

Programm  
**Energie 2000**

# **Abwärmennutzung Schlammverbrennung**

**ARA Basel**

ausgearbeitet durch  
**Horst Fath, dipl.Masch.Ing. (TU)**  
**Gruneko AG**  
**Güterstrasse 137, 4002 Basel**

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

## 1. ZUSAMMENFASSUNG

Die ProRhenon AG und die Industriellen Werke Basel (IWB) realisierten in 1999 gemeinsam das Projekt „Abwärmennutzung aus der Schlammverbrennung“.

Die Anlage wurde am 27. September 1999 in Betrieb genommen. Im 4. Quartal 1999 wurden die regelungstechnischen Optimierungsarbeiten durchgeführt. Seit dem 1. Januar 2000 erfolgt die Messwerterfassung.

Der vorliegende Zwischenbericht vergleicht die Energiebilanz eines Jahres vor resp. nach der Projektrealisierung miteinander und stellt sie in Beziehung zu den Prognosewerten (Fördergesuch).

Massgebend für die Erfolgskontrolle ist die Energiemenge die von den Schlammöfen auf die beiden Thermoölkreise übertragen wird. Diese Energiemenge ist in den beiden Vergleichsperioden zwangsläufig unterschiedlich gross, da die Menge der der ARA-Basel zugeführten Kanalisationsabwässer und damit die Menge des vorhandenen, zu verbrennenden Schlammes keine Konstante darstellt. Um zu vergleichbaren Ergebnissen zu gelangen, wurden deshalb die Energiebilanzen auf die Abwärmemenge des Jahres 2000 normiert.

Im 1. Betriebsjahr konnte 85% (22'962 MWh/a) der prognostizierten Energiemenge ins Fernwärmenetz der IWB eingespeist werden.

Die fehlenden 15% sind zu 1/10 auf einen erhöhten internen Heizenergiebedarf (Gebäude- und Öltanklager) zurückzuführen, 9/10 resultieren aus einer nicht vollständig stillgelegten Rauchgastrocknung der Ofenlinie 86. Entgegen der ursprünglichen Annahme musste eine Kondensation der Rauchgase im Kaminzug unter allen Umständen vermieden werden (Gefahr von Korrosionserscheinungen). Die momentan noch benötigte Energiemenge für die Rauchgastrocknung beträgt jedoch lediglich 40% der ursprünglichen Menge. Eine weitere Einsparung ist möglich, sobald auf die effektive Rauchgastemperatur im Kaminzug geregelt werden kann. Dies hat zur Folge, dass sich die Temperatur noch wenig oberhalb des Taupunktes bewegen wird.

Die Schlammvorwärmung wurde wie beabsichtigt zu 100% stillgelegt. Der theoretisch angenommene Mehrverbrauch an Stützenergie infolge Stilllegung der Schlammvorwärmung konnte messtechnisch verifiziert werden. Er beträgt ca. 40% der eingesparten Energie.

Die zur Verfügung stehende Abwärmemenge konnte vollständig ins Fernwärmenetz eingespeist werden, d.h. eine Wärmeabfuhr mittels Notkühler an die Umgebung war nicht mehr erforderlich (Vorbehalt: vgl. hierzu Kap. 7.5).

Ein weiterer positiver Effekt des Projektes Abwärmennutzung liegt darin, dass der Elektrizitätsbedarf für die technischen Einrichtungen der Abwärmennutzung fast vollständig mit Einsparungen an der internen Wärmeverteilung kompensiert werden konnte.

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichtes verantwortlich.**

## 2. RESUME

En 1999, la station Pro Rheno SA en collaboration avec les IWB "Industrielle Werke Basel" ont réalisé le projet commun: "Exploitation de la chaleur résiduelle au niveau de l'installation d'incinération des boues". L'installation a été mise en service le 27 septembre 1999. Des travaux d'amélioration au niveau des techniques de régulation ont été réalisés courant du dernier trimestre de l'année 1999. La saisie des valeurs de mesure a été instaurée dès le 1er janvier 2000.

Le présent rapport intermédiaire établit la comparaison du bilan énergétique de l'année précédant la réalisation du projet, respectivement de l'année suivant sa réalisation, tout en les mettant en relation avec les valeurs prévisionnelles (demande de subvention).

Ce qui est fondamental pour l'exploitation des résultats c'est la quantité d'énergie véhiculée depuis les fours à incinération et transmise vers les circuits d'huile de chauffe. Cette énergie représente obligatoirement des quantités distinctes en raison de la variation des quantités d'eaux usées de canalisation menées à la station d'épuration de Bâle. Celle-ci entraîne une masse de boues à incinérer qui n'est pas constante. C'est pourquoi, dans le but d'obtenir des résultats comparables, les bilans énergétiques ont été normalisés selon la quantité de chaleur résiduelle observée au cours de l'année 2000. Lors de la première année d'exploitation, 85% (c'est-à-dire 22'962 MWh/a) de la quantité énergétique prévue a pu ainsi être réinjectée dans le réseau d'eau de chauffage des IWB "Industrielle Werke Basel".

1/10e des 15% manquants sont à imputer à un besoin interne accru en matière de chauffage (chauffage des bâtiments et réservoir à fuel lourd). Les 9/10e restants résultent du fait que l'installation de séchage de gaz de combustion du four n° 86 reste en service partiellement. Contrairement aux prévisions initiales, une condensation des gaz de combustion dans le conduit de cheminée devait être empêchée absolument (en raison du danger des phénomènes de corrosion). Le besoin en quantité énergétique actuel pour l'installation de séchage du gaz de combustion représente tout de même 40% de la quantité d'origine. Une économie supplémentaire est possible dès que la température des gaz de combustion effective peut être régulée dans le conduit de cheminée. Dans ce cas, la température se situera légèrement au-dessus du point de condensation.

Comme prévu, l'installation de préchauffage des boues a été mise complètement hors service. La surconsommation théorique prévue en énergie de renfort en raison de la mise hors service de l'installation de préchauffage des boues a pu être vérifiée à l'aide d'appareils de mesure. Celle-ci s'élève à env. 40% de l'énergie économisée.

La quantité de chaleur résiduelle disponible a pu être entièrement injectée au réseau de chauffage à distance, c'est-à-dire qu'une évacuation de la chaleur à l'aide d'éléments de refroidissement de secours dans l'environnement n'a plus été nécessaire (réserve: voir chapitre 7.5).

Un des effets positifs du projet d'exploitation de la chaleur résiduelle réside également dans le fait que le besoin en énergie électrique des installations techniques de l'exploitation de la chaleur résiduelle a pu être presque entièrement compensée par les économies réalisées dans la distribution interne du chauffage.

**Ces travaux ont été réalisés à la demande de l'Office fédéral de l'Energie. La responsabilité en matière de contenu et des conclusions du présent rapport incombe exclusivement à l'auteur du rapport.**

**3. INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Resume</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>Ausgangslage</b>	<b>5</b>
4.1	Verfahrenstechnik der Schlammverbrennung ARA Basel	5
4.2	Abwärmepotenzial	6
4.3	Projekthalt / Technische Massnahmen	7
4.4	Messtellen	8
<b>5.</b>	<b>Ziel der Arbeit</b>	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>Lösungsweg</b>	<b>10</b>
6.1	Gesamtenergiebilanz	10
6.1.1	Wärme	10
6.1.2	Strom	11
6.2	Betrachtungsperiode Erfolgskontrolle	12
6.3	Energiebilanz Abwärme (Berechnungsweg)	14
<b>7.</b>	<b>Hauptergebnisse</b>	<b>16</b>
7.1	Ofenbilanz	16
7.2	Wärmebilanz	19
7.3	Strombilanz	19
7.4	Interpretation der Ergebnisse	20
7.4.1	Wärme	20
7.4.2	Strom	20
7.5	Bewertung der Abweichungen von den Zielgrössen	21
<b>8.</b>	<b>Noch offene Probleme / Potenziale</b>	<b>24</b>
<b>9.</b>	<b>Verzeichnis Tabellen und Diagramme</b>	<b>25</b>
<b>10.</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>26</b>
<b>11.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>
<b>12.</b>	<b>Anhang</b>	<b>29</b>

## 4. AUSGANGSLAGE

### 4.1 Verfahrenstechnik der Schlammverbrennung ARA Basel

Die gemeinsame Schlammverbrennung der Chemie-ARA und der kommunalen ARA in Basel besteht aus 3 Schlammverbrennungsöfen (Öfen 66, 67 und 86) unterschiedlicher Baujahre, jedoch mit einheitlicher Verfahrenstechnik. Jede Schlammverbrennungslinie kann autonom inkl. aller Hilfsanlagen betrieben werden.

Die Schlammverbrennung resp. die anfallende Abwärmemenge unterliegt primär keinen jahreszeitlichen Schwankungen. Der der Kläranlage mit den Kanalisationsabwässern zugeführte Schlamm wird quasi „just in time“ in den drei Schlammöfen verbrannt, da die Kapazität der Pufferzonen nur sehr beschränkt ist. Der Schlammanteil des Abwassers kann in erster Näherung als konstant angesehen werden. Ausserordentlichen Einfluss auf die Schlammmenge besitzen lediglich starke Regenfälle, die vermehrt Schlamm in die ARA Basel bringen.

Der eingebrachte Schlamm weist einen durchschnittlichen Gehalt an Trockensubstanz (TS) von ca. 4 bis 5  $\text{g}_{\text{TS}}/\text{ltr}_{\text{Schlamm}}$  auf. Nach dem Durchlaufen der Eindicker hat sich der Gehalt an Trockensubstanz auf ca. 40 bis 50  $\text{g}_{\text{TS}}/\text{ltr}_{\text{Schlamm}}$  erhöht. Anschliessend wird der Schlamm zentrifugiert wobei sich der TS-Gehalt auf ca. 250  $\text{g}_{\text{TS}}/\text{ltr}_{\text{Schlamm}}$  anreichert. Die Abflussmenge aus dem Eindicker resp. der Zentrifuge (Trübwasser resp. Zentrat) wird den Klärbecken zugeführt. Um die Flockung resp. Abtrennung des Schlammes vom Wasser zu unterstützen werden in der Zentrifuge sog. Polyelektrolyte (Anionen oder Kationen) zugesetzt, die jedoch nahezu vollständig mit dem Zentrat wieder ausgeschieden werden, d.h. sie leisten keinen Beitrag zum Heizwert des verbrannten Schlammes.

Der im Ofen verbrannte Schlamm weist einen durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 75% auf. Um den Verbrennungsprozess aufrecht zu erhalten ist in Abhängigkeit des Wassergehaltes eine bestimmte Menge an Stützenergie erforderlich. Als Stützenergie kommt in der ARA Basel Leichtöl (HEL), Schweröl (SÖL) oder Abfalllösungsmittel (ALM) in Frage. Bei höherem Wassergehalt ist primär auch mehr Stützenergie erforderlich. Bei starken Regenfällen wird mit dem Schlamm auch vermehrt Sand der ARA Basel zugeführt. Diese nicht brennbare, anorganische Substanz ist verbrennungstechnisch wie Wasser anzusehen, d.h. trotz konstantem Wassergehalt nach der Zentrifuge ist eine grössere Menge an Stützenergie zur Verbrennungsunterstützung erforderlich.

Der Schlamm wird vor dem Verbrennen von 20°C auf 50°C vorgewärmt. Eine Stilllegung dieser Vorwärmung hat ein Mehrbedarf an Stützenergie (ca. 0.27 kWh/kgTS) zur Folge (nach [1]).

Die durch die Verbrennung entstehende Wärme wird mit den Rauchgasen abgeführt. Der Energieinhalt der Rauchgase wird grösstenteils auf zwei separate

Thermoölkreisläufe (Ofen 86 resp. Ofen 66/67) übertragen und für verfahrenstechnische Prozesse und interner Komfortwärme verwendet. Die nicht nutzbare Energie wird über grundwassergekühlte Notkühler abgeführt. Eine detaillierte Erläuterung der Energieflüsse findet sich in Kapitel 6.

## 4.2 Abwärmepotenzial

### Zustand vor Realisierung des Projektes „Abwärmenutzung“:

Das Thermoöl verlässt den Thermoölerhitzer mit einer Vorlauftemperatur von ca. 240 °C. Parallel angeordnete Verbraucher kühlen das Thermoöl auf ca. 180 °C ab, bevor es wieder in den Erhitzer eintritt. Das stark vereinfachte Verfahrensschema zeigt Anhang 1.

Als Normalbetrieb wird der Betrieb des Ofens 86 mit einem weiteren Ofen (66 oder 67) definiert.

Tabelle 1 : Abwärmepotenzial Schlammverbrennung

		Ofen 66	Ofen 67	Ofen 86	Normalbetrieb 66 od. 67+68
Leistung Thermoöl-Erhitzer	kW	1'500	1'500	2'540	<b>4'040</b>
Betriebsstunden pro Jahr	h/a	4'500	4'500	7'200	
<b>Abwärmeenergie</b>	MWh/a	6'750	6'750	18'288	<b>31'788</b>

Ein Teil der Abwärme wird prozessintern zur Rauchgastrocknung und Schlammvorwärmung verwendet. Hierbei ist anzumerken, dass die Energie für die Rauchgastrocknung der Öfen 66 und 67 direkt dem Rauchgasstrom entnommen wird (und nicht wie bei Ofen 86 dem Thermoölkreis).

Die für eine externe Nutzung momentan zur Verfügung stehende Abwärme beträgt demnach :

Abwärmeproduktion:	31'788 MWh/a
./. prozessinterne Nutzung	
◦ Rauchgastrocknung Ofen 86	- 6'700 MWh/a
◦ Schlammvorwärmung	- 15'200 MWh/a
./. Raumwärmebedarf ARA-intern	- 2'000 MWh/a
<hr/>	
Abwärme ungenutzt :	7'888 MWh/a

Damit werden momentan 7'888 MWh/a bzw. ca. 25% der Abwärme aus der Schlammverbrennung über grundwassergekühlte Notkühler an die Umwelt abgegeben.

Prognostizierter Zustand nach Realisierung des Projektes „Abwärmenutzung“:

Das vorliegende Projekt zur Abwärmenutzung ging davon aus, dass auf die Rauchgastrocknung des Ofens 86 und auf die Schlammvorwärmung jedes Ofens vollständig verzichtet werden soll. Nach Umsetzung dieser Massnahmen erhöht sich die extern verfügbare Abwärme drastisch:

Abwärmeproduktion		31'788 MWh/a
./.	Rauchgastrocknung Ofen 86	- 0 MWh/a
./.	Schlammvorwärmung	- 0 MWh/a
./.	Raumwärmebedarf ARA-intern	- 2'000 MWh/a

---

Abwärmepotenzial für externe Nutzung: 29'788 MWh/a

Das gesamte Abwärmepotenzial wird in das Fernwärmenetz der Industriellen Werke Basel (IWB) eingespeist. Es wird keine Energie mehr über die Notkühler abgeführt. Diese Zahlen bildeten die Grundlage für das Fördergesuch.

### 4.3 Projektinhalt / Technische Massnahmen

Die innerhalb des Projektes getätigten Umbaumaassnahmen sind der Anlagenbeschreibung zu entnehmen (Anhang 2).

#### 4.4 Messtellen

##### Ofen :

Die Schlammverbrennung der ProRheno ist mit einem Prozessleitsystem (PLS) ausgerüstet. Das PLS zeichnet alle verfahrenstechnischen Werte auf (Details siehe Tabelle 3 und Tabelle 4).

##### Wärme :

Die nachfolgende Tabelle dokumentiert die installierten Wärmehähler (Aquametro Calec).

Tabelle 2 : Verzeichnis der Messtellen (Wärmehähler) von Anhang 6 und 7

Bezeichnung der Wärmehähler in Anhang f) und g)	Symbol	Erläuterung	Installiert in Periode 1998/99	Installiert in Periode 2000
Wärmeproduktion	$Q_{HZI}$	Gesamtwärmemenge für Gebäude- und Tankheizung	X	X
Heizung Schlammbehandlung	$Q_{SB}$	Teilwärmemenge Gebäudeheizung	X	X
ARA Basel + Betriebsgebäude	$Q_{BG}$	Teilwärmemenge Gebäudeheizung	X	X
<i>Objekt 14 Abluft</i>	/	<i>Untierzähler : Teilwärmemenge von ARA Basel + Betriebsgebäude</i>	X	X
IWB Bezug	$Q_{HW}$	Gesamtwärmemenge von Thermoölkreis auf Heisswasserkreis		X

##### Legende :

$$Q_{IWB} = Q_{HW} - Q_{HZI}$$

mit  $Q_{HZI} = Q_{TH} + Q_{SB} + Q_{BG}$

mit  $Q_{SB} + Q_{BG} = Q_{GH}$

##### Strom :

Der Stromverbrauch der technischen Installationen zur Abwärmenutzung  $Q_{el,ABW}$  wird mittels neuem Stromzähler (Standort Schaltschrank) gemessen.

## **5. ZIEL DER ARBEIT**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit (Erfolgskontrolle) besteht darin, das ursprünglich prognostizierte Abwärmepotenzial und die Auswirkungen der umgesetzten Massnahmen innerhalb des Projektes messtechnisch zu verifizieren. Hierzu wird die Energiebilanz eines Jahres vor resp. nach der Realisierung miteinander verglichen.

## 6. LÖSUNGSWEG

### 6.1 Gesamtenergiebilanz

#### 6.1.1 Wärme

Die energetische Gesamtbilanzierung der drei Schlammverbrennungslinien –resp. öfen zeigen die Gesamtenergieflussbilder in Anhang 8 (4 Seiten).

Die eingebrachten Energieträger Schweröl, Leichtöl und Abfalllösungsmittel dienen als Stützenergie zur Verbrennung des Schlammes.

Input je Schlammofen :

$$M_{\text{INPUT}} = M_{\text{SCH}} + M_{\text{HEL}} + M_{\text{SÖL}} + M_{\text{ALM}} + (M_{\text{WL}}) \quad [\text{to/Zeiteinheit}] \quad (1)$$

Im Schlammofen findet eine Wirbelbettverbrennung statt. Zur Aufrechterhaltung des Wirbelbettes sind relativ konstante Betriebsbedingungen notwendig, die durch die Wirbelluft gewährleistet werden. Die Wirbelluft ( $M_{\text{WL}}$ ) wird durch den Abgasstrom aufgeheizt und dem Verbrennungsraum zugeführt (=bilanzneutral). Darüberhinaus wird die Hohlwelle des Ofens gekühlt. Die aufgewärmte Hohlwellenluft ( $Q_{\text{HWK}}$ ) wird dem Abgasstrom vor dem Kamineintritt beigemischt.

Output je Schlammofen :

$$Q_{\text{OUTPUT}} = Q_{\text{RG}} + Q_{\text{HWK}} \quad [\text{MWh/Zeiteinheit}] \quad (2)$$

$$\text{mit } Q_{\text{RG},86} = (Q_{\text{WL}} + Q_{\text{TÖL}} + Q_{\text{RG}'})_{86} \quad (3)$$

$$\text{mit } Q_{\text{RG},66} = (Q_{\text{WL}} + Q_{\text{TÖL}} + Q_{\text{RGT}} + Q_{\text{RG}'})_{66} \quad (4)$$

$$\text{mit } Q_{\text{RG},67} = (Q_{\text{WL}} + Q_{\text{TÖL}} + Q_{\text{RGT}} + Q_{\text{RG}'})_{67} \quad (5)$$

Der Wärmeinhalt der heissen Abgase wird über einen Erhitzer auf den Thermoölkreis ( $Q_{\text{TÖL}}$ ) übertragen. Es existieren zwei Thermoölkreisläufe (86 bzw. 66/67). Die beiden Schlammöfen 66 und 67 besitzen je einen eigenen Thermoölerhitzer resp. Notkühler, jedoch nur einen gemeinsamen Wärmetauscher für die Schlammvorwärmung. Die Wärmeversorgung der ARA-internen Heizung erfolgt ebenfalls gemeinsam von Ofen 66 und 67.

Der abgekühlte Rauchgasstrom ( $Q_{\text{RG}'}$ ) wird durch die Hohlwellenkühlluft ( $Q_{\text{HWK}}$ ) sowie einen zweiten Luftstrom ( $Q_{\text{RGT}}$ ) vor dem Kamineintritt aufgewärmt. Die Trocknungsluft ( $Q_{\text{RGT}}$ ) wird beim Ofen 86 durch das Thermoöl aufgeheizt, wodurch die im Thermoölkreis zur Verfügung stehende Abwärme reduziert wird. Beim Ofen 66 und 67 hat die Rauchgastrocknung ( $Q_{\text{RGT}}$ ) keinen direkten Einfluss auf den Abwärmeinhalt des Thermoöls, da die Wärme unmittelbar den Rauchgasen entzogen wird.

$$\text{mit } Q_{TÖL,86} = (Q_{RGT} + Q_{NK} + Q_{SCH-VW} + Q_{HW})_{86} \quad (6)$$

$$\text{mit } Q_{TÖL,66} = (Q_{NK} + Q_{SCH-VW})_{66} + Q_{HW66} \quad (7)$$

$$\text{mit } Q_{TÖL,67} = (Q_{NK} + Q_{SCH-VW})_{67} + Q_{HW67} \quad (8)$$

Die auf das Heisswasser übertragene Wärmemenge ( $Q_{HW}$ ) wird für die interne Heizung der ARA ( $Q_{HZI}$ ) verwendet. Die Bezugsstruktur kann unterteilt werden in einen Anteil für die Gebäudeheizung ( $Q_{GH}$ ) und einen Anteil für die Tankheizung ( $Q_{TH}$ ). Die restliche Wärmemenge wird in das Fernwärmenetz der IWB ( $Q_{IWB}$ ) eingespeist.

$$Q_{HW} = Q_{HW86} + Q_{HW66} + Q_{HW67} = Q_{HZI} + Q_{IWB} = Q_{TH} + Q_{GH} + Q_{IWB} \quad (9)$$

Darüberhinaus wird Energie mit dem Waschwasser der Rauchgasreinigung ( $Q_{RGR}$ ) in das Ascheabsatzbecken übertragen. Die restliche Exergie entweicht durch den Kamin in die Umgebung.

$$\text{mit } Q_{Kamin,86} = (Q_{RGT} + Q_{RG'} + Q_{HWK} - Q_{RGR})_{86} \quad (10)$$

$$\text{mit } Q_{Kamin,66} = (Q_{RGT} + Q_{RG'} + Q_{HWK} - Q_{RGR})_{66} \quad (11)$$

$$\text{mit } Q_{Kamin,67} = (Q_{RGT} + Q_{RG'} + Q_{HWK} - Q_{RGR})_{67} \quad (12)$$

Der Gesamtoutput der drei Schlammöfen lässt sich in zwei charakteristische Wärmeströme aufteilen :

$$Q_{OUTPUT} = Q_{Wärme-1} + Q_{Wärme-2} \quad (13)$$

mit :

$$Q_{Wärme-1} = Q_{HZI} + Q_{IWB} + Q_{SCH-VW} + Q_{NK} \quad (14)$$

$$Q_{Wärme-2} = Q_{RGR} + Q_{KAMIN} + Q_{WL} \quad (15)$$

Wärmestrom 1 ( $Q_{Wärme-1}$ ) beschreibt den Anteil der nutzbaren Abwärme, Wärmestrom 2 ( $Q_{Wärme-2}$ ) den der primär (in vorliegenden Projekt) nicht nutzbaren Abwärme. Eine Einschränkung gibt es lediglich für den im Parameter ( $Q_{KAMIN}$ ) enthaltenen Anteil für die Rauchgastrocknung ( $Q_{RGT}$ ) bei Ofen 86.

Anhang 9 (4 Seiten) zeigt das auf die relevante Bilanzgrenze (Abwärme) reduzierte Energieflussbild.

Dieses Energieflussbild bildet die Basis für die weiteren Betrachtungen.

### 6.1.2 Strom

Der gesamte verfahrenstechnische Prozess der Schlammbehandlung und – verbrennung benötigt elektrische Energie die über einen Stromzähler erfasst wird -  $Q_{el,SB}$

Im Zuge der Massnahmen für die Nutzung der Abwärme wurden auch die Einrichtungen für die Verteilung der intern benötigten Wärmeenergie saniert -  $Q_{el,ARA-int.}$ . Für diese Einrichtungen wurde kein eigener Stromzähler vorgesehen. Die Energiemengen werden über Betriebszeiten und installierter Leistung abgeschätzt (Anhang 10).

Der Elektrizitätsbedarf der gesamten Installation für die Nutzung und Einspeisung der Abwärme wird über einen Stromzähler ( $Q_{el,ABW}$ ) erfasst.

$$\text{Strombedarf vor der Realisierung : } Q_{el,V} = Q_{el,SB} + Q_{el,ARA-int.} \quad (16)$$

$$\text{Strombedarf nach der Realisierung : } Q_{el,N} = Q_{el,SB} + Q_{el,ARA-int.} + Q_{el,ABW} \quad (17)$$

Der Strombedarf für den verfahrenstechnischen Prozess der Schlammbehandlung und -verbrennung ( $Q_{el,SB}$ ) wird nicht beeinflusst durch das vorliegende Projekt „Abwärmennutzung“ sodass lediglich die beiden Verbrauchszahlen ( $Q_{el,ARA-int.}$  und  $Q_{el,ABW}$ ) für den Vergleich relevant sind.

## 6.2 Betrachtungsperiode Erfolgskontrolle

Das vorliegende Projekt wurde im 3. und 4. Quartal 1999 realisiert.

Für die Erfolgskontrolle wurden folgende zwei Perioden ausgewählt :

Periode vor der Realisierung : 1. Juni 1998 bis 31. Mai 1999

Periode nach der Realisierung : 1. Januar 2000 bis 31. Dezember 2000

Für die beiden Betrachtungsperioden wurden folgende Parameter aus der Energiebilanz miteinander verglichen. Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigt die Herkunft der Daten.

Tabelle 3 : Definition und Herkunft der Parameter der Energiebilanz Wärme

<b>WÄRME</b>		Prognose gemäss Fördergesuch	Periode 1.6. 98 bis 31.5. 99	Periode 1.1. 00 bis 31.12. 00
M <sub>SCH</sub>	to/Zeiteinheit	kvv	kalkuliert aus Messwert PLS <b>Anhang 11, 12</b>	kalkuliert aus Messwert PLS <b>Anhang 11, 13</b>
M <sub>HEL</sub>	to/Zeiteinheit	kvv	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>
M <sub>SÖL</sub>	to/Zeiteinheit	kvv	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>
M <sub>ALM</sub>	to/Zeiteinheit	kvv	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>
X <sub>SCH</sub>	%	kvv	kalkuliert aus Messwert PLS <b>Anhang 11</b>	kalkuliert aus Messwert PLS <b>Anhang 11</b>
Q <sub>NK</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	kalkuliert	kalkuliert
Q <sub>SCH-VW</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	kalkuliert	Wert=0 per Definition
Q <sub>TH</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	Differenzbildung	Differenzbildung
Q <sub>GH</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	Messwert WZ <b>Anhang 6</b>	Messwert WZ <b>Anhang 7</b>
Q <sub>HZI</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	Messwert WZ <b>Anhang 6</b>	Messwert WZ <b>Anhang 7</b>
Q <sub>HW</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	entspricht Q <sub>HZI</sub>	Messwert WZ <b>Anhang 7</b>
Q <sub>IWB</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	Parameter = 0 (nicht vorhanden)	Differenzbildung Messwerte WZ

Tabelle 4 : Definition und Herkunft der Parameter der Energiebilanz Strom

<b>STROM</b>		Prognose gemäss Fördergesuch	Periode 1.6. 98 bis 31.5. 99	Periode 1.1. 00 bis 31.12. 00
Q <sub>el,SB</sub>	MWh/Zeiteinheit	kvv	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>	Messwert PLS <b>Anhang 14</b>
Q <sub>el,ARA-int.</sub>	MWh/Zeiteinheit	kvv	kalkuliert <b>Anhang 10</b>	kalkuliert <b>Anhang 10</b>
Q <sub>el,ABW</sub>	MWh/Zeiteinheit	geschätzt	Parameter = 0 (nicht vorhanden)	Messwert Stromzähler

**Legende :**

kvv = kein Wert vorhanden

### 6.3 Energiebilanz Abwärme (Berechnungsweg)

Das nutzbare Abwärmepotenzial steht gemäss Kapitel 4.2 in direktem Zusammenhang mit den in den Rauchgasleitungen eingebauten Thermoölerhitzern. Im vorliegenden Kapitel werden, ausgehend von den Auslegungswerten der Thermoölerhitzer, die effektiv auf den Thermoölkreis übertragenen Wärmemengen in den beiden Betrachtungsperioden anhand von effektiven Betriebsdaten der Verbrennungsöfen ermittelt. Ausserdem werden die Energiemengen für die Schlammvorwärmung und die Rauchgastrocknung berechnet.

#### Auslegungswerte :

Für die drei Schlammverbrennungsöfen gelten folgende Auslegungswerte.

Tabelle 5 : Auslegungswerte der Schlammverbrennungsöfen nach [2]

	Verbrannte Schlammmenge in [to TS/d]	Thermische Leistung der Thermoölerhitzer [kW]
Ofen 66	26.4	1500
Ofen 67	26.4	1500
Ofen 86	33.6	2540

Für die Rauchgastrocknung des Ofens 86 wurden im Auslegungspunkt nach [3] vor dem Umbau ca. 1179 kW dem Thermoöl entzogen.

Gemäss einer persönlichen Mitteilung vom Juli 2000 [4] werden seit dem Umbau lediglich 500 kW dem Thermoöl für die Rauchgastrocknung entzogen.

Für die Schlammvorwärmung wurde im Auslegungspunkt nach [2] vor dem Umbau für den . . .

- Ofen 66 : 3285 MWh/a während 4500 h/a = 730 kW ( 18 )
- Ofen 67 : 3285 MWh/a während 4500 h/a = 730 kW ( 19 )
- Ofen 86 : 5760 MWh/a während 7200 h/a = 800 kW ( 20 )

dem Thermoöl entzogen.

Seit dem Umbau sind die Wärmetauscher der Schlammvorwärmung hydraulisch vom Thermoölkreis entkoppelt, d.h. die Schlammvorwärmung ist nicht mehr in Betrieb.

#### Betriebsjahr 2000 :

Im Betriebsjahr 2000 (1. Jan. bis 31. Dez.) waren die drei Verbrennungsöfen gemäss Diagramm 2 bis Diagramm 4 (siehe Anhang 15 bis 17) in Betrieb. Daraus folgt :

- Betriebszeit Ofen 66 (Jahr 2000) = 169 Tage
- Betriebszeit Ofen 67 (Jahr 2000) = 115 Tage
- Betriebszeit Ofen 86 (Jahr 2000) = 329 Tage

Die durchschnittlich pro Tag verbrannten Schlammengen lagen gemäss Anhang 13 bei :

- Verbrannte Schlammmenge Ofen 66 (Jahr 2000) = 23.8 to TS / d
- Verbrannte Schlammmenge Ofen 67 (Jahr 2000) = 26.5 to TS / d
- Verbrannte Schlammmenge Ofen 86 (Jahr 2000) = 28.2 to TS / d

Mit den effektiv verbrannten Schlammengen sowie den oben aufgeführten Auslegungswerten der Thermoölerhitzer lässt sich die gesamte auf den Thermoölkreis übertragene Wärmemenge (=Input) berechnen (Details siehe Anhang 18).

Dieser Berechnungsweg wird ebenfalls angewendet, um den Wärmebedarf (Rauchgastrocknung, Schlammvorwärmung) der drei Ofenlinien zu ermitteln. Die Werte der Gleichungen (10) bis (12) im Anhang 18 wurden messtechnisch (via Wärmehändler) erfasst. Es ergibt sich eine Diskrepanz zwischen Input und Output von -2186 MWh/a.

Die Bedingung Input=Output (!) führt auf ein Nullstellenproblem, das durch die Einführung eines Korrekturfaktors für die verbrannte Schlammmenge (gleicher Faktor für jeden Ofen) gelöst wird. Die Lösung für (Input minus Output = 0) ergibt sich für einen Korrekturfaktor von 1.0944.

Anhang 19 zeigt die Energiebilanz für das Jahr 2000.

#### Betriebsjahr 98/99 :

Im Betriebsjahr 98/99 (1. Juni 98 bis 31. Mai 99) waren die drei Verbrennungsöfen gemäss Diagramm 5 bis Diagramm 7 (siehe Anhang 20 bis 22) in Betrieb. Daraus folgt :

- Betriebszeit Ofen 66 (Jahr 98/99) = 191 Tage
- Betriebszeit Ofen 67 (Jahr 98/99) = 108 Tage
- Betriebszeit Ofen 86 (Jahr 98/99) = 339 Tage

Die durchschnittlich pro Tag verbrannten Schlammengen lagen gemäss Anhang 12 bei :

- Verbrannte Schlammmenge Ofen 66 (Jahr 98/99) = 24.3 to TS / d
- Verbrannte Schlammmenge Ofen 67 (Jahr 98/99) = 24.1 to TS / d
- Verbrannte Schlammmenge Ofen 86 (Jahr 98/99) = 31.8 to TS / d

Der Korrekturfaktor aus dem Betriebsjahr 2000 wird für das Betriebsjahr 98/99 übernommen.

Die Berechnung der Abwärmeenergie sowie des Wärmebedarfes der drei Ofenlinien erfolgt analog. Die Details dieser Energiebilanz zeigt Anhang 23. Die Werte der Gleichung 10) und 11) dieses Anhangs sind messtechnisch (via Wärmehändler) erfasst worden.

Die Differenz zwischen Input und Output wurde über die Notkühler an die Umgebung abgeführt.

## 7. HAUPTERGEBNISSE

### 7.1 Ofenbilanz

Die Betriebsdaten (Verbrannter Schlamm, Wassergehalt, Stützenergie, Elektrische Energie) der Schlammverbrennungsöfen der ARA Basel weisen in den beiden betrachteten Zeiträumen (Periode 1998/99 bzw. 2000) eine maximale Abweichung von 10% auf.

Tabelle 6 : Ofenbilanz Periode 1998/99 resp. 2000

<b>Ofenbilanz</b>	<b>vor</b>		<b>nach</b>	
	<b>Realisierung</b>		<b>Realisierung</b>	
	<b>Wärme- verbund</b>		<b>Wärme- verbund</b>	
	<b>Periode</b>		<b>Periode</b>	
	<b>1.6.98 - 31.5.99</b>		<b>1.1.00 - 31.12.00</b>	
<b>Verbrannter Schlamm (to TS/Jahr)</b>	<b>18'029</b>	<b>110%</b>	<b>16'360</b>	<b>100%</b>
davon Ofen 66	4'633		4018	
davon Ofen 67	2'599		3044	
davon Ofen 86	10'788		9'291	
<b>Verbrannter Schlamm (m³/Jahr)</b>	<b>70'441</b>	<b>107%</b>	<b>65'599</b>	<b>100%</b>
<b>Wassergehalt</b>	<b>74.4%</b>	<b>99%</b>	<b>75.1%</b>	<b>100%</b>
<b>TS-Gehalt</b>	<b>25.6%</b>	<b>103%</b>	<b>24.9%</b>	<b>100%</b>
<b>Schlammmenge vor Eindickung (m³/Jahr)</b>	452'462	<b>103%</b>	439'329	<b>100%</b>
<b>Stützenergie (to/Jahr)</b>	<b>2'771</b>	<b>92%</b>	<b>3'019</b>	<b>100%</b>
davon Stützenergie Leichtöl (to/Jahr)	740	<b>79%</b>	936	<b>100%</b>
davon Stützenergie Schweröl (to/Jahr)	2'032	<b>98%</b>	2'083	<b>100%</b>
Spez. Stützenergiebedarf (to/to TS)	0.154		0.185	
<b>Abfalllösungsmittel (to/Jahr)</b>	<b>328</b>	<b>50%</b>	<b>653</b>	<b>100%</b>
<b>Elektr. Energie Schlammbehandlung (kWh/a)</b>	<b>8'178'245</b>	<b>100%</b>	<b>8'173'621</b>	<b>100%</b>
Spez. elektr. Energiebedarf (kWh/kg TS)	0.462		0.507	

Die in Tabelle 6 aufgeführten Werte stammen ausnahmslos aus dem Prozessleitsystem der ARA Basel.

Die Betriebswerte sind primär unabhängig vom vorliegenden Abwärmeprojekt, d.h. die Differenzen sind in den schwankenden Entsorgungsmengen begründet. Eine Ausnahme bildet lediglich die nachfolgend betrachtete Schlammvorwärmung.

Im Betriebsjahr 2000 wurden gemäss Anhang 11 insgesamt 16'360 to TS/a verbrannt. Wie in Kapitel 4.1 erwähnt, ist durch die Stilllegung der Schlammvorwärmung ein erhöhter Bedarf an Stützenergie erforderlich.

Der Mehrbedarf ergibt sich zu :

$$16'360 \text{ toTS/a} * 270 \text{ kWh/toTS} = 4'417 \text{ MWh/a} \quad (21)$$

Mit einem Heizwert für Heizöl (Extra Leicht) von 11.86 MWh/to ergibt sich ein Brennstoffäquivalent von

$$4'417 \text{ MWh/a} / 11.86 \text{ MWh/to} = 372 \text{ to/a} \quad (22)$$

Unterschiedlich hohe Schlammengen vor der Eindickung sowie ein unterschiedlich hoher Wassergehalt des verbrannten Schlammes der beiden Betrachtungsperioden lassen einen Vergleich der erforderlichen Stützenergie nur bedingt zu. Aus diesem Grund werden die beiden Parameter der Betrachtungsperiode 1998/99 auf die Werte des Jahres 2000 normiert. Die restlichen Bilanzwerte werden mit den daraus resultierenden Verhältniszahlen korrigiert und in Tabelle 7 dargestellt.

Legende zu Tabelle 7:

**NORMIERUNG Periode 1998 bis 1999 :**

- 1) normiert auf "Schlammmenge vor Eindickung" wie nach Realisierung WV
- 2) normiert auf "Schlammmenge vor Eindickung" und zusätzlich auf "Wassergehalt" wie nach Realisierung WV
- 3) normiert auf "Wassergehalt" wie nach Realisierung WV

norm. = Bezugsgrösse Normierung

n.n. = nicht normiert

Der spezifische Stützenergiebedarf liegt somit in beiden Betrachtungsperioden bei 0.163 +/- 0.001 to/to TS.

Der oben kalkulierte Mehrbedarf an Stützenergie infolge stillgelegter Schlammvorwärmung ist somit indirekt bestätigt.

Tabelle 7 : Normierte Ofenbilanz für Periode 1998/99

<b>Ofenbilanz</b>		<b>vor</b>		<b>nach</b>	
<b>- normiert -</b>		<b>Realisierung</b>		<b>Realisierung</b>	
		<b>Wärme- verbund</b>		<b>Wärme- verbund</b>	
		<b>Periode</b>		<b>Periode</b>	
		<b>1.6.98 - 31.5.99</b>		<b>1.1.00 - 31.12.00</b>	
<b>Verbrannter Schlamm (to TS/Jahr)</b>	<b>2)</b>	<b>17'058</b>	<b>104%</b>	<b>16'360</b>	<b>100%</b>
davon Ofen 66	2)	4'383		4'018	
davon Ofen 67	2)	2'459		3'044	
davon Ofen 86	2)	10'207		9'291	
<b>Verbrannter Schlamm (m<sup>3</sup>/Jahr)</b>	<b>1)</b>	<b>68'397</b>	<b>104%</b>	<b>65'599</b>	<b>100%</b>
<b>Wassergehalt</b>	<b>norm.</b>	<b>75.1%</b>	<b>100%</b>	<b>75.1%</b>	
<b>TS-Gehalt</b>	<b>norm.</b>	<b>24.9%</b>	<b>100%</b>	<b>24.9%</b>	
<b>Schlammmenge vor Eindickung (m<sup>3</sup>/Jahr)</b>	<b>norm.</b>	<b><u>439'329</u></b>	<b>100%</b>	<b>439'329</b>	<b>100%</b>
<b>Stützenergie (to/Jahr)</b>	<b>3)</b>	<b>2'795</b>	<b>93%</b>	<b>3'019</b>	<b>100%</b>
davon Stützenergie Leichtöl (to/Jahr)	3)	747	80%	936	100%
davon Stützenergie Schweröl (to/Jahr)	3)	2'050	98%	2'083	100%
Spez. Stützenergiebedarf (to/to TS)		0.164		0.185	
<b>Abfalllösungsmittel (to/Jahr)</b>	<b>n.n.</b>	<b>328</b>	<b>50%</b>	<b>653</b>	<b>100%</b>
<b>Elektr. Energie Schlammbehandlung (kWh/a)</b>	<b>1)</b>	<b>7'940'878</b>	<b>97%</b>	<b>8'173'621</b>	<b>100%</b>
Spez. elektr. Energiebedarf (kWh/kg TS)		0.466		0.500	
Mehrbedarf an Stützenergie infolge stillgelegter Schlammvorwärmung (to/Jahr)		<b>0</b>		<b>372</b>	
<b>Stützenergie (to/Jahr) - projektbereinigt -</b>	<b>3)</b>	<b>2'795</b>	<b>106%</b>	<b>2'647</b>	<b>100%</b>
Spez. Stützenergiebedarf (to/to TS) - projektbereinigt -		0.164		0.162	

## 7.2 Wärmebilanz

Auf Basis dieser Ofen-Betriebsdaten ergeben sich folgende Energieströme innerhalb der Bilanzgrenze der Thermoölkreise gemäss Anhang 9.

Tabelle 8 : Energieströme : Vergleich Fördergesuch, Periode 1998/99, Periode 2000

<b><u>WÄRME</u></b>		Prognose gemäss Fördergesuch	Periode 1.6. 98 bis 31.5. 99	Periode 1.1. 00 bis 31.12. 00
<b>Abwärme Ofen = Input Total</b>	<b>MWh/a</b>	<b>31'788</b>	<b>32'215</b>	<b>28'972</b>
Schlammvorwärmung	MWh/a	0	12'003	0
Rauchgastrocknung	MWh/a	0	9'935	3'626
Nutzung ARA-intern	MWh/a	2'000	2'369	2'384
Notkühler	MWh/a	0	7'908	0
Einspeisung	MWh/a	29'788	0	22'962
<b>Output Total</b>	<b>MWh/a</b>	<b>31'788</b>	<b>32'215</b>	<b>28'972</b>

Die detaillierte Berechnungsübersicht ist den Anhängen 18, 19 und 23 zu entnehmen.

## 7.3 Strombilanz

Die Mess- und Berechnungswerte der in **Kapitel 6.1.2** aufgeführten Kenngrössen sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle 9 : Elektrischer Energiebedarf : Vergleich Fördergesuch, Periode 1998/99, Periode 2000

<b><u>STROM</u></b>		Prognose gemäss Fördergesuch	Periode 1.6. 98 bis 31.5. 99	Periode 1.1. 00 bis 31.12. 00
Verfahren Schlammbehandlung	MWhel/a	kein Wert vorhanden	8'178	8'174
Wärmeverteilung ARA-intern (1)	MWhel/a	kein Wert vorhanden	88.6	3.24
Energiezentrale für Wärmeauskopplung	MWhel/a	402	0	96.3

**Legende :**

1) : Der Berechnungsweg ist Anhang 10 zu entnehmen

## 7.4 Interpretation der Ergebnisse

### 7.4.1 Wärme

Ein Vergleich der Periode 98/99 mit der Periode 2000 aus Tabelle 6 und Tabelle 8 zeigt, dass im 1. Betriebsjahr nach Realisierung des Projektes „Abwärmenutzung“ weniger Schlamm verbrannt wurde und demzufolge auch weniger Abwärme zur Verfügung stand. Eine lineare Normierung der Periode 1998/99 sowie der Prognose gemäss Fördergesuch auf den Stand 2000 unter Berücksichtigung der erhöhten Stützenergiebedarfes infolge Stilllegung der Schlammvorwärmung in 2000 führt zur nachfolgenden Übersicht.

Tabelle 10 : Normierte Energieströme gemäss Tabelle 8

<b>WÄRME</b>		Prognose gemäss Fördergesuch <b>linear normiert</b>	Periode 1.6. 98 bis 31.5. 99 <b>linear normiert</b>	Periode 1.1. 00 bis 31.12. 00
<b>Abwärme Ofen = Input Total</b>	<b>MWh/a</b>	<b>28'972</b>	<b>28'972</b>	<b>28'972</b>
Schlammvorwärmung	MWh/a	0	10'795	0
Rauchgastrocknung	MWh/a	0	8'935	3'626
Nutzung ARA-intern	MWh/a	2'000 nicht normiert	2'369 nicht normiert	2'384
Notkühler	MWh/a	0	6'873	0
Abwärmenutzung = Einspeisung	MWh/a	26'972	0	22'962
<b>Output Total</b>	<b>MWh/a</b>	<b>28'972</b>	<b>28'972</b>	<b>28'972</b>
Erhöhter Stützenergiebedarf	MWh/a	-4'417		-4'417
<b>Abwärmenutzung netto</b>	<b>MWh/a</b>	<b>22'555</b>	<b>0</b>	<b>18'545</b>

Tabelle 10 zeigt, dass durch die Realisierung des Projektes Abwärmenutzung im 1. Betriebsjahr 18'545 MWh/a an emissionsfreier Wärmeenergie bereitgestellt werden konnte.

### 7.4.2 Strom

Der in Tabelle 9 dargestellte Strombedarf für das „Verfahren Schlammbehandlung“ ist der eigentlichen Entsorgungsaufgabe der ProRhenon zuzuordnen und wird nicht beeinflusst durch das vorliegende Projekt.

Ein Vergleich der Periode 98/99 mit der Periode 2000 aus Tabelle 6 und Tabelle 8 zeigt, dass im 1. Betriebsjahr nach Realisierung des Projektes „Abwärmenutzung“ lediglich ein Mehrbedarf an elektrischer Energie von 10'940 kWh/a vorliegt. Dies

ist darauf zurückzuführen, dass parallel die Einrichtungen für die Wärmeverteilung der ARA-internen Wärmemenge saniert wurden.

Im Vergleich zum Fördergesuch werden sogar nur 24% der prognostizierten Strommenge für die Abwärmenutzung benötigt.

## 7.5 Bewertung der Abweichungen von den Zielgrössen

Das nachfolgende Diagramm zeigt graphisch den Zielerreichungsgrad des Projektes im Vergleich zum Fördergesuch (Grundlage Tabelle 10).

### Zielerreichungsgrad

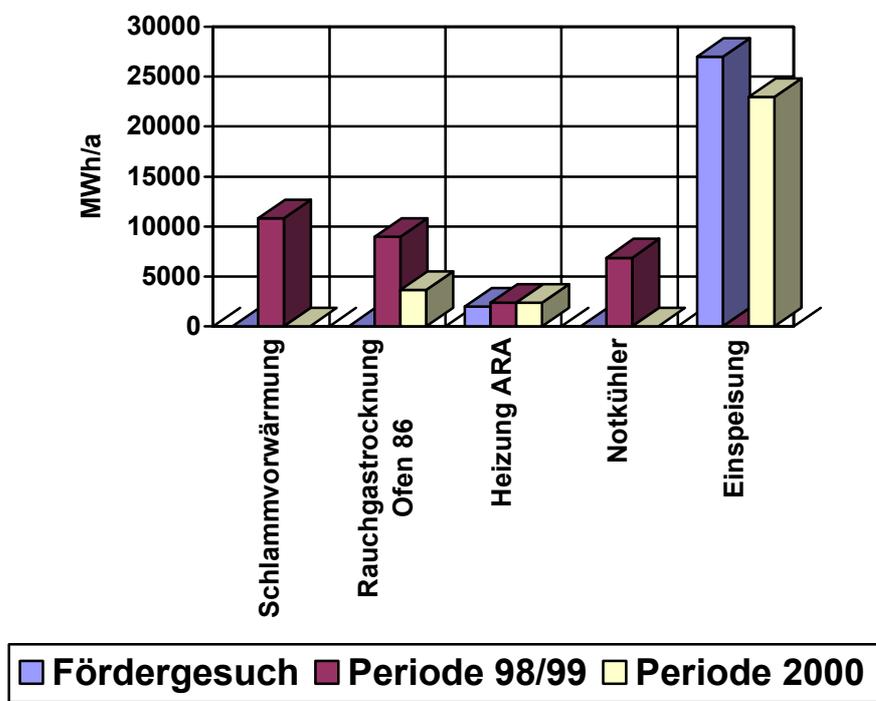


Diagramm 1 : Zielerreichungsgrad Abwärmenutzung

Für die Periode 2000 können folgende Aussagen gemacht werden.

Schlammvorwärmung :

Die komplette Stilllegung der Schlammvorwärmung wurde zu 100% erreicht.

Wärmeabfuhr über Notkühler :

In Tabelle 8 und Tabelle 10 sowie in den dazugehörigen Anhängen wurde vorausgesetzt, dass in der Periode 2000 keine Wärme über die Notkühler abgeführt werden musste. Aufgrund notwendiger Revisionsarbeiten am Heisswasserkreis (Betriebsunterbrüche) waren die Notkühler jedoch kurzfristig in Betrieb. Eine grobe Abschätzung der über die Notkühler abgeführten Energiemengen ist in Anhang 25 dargestellt. Es zeigte sich, dass die Abwärmenutzung während ca. 358 Stunden nicht oder nur teilweise in Betrieb war. Hierbei wurden ca. 536 MWh über die Notkühler abgeführt. Diese Energiemenge ist in den Bilanzen des Berichtes nicht aufgeführt, und müsste strenggenommen zur Abwärmenutzung-netto des Jahres 2000 (Tabelle 10) addiert werden. Eine Dokumentation der Betriebsstörungen inkl. Beurteilung der Anlagenverfügbarkeit sowie eine exakte Quantifizierung der Verlustwärme wird mit dem Schlussbericht nachgereicht.

Heizung ARA (intern) :

Der interne Wärmebedarf der ARA-Basel ist noch 19% höher als im Fördergesuch prognostiziert. Die Ursache liegt darin begründet, dass bis dato noch keine Sanierungsmassnahmen bei den dezentralen Wärmebezüglern durchgeführt wurden. Ein Vergleich der beiden Betrachtungsperioden zeigt ein fast identischen Wärmebedarf. Normiert man jedoch die Verbrauchszahlen für die Gebäudeheizung mit dem 10-jährigen Durchschnittswert der Heizgradtage ( $HGT_{10a}=2'975$ ; siehe Anhang 24) so zeigt sich, dass in der Periode 2000 ( $HGT=2'615$ ) der Bedarf bei 2'615 MWh/a liegt, in der Periode 1998/99 ( $HGT=3'027$ ) der Bedarf lediglich bei 2'337 MWh/a lag. Von den 278 MWh/a des Mehrbedarfs entfallen 178 MWh/a auf die Tankheizung. Nach Aussagen der Betriebsleitung der ProReno war die Wärmeversorgung der Tankanlage vor der Projektrealisierung ungenügend, d.h. das vorliegende Temperaturniveau befand sich an der untersten Grenze. Eine objektive Begründung für den Anstieg des Wärmebedarfes Gebäudeheizung um 100 MWh/a gibt es keine.

Rauchgastrocknung :

Für die Rauchgastrocknung des Ofens 86 wurde in 2000 noch die Energiemenge von 3'626 MWh/a benötigt. Dies entspricht ca. 40% der ursprünglich benötigten Menge. Eine vollständige Aufhebung der RG-Trocknung wurde nicht erreicht.

Bei Antragstellung ist davon ausgegangen worden, dass eine Rauchgaskondensation in Kauf genommen wird und deshalb auf eine Trocknung verzichtet werden kann. Das Kondensat sollte abgeführt werden, Schäden am bestehenden Kaminzug wurden nicht erwartet. Detailliertere Betrachtungen in jüngster Vergangenheit zeigten, dass das Risiko von Korrosionserscheinungen infolge Kondensation im Kaminzug nicht eingegangen werden kann. Bei der

vorliegenden Rauchgaszusammensetzung ist das verwendete Material der Kaminzüge nicht resistent gegen anfallendes Kondensat.

Der Grad der Rauchgastrocknung wurde in einem ersten Schritt reduziert, was durch die vorliegenden Zahlen bestätigt wird. Es ist vorgesehen die Rauchgastemperatur bis in die Nähe des Taupunktes weiter abzusenken.

Abwärmenutzung – Einspeisung :

Der prognostizierte Wert der Abwärmenutzung (26'972 MWh/a) konnte im Betriebsjahr 2000 zu 85% (22'962 MWh/a) erreicht werden.

Berücksichtigt man ausserdem die wegen Betriebsunterbrüche der Abwärmenutzung über die Notkühler abgeführte Energiemenge von 536 MWh/a, so wurde sogar 87% der im Fördergesuch prognostizierten Energiemenge erreicht.

## 8. NOCH OFFENE PROBLEME / POTENZIALE

Die Rauchgastrocknung der drei Schlammöfen weist ein noch nicht genutztes Einsparpotenzial auf. Die Betriebsleitung der ProRhenon hat sich zum Ziel gesetzt, die Rauchgastrocknung soweit zu reduzieren, dass am Kaminaustritt gerade kein Kondensat anfällt. Es ist beabsichtigt, am oberen Ende der Kaminwand einen Temperaturfühler zur Messung der Rauchgastemperatur zu installieren. Dieser Fühler liefert den IST-Wert zur Regelung der Rauchgastrocknung.

Bei einer Reduktion der Rauchgastemperatur bis knapp oberhalb des Taupunktes ergeben sich folgende Einsparpotenziale :

Ofen 66 :	600 kW
Ofen 67 :	600 kW
Ofen 86 :	100 kW

Bei der Auslegung der Thermoöl-Heisswasser-Wärmetauscher zur Transformation der Energie ins Fernwärmenetz wurde nicht davon ausgegangen, dass die Abwärme aus der Rauchgastrocknung der Ofenlinie 66 und 67 genutzt wird, da die Aufheizung der Trocknungsluft direkt im Rauchgasstrom erfolgt.

Eine Nutzung dieser Abwärme setzt voraus, dass die Leistung mit den bestehenden Thermoöl-Heisswasser-Wärmetauschern übertragen werden könnte. Die effektiven Leistungsreserven können zur Zeit nicht explizit angegeben werden.

**9. VERZEICHNIS TABELLEN UND DIAGRAMME**

<b>Nr.</b>	<b>Titel Tabellen</b>
1	Abwärmepotenzial Schlammverbrennung
2	Verzeichnis der Messtellen (Wärmezähler) von Anhang 6 und 7
3	Definition und Herkunft der Parameter der Energiebilanz Wärme
4	Definition und Herkunft der Parameter der Energiebilanz Strom
5	Auslegungswerte der Schlammverbrennungsöfen
6	Ofenbilanz Periode 1998 / 99 resp. 2000
7	Normierte Ofenbilanz für Periode 1998 / 99
8	Energieströme: Vergleich Fördergesuch, Periode 1998 / 99, Periode 2000
9	Elektrischer Energiebedarf: Vergleich Fördergesuch, Periode 1998 / 1999, Periode 2000
10	Normierte Energieströme gemäss Tabelle 8

<b>Nr.</b>	<b>Titel Diagramme</b>
1	Zielerreichungsgrad Abwärmenutzung
2	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 2000) - Ofen 66
3	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 2000) - Ofen 67
4	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 2000) - Ofen 86
5	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 98 / 99 ) - Ofen 66
6	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 98 / 99 ) - Ofen 67
7	Betriebszeit und verbrannte Schlammmenge / Tag (Jahr 98 / 99 ) - Ofen 86

**10. SYMBOLVERZEICHNIS**

Index	Symbol	Einheiten	Erläuterung
66			Ofen 66
67			Ofen 67
86			Ofen 86
		a	Jahr
Abw			Abwärme (Techn. Installationen für die Abwärmenutzung)
ALM			Abfalllösungsmittel
ARA-int.			ARA intern (Einrichtungen Wärmeverteilung in Zentrale)
BG			Betriebsgebäude
		d	Tag
el.			elektrische (Energie)
		g	Gramm
GH			Gebäudeheizung
		°C	Grad Celsius
HEL			Leichtöl
	HGT		Heizgradtage
HW			Heisswasser (Wärmeübertragung von Thermoöl auf...)
HWK			Hohlwellenkühlung
HZI			Gesamtwärmemenge für Tank- und Gebäudeheizung
INPUT			Input Energie Schlammverbrennung
IWB			Wärmeeinspeisung im IWB-Netz
	IWB		Industrielle Werke Basel
Kamin			Kamin: Austritt in Umgebung
		kg	Kilogramm
		kWh	Kilowattstunde
		ltr	Liter
	M		Massenstrom
	MWh		Megawattstunde
N			nach der Realisierung des vorliegenden Projektes
NK			Notkühler

Index	Symbol	Einheiten	Symbolverzeichnis	
OUTPUT	PLS	Q	Output Energie Schlammverbrennung	
			Prozessleitsystem der ARA Basel	
			Energie	
RG			Rauchgas (Austritt Ofen) Heiss	
RG'			Rauchgas abgekühlt	
RGR			Rauchgasreinigung	
RGT			Rauchgastrocknung	
SB			Schlammbehandlung (gesamte Verfahrenstechnik)	
SCH			Schlamm	
SÖL			Schweröl	
TH			Tankheizung	
			to	Tonnen
tot.			Total	
TÖL			Thermoöl	
TS	TS	Trockensubstanz		
V		vor der Realisierung des vorliegenden Projektes		
VW		Vorwärmung		
Wärme-1		Wärmestrom: nutzbare Abwärme		
Wärme-2		Wärmestrom: nicht nutzbare Abwärme (projektbezogen)		
WL		Wirbelluft		
WV		Wärmeverteilung		
	WZ		Wärmezähler dezentral	
		X	Wassergehalt	

**11. LITERATURVERZEICHNIS**

Nr.	Quellenangabe Literatur
[1]	W. Roth, Binningen vom 16.04.98 rev. 27.04.98 "Schlammvorwärmung, Experimentelle Untersuchung zur Frage: Führt die Vorwärmung zu höherem TS-Gehalt und damit zu kleinerem Brennstoffverbrauch?", Seite 4
[2]	W. Roth, Binningen vom 31.08.97 "Verbesserte Nutzung der Ueberschusswärme der Verbrennungsöfen der ProRhen", Seite 17 und 18
[3]	W. Roth, Binningen vom 20.01.2000 "Reduzierte Rauchgastrocknung und die thermischen Zustände im Kaminzug des Ofens 86", Seite 8
[4]	Persönliche Mitteilung von W. Roth, Binningen, Juli 2000

**12. ANHANG**

<b>Nr.</b>	<b>Titel Anhang</b>
1	Verfahrensschema Thermoölsysteme Ofen 66, 67, 86
2	Anlagenbeschreibung / Massnahmenkatalog
3	Verfahrensschema ARA Basel Periode 1998 / 99
4	Verfahrensschema ARA Basel inkl. Abwärmenutzung (Einbindung in Thermoölkreis) Periode 2000
5	Situation Fernwärme-Anbindung : ARA Basel - IWB-Netz Schäferweg
6	Loggerdatenprotokoll Periode 1998 / 99. Gesamtwärmebezug ARA - intern und Aufteilung Gebäudeheizung
7	Loggerdatenprotokoll Periode 2000. Gesamtwärmebezug ARA - intern und Aufteilung Gebäudeheizung sowie Abwärmenutzung Thermoölsystem
8	Gesamtenergieflussbilder Schlammverbrennung (qualitativ)
9	Energieflussbilder der Bilanzgrenze Abwärmenutzung (qualitativ)
10	Elektrischer Energiebedarf für technische Einrichtungen zur Wärmeverteilung ARA - intern. Periode 1998/99 sowie 2000
11	Semesterberichte "Verbrannte Schlammmenge" inkl. Kennzahl "Trockensubstanz"
12	Verbrannter Schlamm (Periode 98 / 99) je Schlammofen
13	Verbrannter Schlamm (Periode 2000) je Schlammofen
14	Energien Schlammbehandlung (Schweröl, Leichtöl, ALM, Elektr. Energie)
15	Diagramm 2
16	Diagramm 3
17	Diagramm 4
18	Energiebilanz Wärme (Periode 2000) exkl. Schlammkorrektur (1. Iterationsschritt)
19	Energiebilanz Wärme (Periode 2000) inkl. Schlammkorrektur
20	Diagramm 5
21	Diagramm 6
22	Diagramm 7
23	Energiebilanz Wärme (Periode 1998 / 99) inkl. Schlammkorrektur
24	ARA - interner Wärmebedarf - heizgradtagbereinigt
25	Abschätzung Betriebszeit Notkühler (Jahr 2000)

**GRUNeko AG**  
*Ingenieure für Energiewirtschaft*

*(G. Oppermann)*

*(H. Fath)*