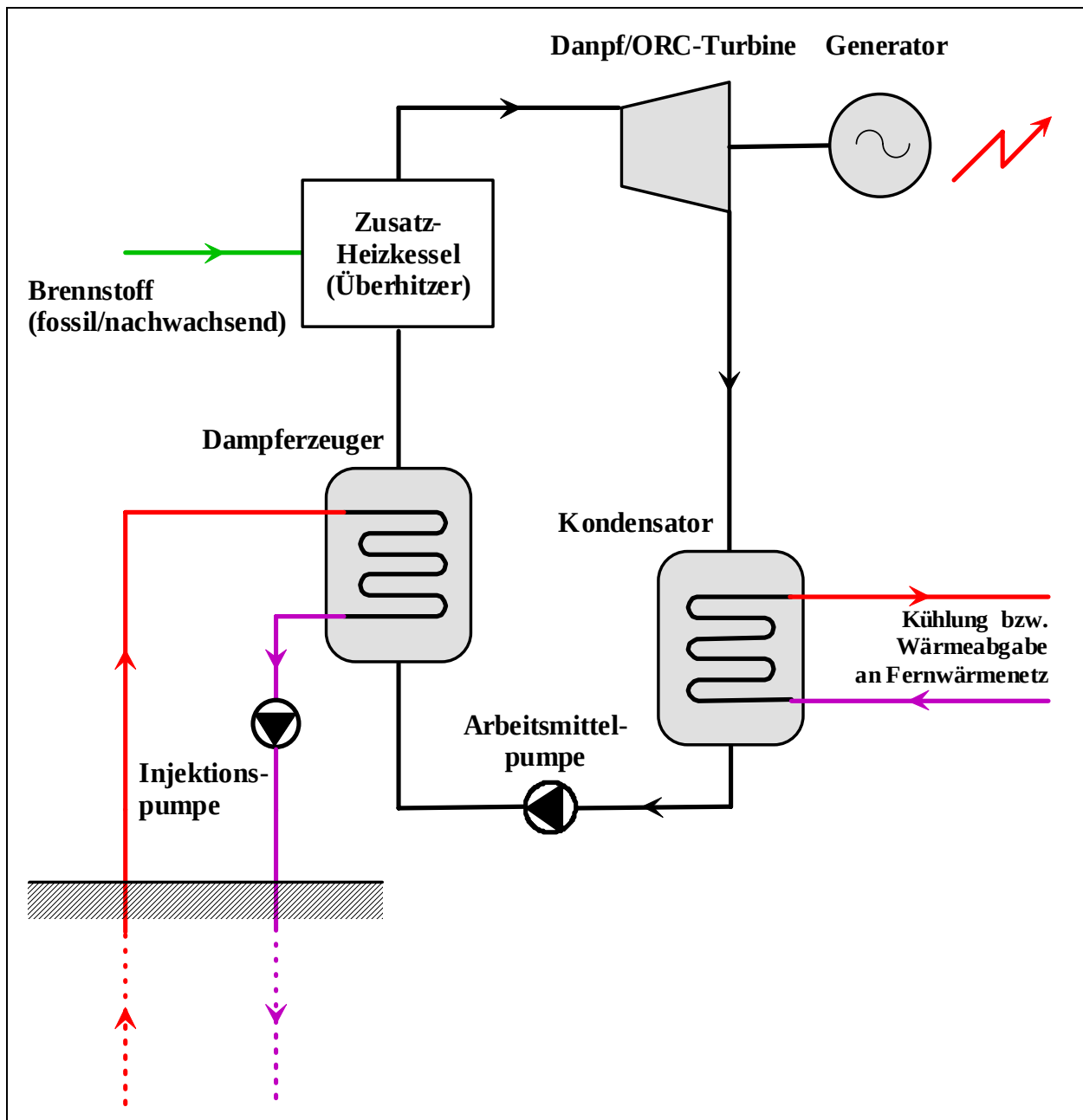


Bild A2: Hybrid-Kraftwerk

A1.3 Kombi-Kraftwerk mit Gasturbine

Grosse fossil befeuerte Kombi-Kraftwerke mit Gas- und Dampfturbinen erreichen heute Wirkungsgrade im Bereich von 60%. Ähnlich lässt sich auch ein geothermisches Kraftwerk mit einer Gasturbine als "topping cycle" ausgerüstet werden, da Gasturbinen auch im kleinen Leistungsbereich verfügbar sind. Die EGS-Anlage liefert die Vorwärmungs- und Verdampfungsenergie, die Abwärme der Gasturbine dient zur Überhitzung des Dampfs. Bei diesem Konzept kann gegenüber dem Hybridkraftwerk der Gesamtwirkungsgrad nochmals verbessert werden, insbesondere, wenn der Dampfkreislauf noch in zwei Druckstufen unterteilt wird.

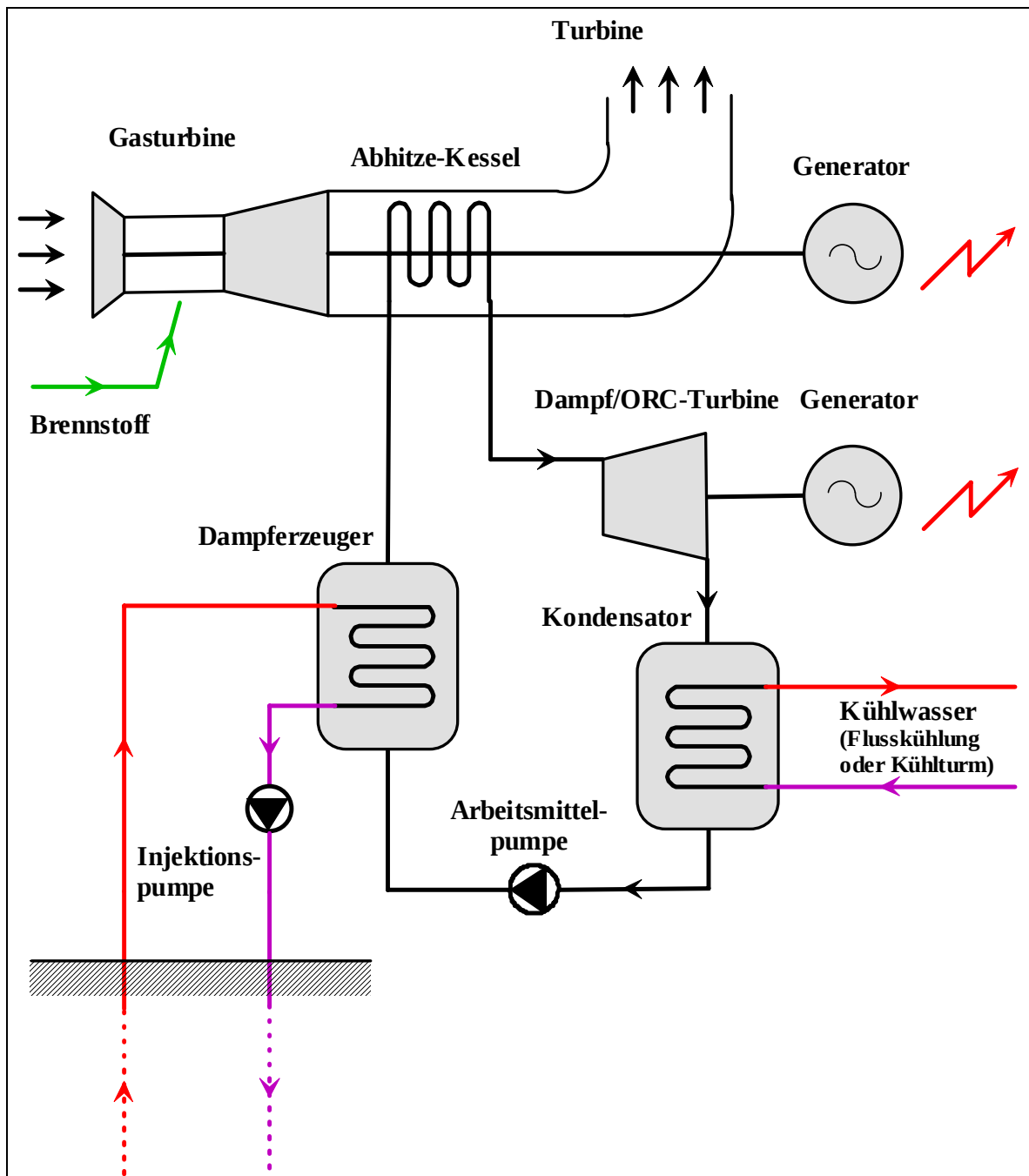


Bild A3: Kombi-Kraftwerk mit Gasturbine als topping cycle.

A2 Systeme mit kombinierter Wärme- und Stromerzeugung

Aus ökologischer Sicht ist die kombinierte Nutzung von Strom und Wärme aus geothermischen Quellen besonders vorteilhaft, insbesondere wenn damit fossile Brennstoffe eingespart werden können. Bei EGS-Anlagen bieten sich, da die Wärmeleistung im Bereich von einigen 10 MW liegt, als Wärmebezügler Fernwärmenetze an. Diese Nutzungsart ist für die beiden Pilotprojekte DHM Basel und GGP Genève vorgesehen.

A2.1 Wärme-Kraft-Koppelung (Gegendruck-Turbine)

Von der Energienutzung her ist die Wärme-Kraft-Koppelung, wie sie in Bild A4 gezeigt ist, am vorteilhaftesten, da der hochexergetische Anteil der geothermischen Wärme zur Strom- und der niederexergetische Anteil zur Wärmeerzeugung verwendet wird. Dieses Konzept lässt sich allerdings nur wirtschaftlich realisieren, wenn eine genügend grosse Temperaturdifferenz zwischen der Quellentemperatur (bzw. Turbinen-Eintrittstemperatur) und der Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes (bzw. Kondensationstemperatur) besteht.

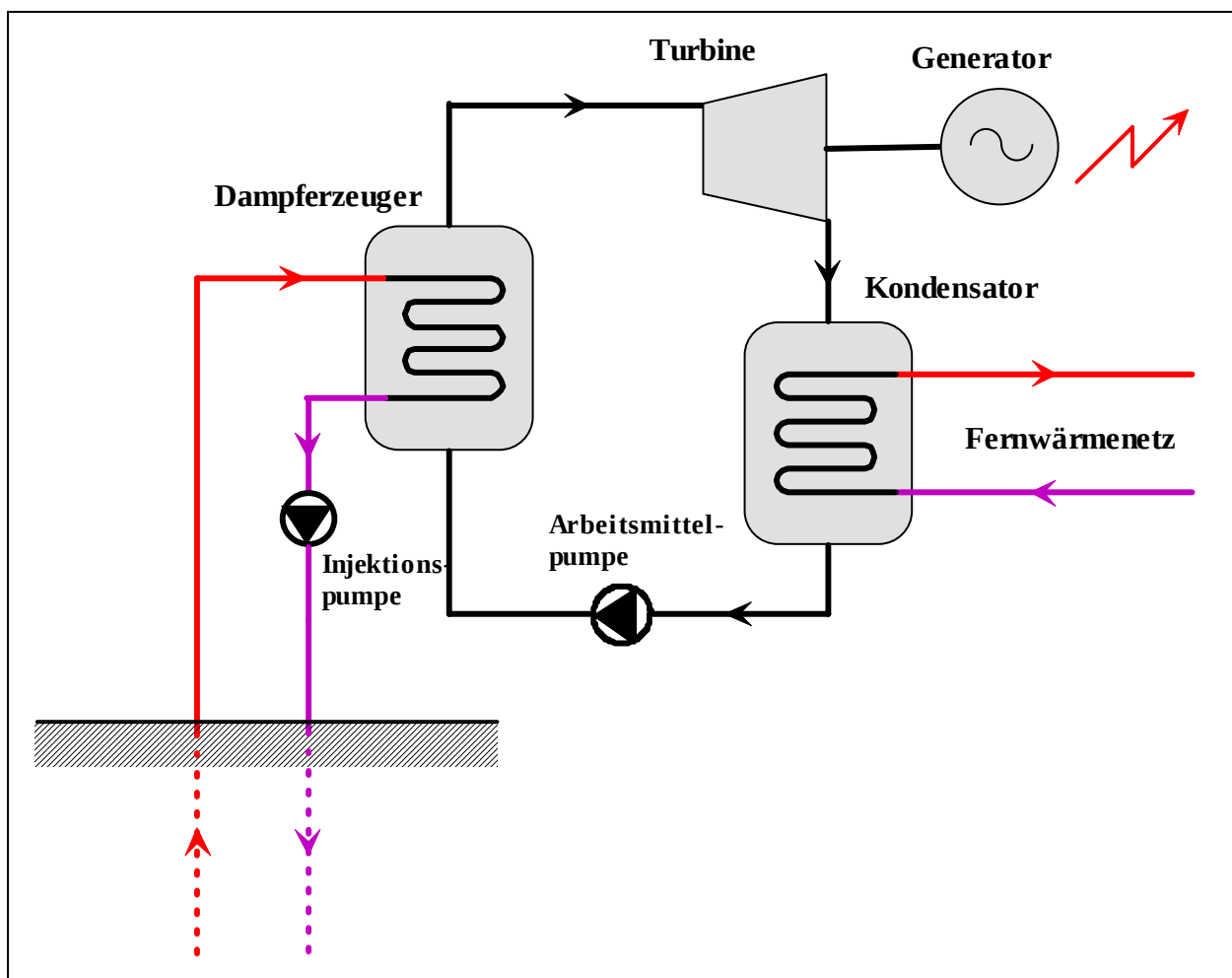


Bild A4: Geothermisches Heizkraftwerk mit Gegendruck-Turbine

A2.2 *Andere Schaltungen zur Strom- und Wärmeerzeugung*

Falls die Temperaturverhältnisse eine Wärme-Kraft-Koppelung gemäss A2.1 nicht erlauben, ist eine parallele Produktion von Strom und Wärme mit anderen Schaltungstechniken möglich. Bild A5 zeigt eine EGS-Anlage für die Erzeugung von Strom und Wärme mit Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Die beiden Verbraucher sind auf der Quellenseite in Serie geschaltet, d.h. die zusätzliche Wärmeentnahme reduziert die Temperatur des injizierten Wassers.

Eine weitere Konfiguration für die Erzeugung von Strom und Wärme mit Einspeisung in ein Fernwärmenetz ist in Bild A6 dargestellt. Die beiden Verbraucher sind auf der Quellenseite parallel geschaltet, sie können alternativ oder auch gleichzeitig mit variablem Anteil betrieben werden. Mit dieser Schaltung kann dem Wärmeverbraucher die volle Temperatur der Quelle zugeführt werden. Das Konzept ist beispielsweise interessant für Fälle bei denen der Wärmebedarf auf die Heizsaison beschränkt ist.

Da die Kondensationswärme des Kraftwerksteils bei beiden Anlagen nicht genutzt wird, ist der Gesamtwirkungsgrad dieser Konfigurationen geringer als im Fall der "echten" Wärme-Kraft-Koppelung gemäss A2.1.

A2.3 *Schaltungen zur reinen Wärmeerzeugung*

Der Vollständigkeit halber sei der Fall der reinen Wärmenutzung ebenfalls kurz diskutiert. Es ist denkbar, dass gegen Ende der Lebensdauer eines Reservoirs die Temperatur soweit abgesunken ist, dass keine Stromerzeugung mehr möglich ist. Dann kann die Restwärme des Reservoirs u.U. noch während einiger Zeit direkt genutzt werden, während das Kraftwerk von neuen Bohrungen gespeist wird.

Bild A7 zeigt eine solche Anlage für die reine Wärmeerzeugung mit direkter Einspeisung in ein Fernwärmenetz, wobei die Quellentemperatur die maximale Vorlauftemperatur des Netzes erreichen muss. In Bild A8 ist eine Anlage gezeigt, bei der der Rücklauf des Netzes vorgewärmt und anschliessend mit Hilfe eines Heizkessels auf die notwendige Vorlauftemperatur gebracht wird. Mit diesem Konzept kann auch die Wärme einer niederwertigen Quelle, deren Temperatur nur geringfügig über der Rücklauftemperatur des Verbrauchers liegt genutzt werden, wobei hier der Anteil an geothermischer Wärme begrenzt ist.

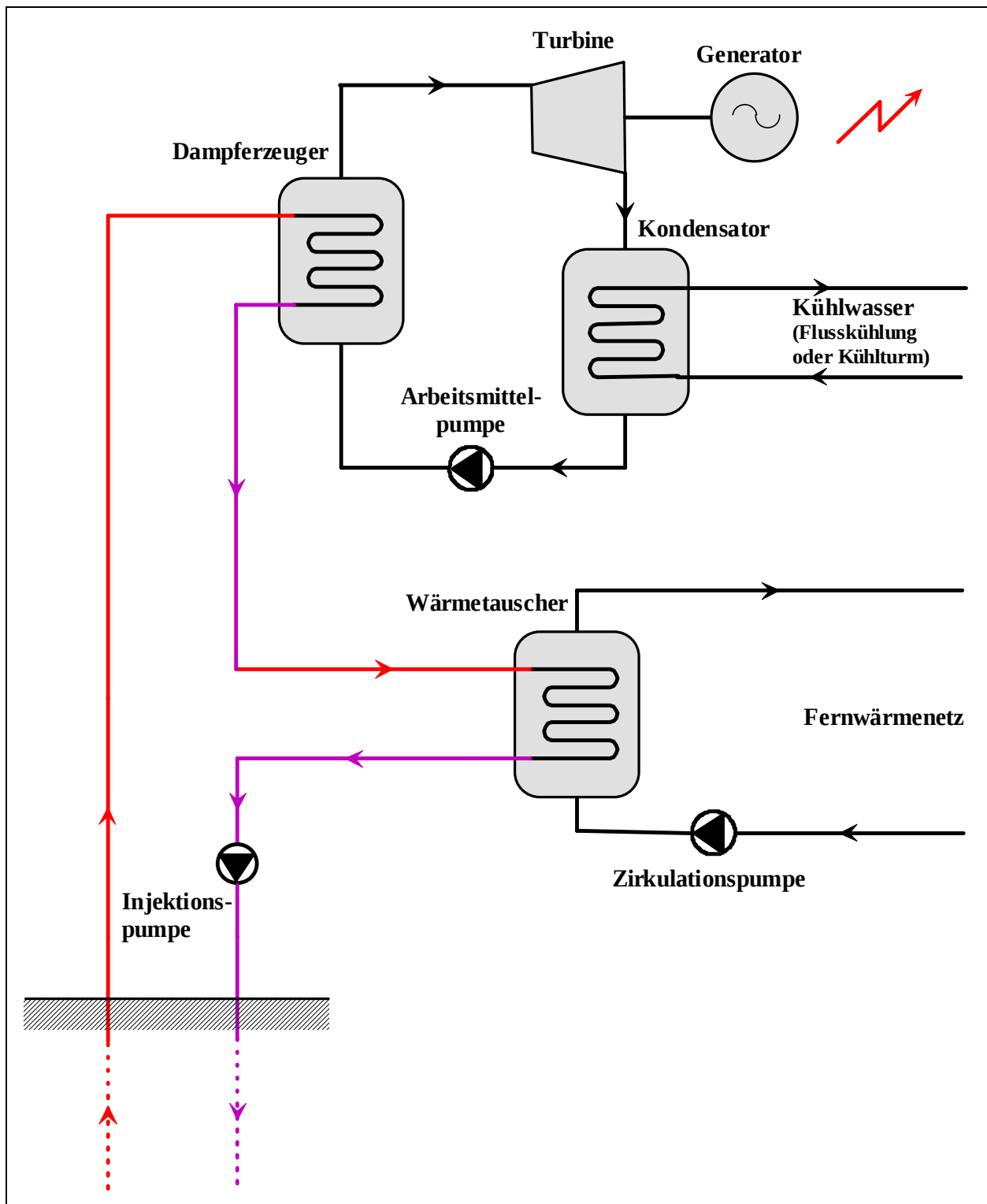


Bild A5: EGS-Anlage für die Erzeugung von Strom und Wärme mit Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Die beiden Verbraucher sind auf der Quellenseite in Serie geschaltet.

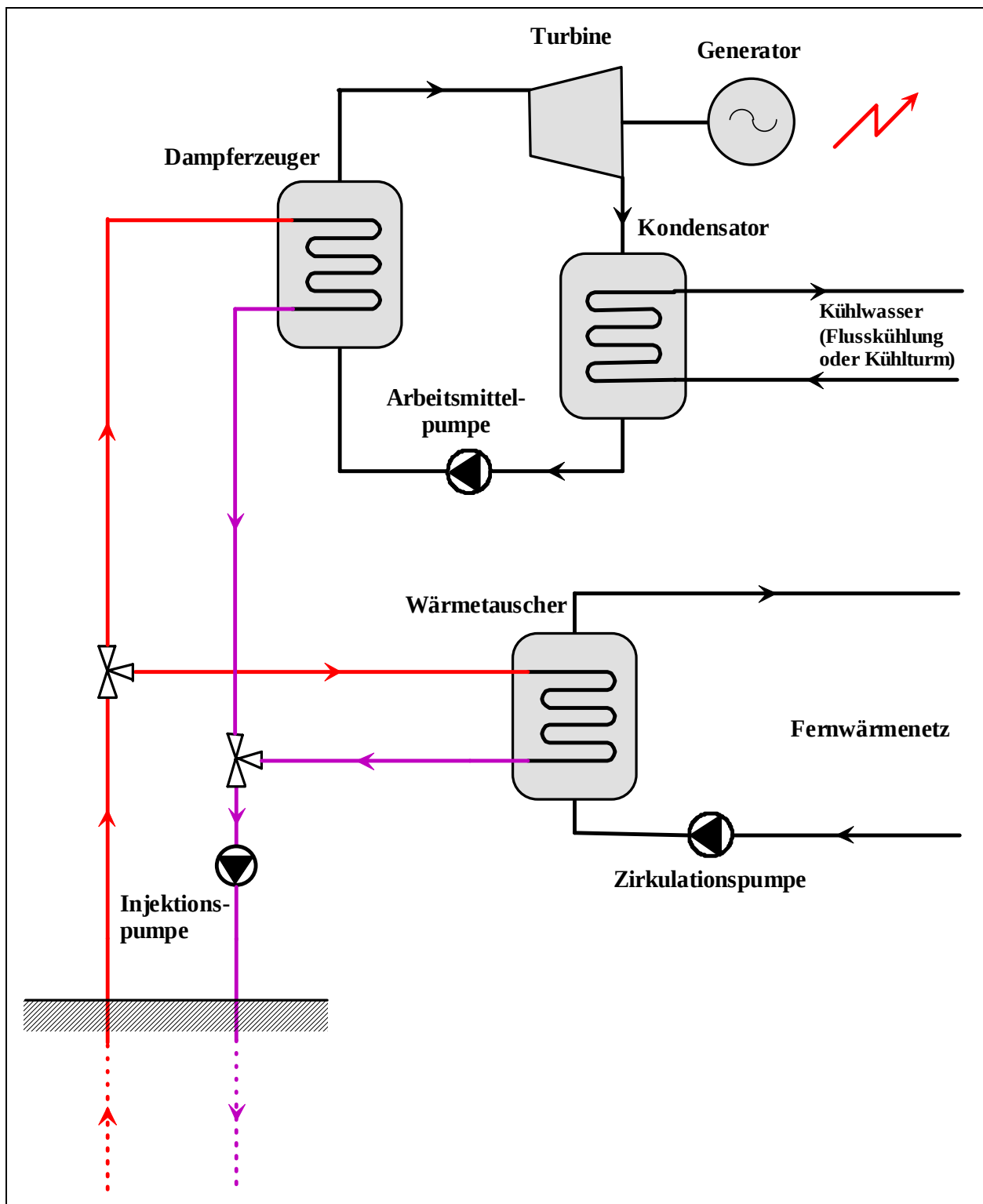


Bild A6: EGS-Anlage für die Erzeugung von Strom und Wärme mit Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Die beiden Verbraucher sind auf der Quellenseite parallel geschaltet, sie können alternativ oder auch gleichzeitig betrieben werden.

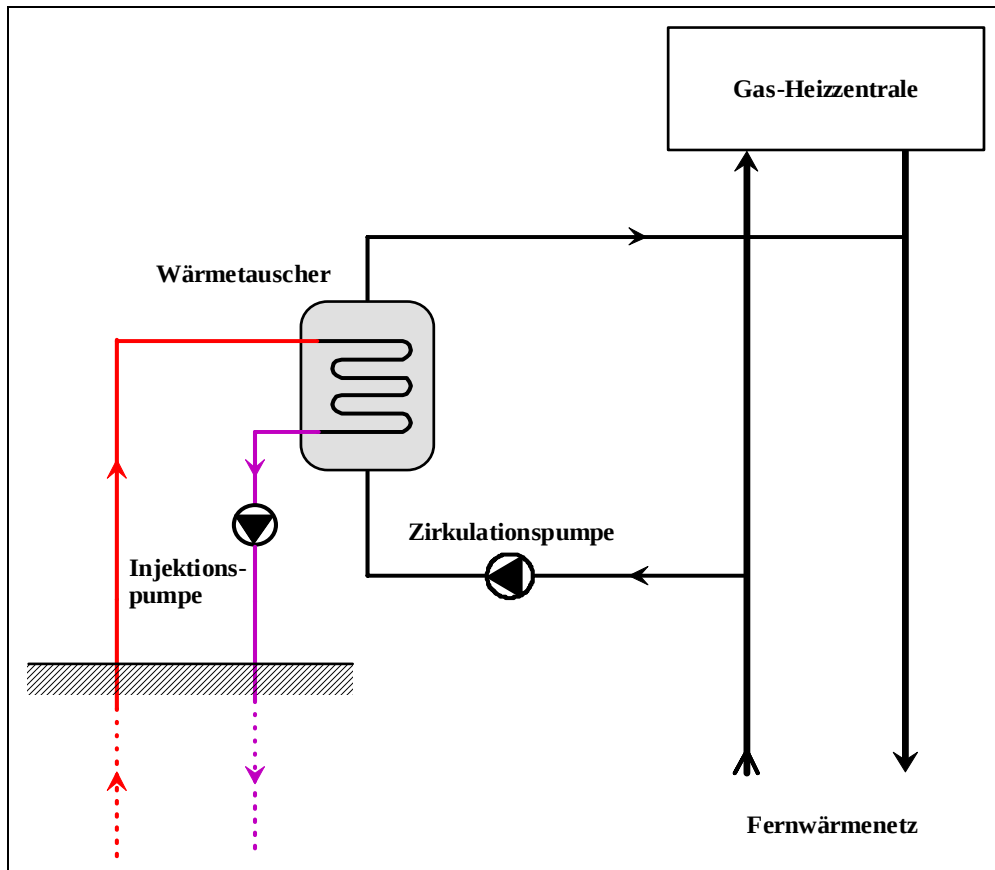


Bild A7: Anlage für die reine Wärmeerzeugung mit direkter Einspeisung

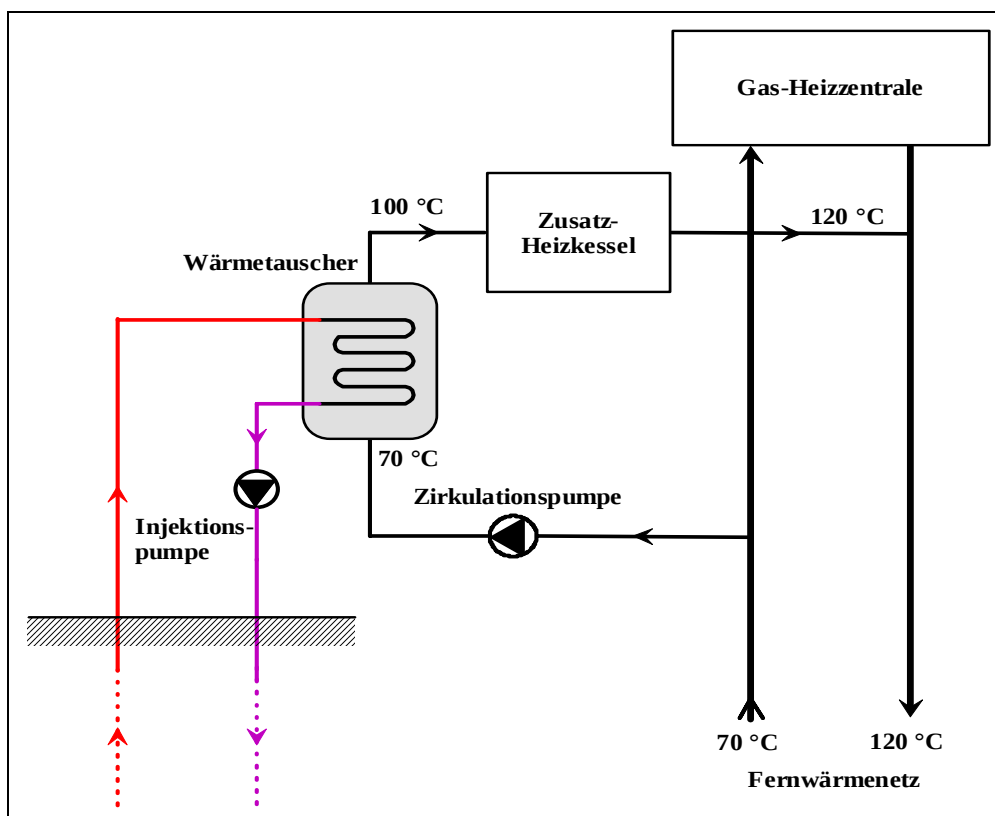


Bild A8: EGS-Anlage für die reine Wärmeerzeugung mit Einspeisung in ein Fernwärmenetz durch Rücklauf-Vorwärmung