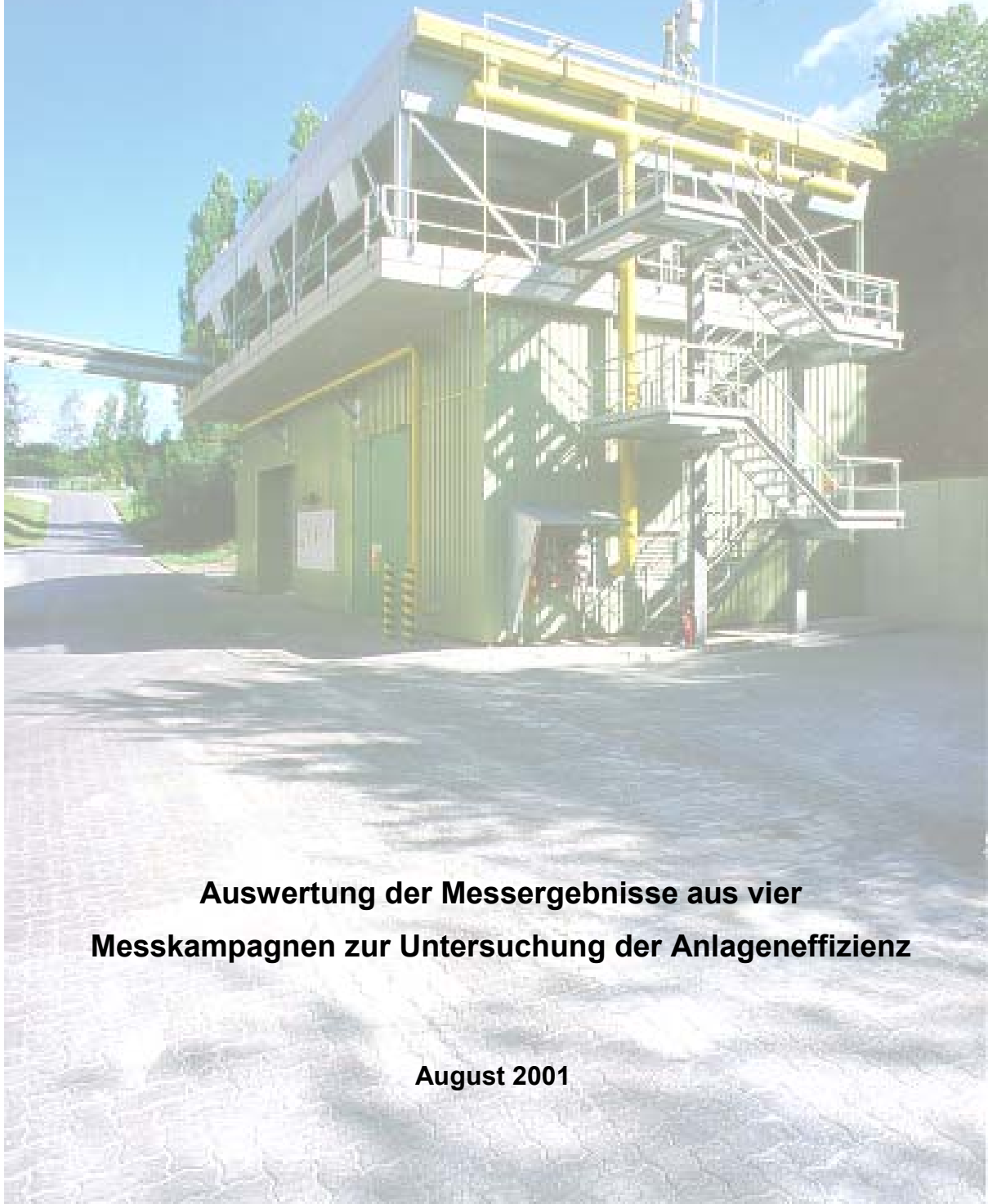




**Niedertemperaturverstromung mittels
einer ORC-Anlage
im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG**



**Auswertung der Messergebnisse aus vier
Messkampagnen zur Untersuchung der Anlageneffizienz**

August 2001



Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

Auftragnehmer: Heidelberg Zement AG
Berliner Str. 6
69120 Heidelberg

Heidelberg Zement Group
Technology Center GmbH
Pleikartsförster Straße 99
69124 Heidelberg

Kooperation mit: Heidelberg Zement AG
Werk Lengfurt
Homburger Str. 41
97855 Triefenstein

Bearbeitungszeitraum: November 1999 bis August 2001

© Deckblattfoto: Heidelberg Zement AG

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
86177 Augsburg

Das Amt gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen

Vorwort

Ziel der Maßnahme war die Errichtung einer Stromerzeugungsanlage unter Verwertung der Niedertemperaturabwärme der Kühlerabluft am Klinkerkühler der Ofenanlage des Zementwerkes Lengfurt der HEIDELBERGER ZEMENT AG.

Bei diesem Vorhaben handelt es sich um ein Pilotprojekt, bei welchem erstmalig in einem Zementwerk das ORC-Verfahren (**O**rganic **R**ankine **C**ycle) zur Verstromung von Niedertemperaturabwärme Anwendung findet.

Wegen des innovativen Charakters wird das rd. 7,88 Mio. DM teure Vorhaben mit Fördermitteln des Bundes (2,71 Mio. DM) finanziell unterstützt. Im Auftrag des Landes Bayern (Landesamt für Umweltschutz) wurden daneben über einen Zeitraum von einem Jahr insgesamt vier Messkampagnen durch das Heidelberger Technology Center durchgeführt.

Gegenstand des Auftrages im Wert von DM 514.000 war neben den umfangreichen Einzelmessungen auch der vorliegende Abschlussbericht über die Langzeiterfahrungen mit der ORC-Anlage im Werk Lengfurt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Vereinbarte inhaltliche Ausgestaltung des Schlussberichtes	4
1.0.0 Projektbeschreibung	6
1.1.0 Vorhabensziele	6
1.2.0 Projektinitiierung	6
2.0 Dokumentation und wissenschaftliche Auswertung der verwendeten Literatur	9
2.0.0 Anlagenbeschreibung Klinkerbrennbetrieb	9
2.1.0 Wärmetauscheranlage	9
2.2.0 Bypass-Anlage	10
2.3.0 Drehofenanlage	10
2.4.0 Klinkerkühler	10
2.5.0 Feuerungen	11
2.5.1 Hauptfeuerung (ofenauslaufseitig)	11
2.5.2 Zweitfeuerung (ofeneinlaufseitig)	12
2.6.0 Entstaubungsanlagen und NO _x -Minderung	12
2.6.1 Wärmetauscheranlage	12
2.6.2 Bypassanlage	13
2.6.3 Klinkerkühleranlage	13
2.6.4 NO _x -Minderung	14
2.7.0 Brennstoffeinsatz	14
2.8.0 Abgasverwertung	15
2.9.0 Energieeinsatz/-versorgung	15
2.9.1 Energiebedarf	15
2.9.2 Energieversorgung	16
2.9.2.1 Elektrische Energie	16
2.9.2.2 Brennstoff Energie	17

3.0.0 Anlagenbeschreibung Abwärmekraftwerk	18
3.1.0 Abwärmequelle	19
3.2.0 Wärmetauscher	20
3.2.1 Abhitzeessel	21
3.2.2 Abluft-Bypass zur Umgehung des Abhitzeessels	23
3.2.3 Wärmeträgeröl-Anlage	23
3.2.4 Wärmeträgermedium	24
3.3.0 ORC-Anlage	25
3.3.1 Pentan Verdampfer und –Vorerhitzer	25
3.3.2 Turbine	27
3.3.3 Generator	28
3.3.4 Treibmedium (Pentan)	29
3.4.0 Luft-Kondensator	30
3.5.0 Überwachungseinrichtung	31
3.6.0 Mess- und Regelungskonzept	32
3.6.1 Klinkerkühler	32
3.6.2 Abhitzeessel und Wärmeträgerölkreislauf	33
3.6.3 ORC-Anlage und Pentrankreislauf	34
4. Angewandte Wissenschaftliche Methodik der Messkampagnen	36
4.1 Angewandte wissenschaftliche Methodik der Ofenversuche	36
4.2 Mess-Programm Stromerzeugungs-Anlage	40
5. Versuchsdurchführung und –ergebnisse	42
5.1 Umfang der Versuche	42
5.2 Versuchsdurchführung	42
5.2.1 Versuchsziele	42
5.3.0 Versuchsergebnisse	46
5.3.1 Betriebswerte Klinkerkühler, Abhitzeessel und Wärmeträgeröl- Kreislauf	46
5.3.2 Zusammenfassende Bewertung der Betriebsdaten – Klinkerkühler, ORC-Anlage	48
5.3.2.1 Einzelbewertung der Versuche	50

5.3.3	Betriebswerte der ORC-Anlage und des Kühlkreislaufs	54
5.3.4	Betriebswerte Stromerzeugung	55
5.3.5	Zusammenfassende Bewertung der Strombilanzierung	56
5.3.5.1	Strombilanzierung – Einzelbewertung der Versuche	57
5.3.6	Bewertung der Energiebilanz	58
5.3.6.1	Brennstoffenergie	58
5.3.6.2	Elektrische Energie	59
5.3.6.3	Energieeffizienz	61
5.3.7	Wärmebilanzen der Einzelversuche und der Auslegung	64
5.3.7.1	Versuch 1	64
5.3.7.2	Versuch 2	65
5.3.7.3	Versuch 3	66
5.3.7.4	Versuch 4	67
5.3.7.5	Versuchsdurchschnitt	68
5.3.7.6	Blockbilddarstellung der Ergebnisse	69
5.4	Gesamtbewertung der Installation	75
5.4.1	Technische Kriterien	75
5.4.2	Emissionsseitige Kriterien	77
5.4.3	Wirtschaftliche Kriterien	78
6.	Optimierungspotential	80
7.	Übertragbarkeit	83
7.1	Bedeutung und Übertragbarkeit der ORC-Technik für Anlagen der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie	83
7.2	Nutzung der ORC-Technik in anderen Industriezweigen	86
8.	Zusammenfassung und Ergebnisfeststellung	88
9.	Literaturverzeichnis	90

1. Vereinbarte inhaltliche Ausgestaltung des Schlussberichtes

Im Rahmen des Vorhabens „Nutzung von Abwärme in genehmigungsbedürftigen Anlagen“ wurden am Standort Lengfurt der Firma Heidelberger Zement AG (Bilanz-) Messungen an Produktionsanlagen und insbesondere an einer Anlage zur Niedertemperatur-Abwärmenutzung (**O**rganic-**R**ankine-**C**ycle-Anlage) ausgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Optimierung des Betriebes der Verstromungsanlage, der Nachweis über die Wirksamkeit des Konzepts mit belastbaren Daten sowie die Prüfung der Übertragbarkeit des ORC-Konzeptes auf vergleichbare und auch andere Anlagentypen. Im folgenden werden die Schwerpunkte dieses Berichtes gemäß der Vertragsgrundlage zwischen dem Landesamt für Umweltschutz und der Heidelberger Zement AG zusammenfassend beschrieben.

- Beim vorliegenden Konzept wird der Wärmestrom aus der gereinigten Abluft des Klinkerkühlers nach Drehofen über einen Abhitzeessel mit nachgeschaltetem ORC-Prozess mittels Turbine und Generator verstromt. Die Erhebung von Messdaten begann nach Installation, Inbetriebnahme und erfolgter Abnahme der ORC-Anlage gemäß DIN 1942. Die Abnahmemessung, mit einer erwarteten Strommenge von ca. 1,5 MW (brutto) im Dauerbetrieb, wurde vor Beginn des vereinbarten Messprogramms, bestehend aus vier Messkampagnen, durchgeführt.
- Die Erhebung von Messdaten erfolgte mit unterschiedlichen Eingangsvoraussetzungen, um das Leistungsverhalten der ORC-Anlage zu ermitteln. Es waren Messungen bei verschiedenen Betriebszuständen und verschiedenen Tages- und Jahreszeiten durchzuführen und statistisch und graphisch auszuwerten.
- Untersuchungen (Erhebung und Auswertung der Messdaten) an der Ofenanlage waren gemäß dem VDZ-Merkblatt VT10 (Auswertung von Drehofenuntersuchungen) und an der Stromerzeugungsanlage gemäß DIN 1942 (Abnahmeversuche an Dampferzeugern) durchzuführen.

- Die technischen, emissionsseitigen und wirtschaftlichen Kriterien bzw. Voraussetzungen für eine Abwärmenutzung durch die ORC Technologie waren anhand der Messergebnisse herauszuarbeiten. Der Einsatz der ORC Technologie zur Verstromung von Abwärme im Zementwerken war für bestehende Anlagen sowie für Neuanlagen zu bewerten.
- Die in den Untersuchungen erzielten Messdaten sind detailliert in diesem Schlussbericht enthalten und in Form von Bilanzen dargestellt und bewertet. Der Klinkerkühler und das Ofensystem sind – aufgrund der Bedeutung für die Wirksamkeit der ORC-Anlage – durch Mess- und Anlagendaten detailliert beschrieben.
- Optimierungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung der Verstromungsanlage sind lokalisiert und beschrieben.
- Messprogramm, Berichte und Einzelauswertungen der vier Messkampagnen sowie ein detaillierter Zeitplan liegen dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz vor.

1.0.0 Projektbeschreibung

1.1.0 Vorhabensziele

Mit dem Vorhaben werden im Einzelnen folgende Ziele verfolgt:

1. Erzeugung von netto 1,13 MW elektrische Energie aus Niedertemperatur-abwärme.
2. Deckung des Eigenbedarfs an Strom bis 12 %, der für die Herstellung von Zement benötigt wird.
3. Sicherung eines Know-how Vorsprungs in dieser Technologie durch Planung und Betrieb der Anlage.
4. CO₂-Reduzierung der strombedingten CO₂-Emissionen durch reduzierten Strombezug aus dem öffentlichen Netz um ca. 7.000 t/a.
5. Erlangung einer höheren Flexibilität bei Strombezug während der Hoch-Tarif-Zeiten.

Die Maßnahme stellt damit insgesamt eine bedeutsame Optimierungsaufgabe für den Zementherstellprozess und für die Umwelt dar.

1.2.0 Projektinitiierung

Die Verstromung von Abwärme stellt für die Zementindustrie an sich kein Novum dar. Schaut man in die Geschichte der Zementindustrie, u.a. auch des Zementwerkes Lengfurt, zurück, so wurden bis zur Einführung der wärmesparenden Wärmetauscher-Technologien in vielen Ofenanlagen die Abgase der Drehöfen direkt in Dampfkraftwerken verstromt.

Aufgrund der mit den niedrigen Abgastemperaturen der vier- und mehrstufigen Wärmetauscheranlagen oder Lepolrostanlagen verbundenen erzielbaren schlechten Wirkungsgrade für Dampfprozesse geriet diese Art der Abwärmee-nutzung in der Zementindustrie wegen fehlender Wirtschaftlichkeit in Vergessenheit.

Erst mit der Ölkrise in den 70-er Jahren wurde vereinzelt immer wieder versucht, die anfallende Niedertemperaturabwärme der Wärmetauscherabgase und der Kühlerabluft, aber auch die Hochtemperaturabwärme von Bypassabgasen neben der üblichen Verwertung zu Trocknungszwecken auch zur Verstromung, zur Gebäudebeheizung oder Warmwasseraufbereitung zu nutzen.

Für die Verstromung der Hochtemperaturabwärme von Bypass-Abgasen sind bis heute noch keine betrieblich sicheren Verfahren entwickelt worden, bei welchen die von den hoch alkali- und chloridhaltigen Bypass-Abgasen umströmten Wärmeübertragungsflächen des Wärmetauschers in Temperaturbereichen von über 350°C frei von Ansätzen bleiben.

Hingegen wurden für die Wärmetauscher- und Kühlerabluftabgase mehrere Verstromungsanlagen in Japan errichtet. Hier werden seit 15 Jahren ca. 16 Turbinen betrieben. Bei einer mittleren Abgastemperatur von 395°C und einer mittleren Klinkerkühlerablufttemperatur von 285°C haben diese Anlagen eine Stromausbeute, die etwa einer spezifischen Stromerzeugung von 32 kWh/t Klinker entsprechen, d.h. ca. 1/3 des insgesamt für die Erzeugung von Portlandzement benötigten elektrischen Energiebedarfs.

Gleiche Überlegungen wie in Japan gab es in der deutschen und schweizerischen und sicherlich auch in der übrigen westeuropäischen Zementindustrie.

Heute wird in Deutschland (Werk Dotterhausen) nur noch eine Anlage betrieben, die wegen der besonderen Rohstoffsituation dieses Werksstandortes eine für die Zementindustrie einmalig günstige Ausgangsposition besitzt.

Bei der Heidelberger Zement AG reichen ebenfalls die ersten Überlegungen, die im Werk Lengfurt nicht genutzte Abwärme zu verstromen, in die 70er Jahre zurück.

Erst die Untersuchungen, die Niedertemperaturabwärme nach dem s.g. ORC-Verfahren zu verstromen, brachten den Durchbruch. Dieses Verfahren, das auf den Clausius-Rankine-Prozess zurückgeht, basiert im wesentlichen darauf, dass anstelle des Treibmediums „Wasserdampf“ ein organisches Treibmedium verwendet wird, das bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen verdampft als Wasser. Diese Technologie ist an sich in ihren Grundsätzen beim linksläufigen Carnot-Prozess der Kältemaschinen-Technologie bereits seit langem erfolgreich erprobt.

Bisheriges Haupteinsatzgebiet der ORC-Technologie ist die Verstromung geothermischer Heißquellen in mehr als 300 Anlagen, hauptsächlich in Italien, USA, Neuseeland und Island. Die Nutzung des Verfahrens in einem Zementwerk stellt demgegenüber eine Weltneuheit dar.

Nach erneuten Voruntersuchungen beim Heidelberger Technology Center und Gesprächen mit dem Umweltbundesamt Berlin in den Jahren 1994 bis 1996 wurde seitens der Heidelberger Zement AG 1997 beschlossen, das ORC-Verfahren in einer Prefeasibility Studie einer genaueren Untersuchung zu unterziehen und bei Vorliegen einer wirtschaftlichen Basis in einer großtechnischen Pilotanlage auch zu realisieren.

Gute Voraussetzung für die Realisierung eines solchen Vorhabens bot das Zementwerk Lengfurt, wo man für eine mögliche Weiternutzung der anfallenden Klinkerkühlerabluft bei der Sanierung der Kühlerabluftentstaubung im Jahre 1994 einen Heißelektrofilter installiert hatte.

2.0 Dokumentation und wissenschaftliche Auswertung der verwendeten Literatur

Die Anlagenkonzeption der ORC-Anlage im Kontext des Gesamtsystems Ofenanlage, Werk Lengfurt wird im folgenden ausführlich beschrieben. Die verwendete Literatur ist eingearbeitet und im Literaturverzeichnis aufgeführt. Die Ausführungen in diesem Kapitel werden durch die technische und wirtschaftliche Anwendbarkeit der ORC-Technologie in andere industrielle Bereiche in Kapitel 7 „Übertragbarkeit“ ergänzt.

2.0.0 Anlagenbeschreibung Klinkerbrennbetrieb

Im Zementwerk Lengfurt wird eine Ofenanlage nach dem Trockenverfahren betrieben. Zur Entlastung von Chloridkreisläufen ist ein Chlorid-Bypass integriert. Zur Kühlung des Zementklinkers und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ist ein Kombi-Rostkühler nachgeschaltet. Die Anlage wurde in ihren wesentlichen Bestandteilen im Jahre 1970 errichtet, in den Jahren 1991-1993 dem aktuellen Stand der Technik angepasst und ist für eine Nennleistung von 3150 t/d Zementklinker ausgelegt.

2.1.0 Wärmetauschanlage

Die Wärmetauschanlage besteht aus einem 4-stufigen Zweistrang-Zyklonwärmetauscher konventioneller Bauart. Die ca. 350°C heißen Abgase des Wärmetauschers werden im Verbundbetrieb den Mahltrocknungsanlagen zugeführt.

Lieferant	KHD
Baujahr	1970
Typ	Z 3356

2.2.0 Bypass-Anlage

Die Bypass-Anlage besteht aus einer stehenden Mischkammer, die der Einlaufkammer, zwischen den Steigschächten des Wärmetauschers, zugeordnet ist. Ausgelegt ist die Mischkammer für eine Bypassrate von 5%. Die Bypassabgase werden durch Zwangskühlluft von ca. 1100°C auf ca. 350°C konditioniert.

Lieferant	KHD	
Baujahr	1970	
Typ	stehende	Mischkammer mit Luftkonditionierung

2.3.0 Drehofenanlage

Die Ofenanlage besteht aus einem auf drei Laufringstationen gelagerten Drehofen. Der Antrieb erfolgt über einen Doppelritzelantrieb:

Lieferant	KHD
Baujahr	1970
Länge x Durchmesser	78 x 5,2 m

2.4.0 Klinkerkühler

Der bis zu 1450°C heiße Klinker wird in einem 3-Stufen-Rostkühler mit Luft auf eine Endtemperatur von ca. 100–150 °C heruntergekühlt. Auf dem Bild Nr. 2, Seite 17, ist die Situation am Klinkerkühler im Detail vor der Installation der Stromerzeugungsanlage zu sehen. Der mit Klinkerstaub beladene Kühler-Abluftstrom wird, bevor er über den Kamin in die Atmosphäre gelangt, in einem Heiß-Elektrofilter gereinigt.

Über 70 % der von der Kühlluft aufgenommenen Wärme (mit einem Wärmeinhalt von ca. 60 MW) werden dem Ofensystem als vorgewärmte Verbrennungsgase zugeführt und damit energetisch zurückgewonnen. Die restliche Kühlluft wird als die s.g. Mittenluft mit 300°C und als Kühlerabluft 275°C, mangels Bedarf, nach Entstaubung in einem Heiß-Elektrofilter nicht weiter genutzt.

Lieferant	CPAG
Baujahr	1970
	modifiziert:
	1992 – Rost 1 mit 12 Reihen Direktbelüftung;
	1993 – Sanierung Rost 2 und Walzenbrecher zwischen Rost 2 und 3.
Typ:	Kombi-Rost CP-Kombi 1025/1229/1229
Anzahl Stufen	3
Installierte Kühlluftleistung	250.000 Nm ³ /h
Anzahl Kammern	6
Rostfläche je Stufe	22,8/31,68/31,68 m ²

Wesentliche Umbauten zur Erhöhung des Kühlerwirkungsgrades am Klinkerkühler wurden in 1992 und 1993 durchgeführt (s.o.).

2.5.0 Feuerungen

2.5.1 Hauptfeuerung (ofenauslaufseitig)

Hauptbrenner:

Lieferant	Pillard
Baujahr	87/91
Typ	KB 316 3-Kanal
Primär-Brennstoffe	Petrolkoks, Steinkohle Altöl

Sekundärbrennstoffe und Hilfsstoffe:

1. Kunststoffe

Aufgabe über separaten Brenner am Ofenkopf.

2. Papierreststoffe

Aufgabe im Bereich Klinkerfallschacht.

2.5.2 Zweitfeuerung (ofeneinlaufseitig)

1. Altreifen:

PKW-Altreifen über Reifenschurre

Aufgabe über Schurre in den Gassteigeschacht.

LKW-Altreifen über Reifenschurre

Aufgabe über Schurre in die Einlaufkammer.

2. Gießereialtsande über Pendelklappensystem

Aufgabe am Steigschacht

2.6.0 Entstaubungsanlagen und NO_x-Minderung

2.6.1 Wärmetauscheranlage

Die Entstaubungseinrichtung der Wärmetauscheranlage ist mit den Mahltrocknungsanlagen und dem Heißelektrofilter der Bypass-Anlage zusammengeschaltet.

Im Verbundbetrieb werden die Abgase zur Mahltrocknungsanlage geführt und anschließend im Elektrofilter entstaubt. Im Direktbetrieb werden die Abgase in einem Verdampfungskühler auf eine Temperatur von ca. 150°C konditioniert und hiernach dem Elektrofilter zugeführt.

Der im Elektrofilter abgeschiedene Staub wird (als Ofenmehl über den Wärmetauscher) dem Klinkerbrennprozess wieder zugeführt.

Elektrofilter

Lieferant	Lurgi	
Baujahr	1989	
Typ	Horizontal	
Anzahl Felder/Kammern	2/1	
Niederschlagsfläche	m ²	7472
Staubkonzentration	mg/Nm ³	< 50
max. Temperatur	°C	160

Verdampfungskühler

Lieferant	Lurgi	
Baujahr	1970	
aktives Volumen	m3	796
L/D	3,1	

2.6.2 Bypassanlage

Die in der Bypass-Mischkammer mit Luft von ca. 1100°C auf ca. 350 °C heruntergekühlten Bypassabgase werden in einem Heiß-Elektrofilter vorentstaubt.

Der abgeschiedene Staub, der im wesentlichen aus einem mit Alkalien und Chloriden angereicherten Ofenmehlstaub besteht, wird zusammen mit dem abgeschiedenen Staub der Klinkerkühlerabluft der Zementproduktion zugeführt

Elektrofilter

Lieferant	Lurgi	
Baujahr	1970	
Typ	Horizontal	
Anzahl Felder/Kammern	2/1	
Niederschlagsfläche	m2	2376
Staubkonzentration	mg/Nm3	500
max. Temperatur	°C	420

2.6.3 Klinkerkühleranlage

Die Klinkerkühlerabluft, bestehend aus Mittenabluft und Kühlerabluft, wird in einer Mischkammer zusammengeführt, vorentstaubt und anschließend in einem Heißelektrofilter entstaubt.

Der abgeschiedene Klinkerstaub wird der Zementproduktion zugeführt.

Elektrofilter

Lieferant	FLS	
Baujahr	1994	
Typ	Horizontal	
Anzahl Felder/Kammern	3/1	
Niederschlagsfläche	m2	9048
Staubkonzentration	mg/Nm3	< 50
max. Temperatur	°C	400

2.6.4 NO_x-Minderung

Zur sicheren Einhaltung der NO_x-Grenzwerte wird bei Bedarf nach dem Prinzip der SNCR-Technik Renoxal im geeigneten Temperaturfenster in den Gassteigeschacht eingedüst.

2.7.0 Brennstoffeinsatz

Primärbrennstoffe

Wegen des Schwefeldefizits in den Lengfurter Rohstoffen wird als Hauptbrennstoff ein 3-5% schwefelhaltiger Petrolkoks eingesetzt.

Sekundärbrennstoffe

Sekundärbrennstoffe werden je nach ihren physikalischen- und chemischen Eigenschaften und Eignung sowohl in der Haupt- als auch in der Zweitfeuerung eingesetzt.

Einsatz von Brennstoffenergie

Die nachfolgend aufgeführten Daten beruhen auf dem Berichtsstand des Betriebsdatenberichts von 2000:

Brennstoff	Feuerungsstelle	Brennstoffanteil %	Brennstoffeinsatz MWh/a
Petrolkoks	Hauptfeuerung	59,6	441.268
Öl	Hauptfeuerung	0,15	1.110
Altöl	Hauptfeuerung	17,5	129.567
Kunststoff	Hauptfeuerung	13,3	98.471
Altreifen	Zweitfeuerung	9,4	69.596
Gießereialtsand	Zweitfeuerung	~ 0,05	~ 371
Gesamteinsatz		100,0	740.383

2.8.0 Abgasverwertung

Die Abgase der Wärmetauscheranlage werden zur thermischen Nutzung der Abwärme im Verbund mit den Mahltrocknungsanlagen betrieben. Der Anteil des Verbundbetriebes beträgt im Jahresdurchschnitt rund 88 % bzw. 21,1 Betriebsstunden/Tag.

Wegen der niedrigen Feuchtigkeit der Rohstoffe zwischen 2,0-3,5 % (Jahresdurchschnitt 2,7 %) bestehen für die anfallenden Abgase der Bypass- und Klinkerkühleranlage keine thermischen Verwertungsmöglichkeiten.

Aufgrund fehlender Verwertungsmöglichkeiten für die Abwärmeströme war bisher der Energieverlust im Werk Lengfurt im Vergleich zu anderen Werken der Heidelberger Zement AG besonders groß. Damit stand die energetische Verwertung der Kühlerabluft in diesem Werk seit längerem zur Diskussion an.

2.9.0 Energieeinsatz/-Versorgung

2.9.1 Energiebedarf

Für die Erzeugung von rund 834.900 t Klinker pro Jahr wurden vom Werk Lengfurt 46.262 MWh_{el}/a Strom und 2,66 Mio. GJ/a \cong 740.383 MWh/a Brennstoffenergie benötigt. Insgesamt betrug damit der Energieeinsatz 786.645 MWh_{ges}/a.

Die angegebenen Werte beziehen sich auf das Jahr 2000.

Energiebedarf für die Erzeugung bis zur Produktionsstufe Zementklinker

Energieeinsatz	%	MWh/a
Brennenergie	94,1	740.383
Strom*	5,9	46.262
Gesamt	100,0	786.645

* Der Anteil der Produktionsstufe Brennbetrieb beträgt 46,9 %. Der Rest entfällt auf die Produktionsstufen Rohmaterialgewinnung und -aufbereitung.

Bezogen auf das Endprodukt Zement werden für die Erzeugung von 620.000 t Zement pro Jahr ca. 70.928 MWh_{el}/a Strom und 1,66 Mio. GJ/a (ca. ~ 461.780 MWh/a) Brennenergie benötigt. Insgesamt beträgt der Energieeinsatz für das Endprodukt Zement 532.708 MWh_{ges}/a. Der Unterschied in den Produktionsmengen von Klinker und Zement ergibt sich durch den Verkauf von Klinker an andere Werke.

Energiebedarf für die Erzeugung bis zur Produktionsstufe Zement*

Energieeinsatz	%	MWh/a
Brennenergie (Anteil Klinker)	86,7	461.780
Strom (Klinker Zementmahlung)	13,3	70.928
Gesamt	100,0	532.708

* Klinkeranteil im Zement (84 %)

2.9.2 Energieversorgung

2.9.2.1 Elektrische Energie

Der Strom wurde bis vor Errichtung der ORC-Anlage zu 100 % vom regionalen Energieversorger bezogen. Durch die Errichtung der ORC-Anlage ist ein Eigenversorgungsanteil von rund 12 % eingeplant.

Das entspricht bei einer angenommenen Laufzeit der ORC-Anlage von 6.500 Bh und einer geschätzten Verfügbarkeit von 98 % rund 7.200 MWh/a.

2.9.2.2 Brennstoff Energie

Im Zementwerk Lengfurt wird ein hoher Anteil der benötigten Brennstoffenergie durch Sekundärbrennstoffe gedeckt. Der Sekundärbrennstoffanteil am Gesamtbrennstoffbedarf betrug im Jahr 2000 im Mittel 40 % (298.005 MWh/a) und wird bis zum heutigen Tag kontinuierlich bis zur Genehmigungsgrenze hin gesteigert. Der zur Zeit genehmigte Anteil beträgt 60 % und es ist vorgesehen, den genehmigten Anteil zukünftig auszuschöpfen.

Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen substituiert fossile Brennstoffe, verringert dadurch die CO₂-Emissionen und schont so Brennstoffressourcen. Der substituierte Anteil wird in Bezug auf die Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Industrie im generellen und der Zementindustrie im speziellen im Nachgang der Kyoto Verträge als CO₂ neutral betrachtet.

Energieeinsatz für die Erzeugung von Zementklinker

Energieeinsatz	%	MWh/a
Primärbrennstoffe	60,0	442.378
Sekundärbrennstoffe	40,0	298.005
Gesamt	100.0	740.383

3.0.0 Anlagenbeschreibung Abwärmekraftwerk

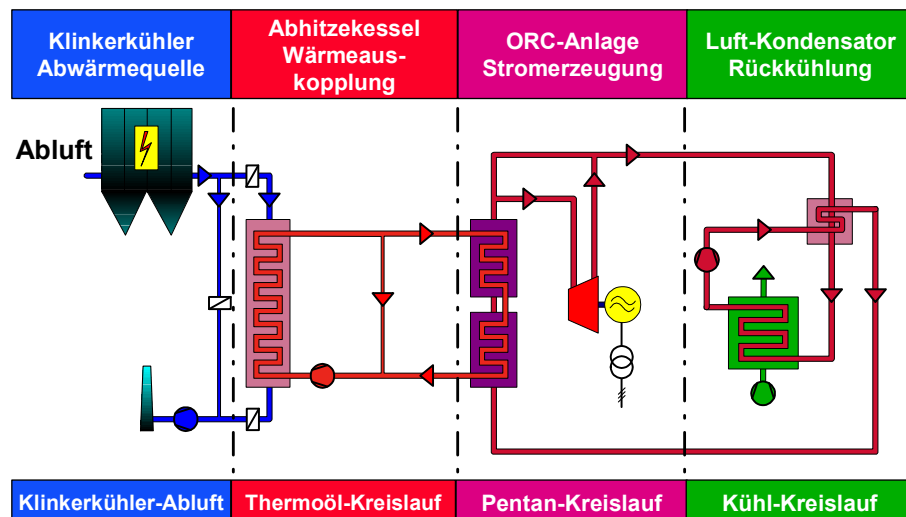
Das Abwärmekraftwerk selbst besteht im wesentlichen aus vier Teilanlagen.

1. Der blau markierte Bereich zeigt den bestehenden Klinkerkühler-Abluftstrom als Abwärmequelle und ist in Bild 1 dargestellt.
2. Der rot markierte Bereich zeigt den Abhitzekessel mit dem Thermoöl-Kreislauf, mit dem die Abwärme aus dem Klinkerkühler-Abluftstrom ausgekoppelt wird.
3. Der violett markierte Bereich zeigt die ORC-Anlage mit dem Pentan-Kreislauf, Turbine und dem Generator, in dem Strom erzeugt wird.
4. Der grün markierte Bereich beschreibt die Luft-Kondensator-Anlage, die der Rückkühlung des Pentan-Kreislaufes dient.

Abhitzekessel und ORC-Anlage sind jeweils für sich erprobte Module.

Die Kombination der beiden zur Nutzung von Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess ist jedoch neu.

Bild Nr. 1 Verstromung von Niedertemperaturabwärme nach dem ORC-Verfahren



3.1.0 Abwärmequelle

Im Zementwerk Lengfurt wird ein 4-stufiger Zyklonwärmetauscherofen mit einer Tagesleistung von ca. 3.000 t Klinker betrieben. Die etwa 350°C heißen Abgase des Ofensystems werden größtenteils zur Trocknung der Rohstoffe und Rohkohle verwendet. Zur Kühlung des Zementklinkers und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ist ein Rostkühler nachgeschaltet. Im Rostkühler wird der bis zu 1450°C heiße Klinker mit Luft auf ca. 100°C heruntergekühlt. Über 70 % der von der Kühlluft aufgenommenen Wärme werden dem Ofensystem für den Brennprozess zugeführt und damit energetisch zurückgewonnen. Die restlichen 30% der Kühlluft verlassen mit einer Temperatur von ca. 275°C den Klinkerkühler und emittieren bisher ungenutzt als Klinkerkühlerabluft in die Atmosphäre.

Die Auslegung des Abwärmekraftwerkes erfolgte anhand der Betriebsweise der Ofenanlage aus den Jahren 1995/1996. Die gesamte zur Verfügung stehende Klinkerkühlerabluft mit 150.000 Nm³/h und 275 °C wird mit einer Wärmeleistung von rd. 14 MW nach Abreinigung im Heiß-Elektrofilter für die Verstromung verwendet.

Bild Nr. 2 Abwärmequelle Klinkerkühler

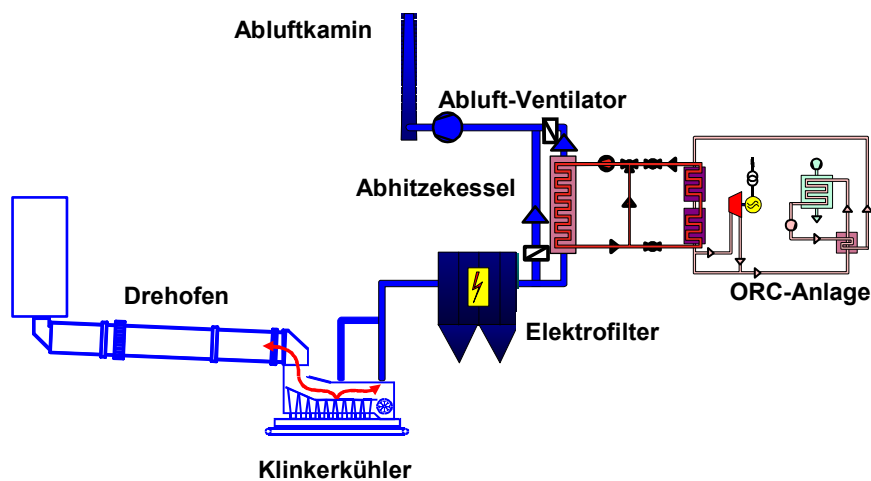


Bild 2 zeigt den Weg der Kühlerabluft nach Installation der ORC-Anlage

3.2.0 Wärmetauscher

Zur Auskopplung des Wärmestromes wird die Klinkerkühlerabluft einem Abhitzekeessel zugeführt, der aus einem konventionellen Glattrohr-Wärmetauscher besteht (s. Bild 3). Zur Auskopplung des Wärmestromes werden die Heizflächen des Abhitzekeessels mit einem Wärmeträgeröl beaufschlagt. Dadurch wird die Kühlerabluft von 275 °C auf ca. 125 °C abgekühlt, das Wärmeträgeröl bei einer Vorlauftemperatur von 85 °C auf ca. 230 °C aufgewärmt und die aufgenommene Wärme im Zwangsumlauf über Umwälzpumpen zur ORC-Anlage gefördert.

Vor der ORC-Anlage regelt ein Dreiwegeventil die zum Pentan-Verdampfer zugeführte Wärmemenge oder leitet diese zum Wärmeträgeröl-Bypass um.

Die Wärmeträgerölanlage wird als geschlossene Anlage mit einem stickstoffüberlagerten Ausdehnungsraum betrieben. Die durch das Aufheizen des Wärmeträgeröles eintretende Volumenexpansion (ca. 10% pro 100°C) wird durch den Ausdehnungsbehälter aufgefangen.

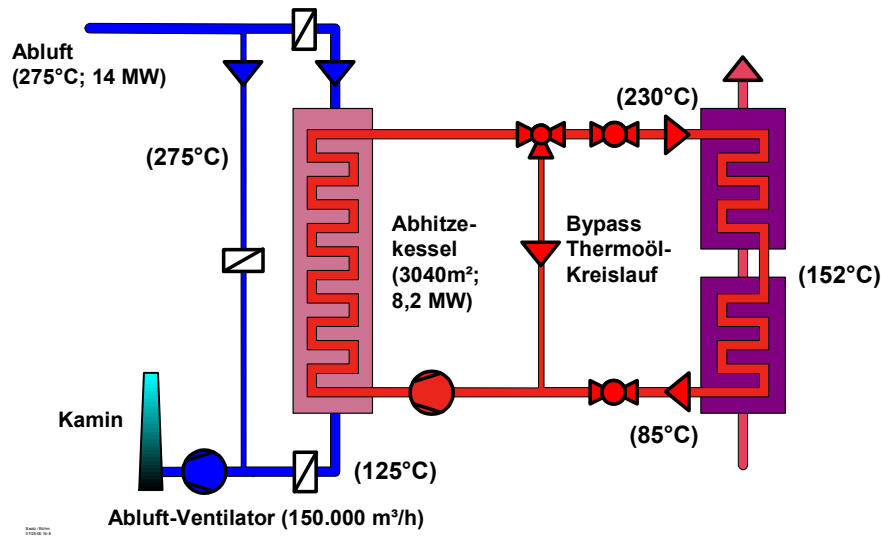
Vor dem Pentan-Verdampfer ist zusätzlich ein Schnellschlussventil installiert, das bei einem NOT-Aus oder beim Abfahren der ORC-Anlage schließt, um den Pentan-Kreislauf vor einer Überhitzung über den Sattedampfbereich hinaus zu schützen.

Der vom nachgeschalteten Pentan-Kreislauf ausgekoppelte Wärmestrom wird über Venturidüse mit Differenzdrucktransmitter und zwei Temperaturmessungen (vor und nach ORC-Anlage) durch einen Wärmemengenrechner ermittelt.

Die Anlage besteht im wesentlichen aus :

- 3.2.1 Abhitzekeessel
- 3.2.2 Abluft-Bypass
- 3.2.3 Wärmeträgeröl-Anlage
- 3.2.4 Wärmeträgermedium

Bild Nr. 3 Abhitzekessel / Wärmeölkreislauf



3.2.1 Abhitzekessel

Die Auslegung des Abhitzekessels erfolgte u.a. auch unter der Voraussetzung, dass das vorhandene Kühlerabluft-Gebläse ohne Umrüstung weiter betrieben werden sollte.

Die Konvektionsheizflächen des Abhitzekessels bestehen aus Bündelheizflächen, die in vier Glattrohrbündeln ausgeführt wurden und in einem gasdichtem Kassettenblechgehäuse eingeschoben sind. Sämtliche Rohre sind fluchtend mit durchgehenden, abluftseitigen Gassen angeordnet. Die Konvektionsflächen sind so ausgelegt, dass selbst bei einer Staubbelegung auf der Oberseite der Glattrohre mit rieselförmigem Klinkerstaub die Netto-Gesamtheizfläche noch 2730 m² beträgt. Die Schmutzreserve beträgt 310 m².

Die luftseitige Durchströmung des Abhitzekessels erfolgt von oben nach unten. Durch Zwischenschaltung des Abhitzekessels in das Abluftsystem erhöht sich der luftseitige Druckverlust bei gleichem Volumenstrom um 7 mbar. Die einzelnen Rohrbündel sind im Gegenstrom geschaltet.

Der Abhitzekeessel ist statisch für eine maximale Temperatur von 450°C ausgelegt. Der Abhitzekeessel ist in ein Stahlgerüst eingehängt und dadurch bei Auftritt von thermischen Spannungen frei beweglich.

Am Boden des Abhitzekeessels befindet sich ein Stahltrichter, über den bei Anlagenstillstand im Bedarfsfall abgeschiedener Staub aus dem Abhitzekeessel entfernt werden kann. Rauchgaskanal und Anschlussstücke am Kesseleintritt und -austritt, bestehen aus gasdicht verschweißtem Stahlblech sowie den erforderlichen Kompensatoren. Für die Inspektion der Heizflächen sowie Wartung der Kesselanlage und Rauchkanäle sind an den entsprechenden Stellen Schauluken und Einstiegstüren installiert.

Auslegungsdaten des Abhitzekeessel-Gehäuse

Abluft-Volumenstrom *	150.000 Nm ³ /h
Staubgehalt-Abluft	20 mg/Nm ³
Abluft- Eintrittstemperatur im Durchschnitt*	275 °C
Abluft- Eintrittstemperatur max.	450 °C
Abluft-Austrittstemperatur*	125 °C
Anstehender Abwärmestrom*	14 MW
Druckverlust (luftseitig)	7 mbar
Gehäusequerschnitt (isoliert)	6600 x 3800 mm
Baulänge in Gasrichtung	24200 mm
Werkstoff	St 37/15Mo3 DIN

* maßgeblich für Garantie

Auslegungsdaten der Abhitzekeessel Heizflächen

Heizfläche (brutto)	3049 m ²
Heizfläche (netto)	2730 m ²
Wärmeleistung Brutto*	8,37 MW
Oberflächenverluste	0,12 MW
Rohrabmessung	33,7 mm
Wanddicke	2,6 mm
Querteilung	54 mm
Längsteilung	50 mm
Werkstoff	St 35.8III/ 37.8 DIN
Gasgeschwindigkeit an der engsten Stelle	11 m/s

* maßgeblich für Garantie

3.2.2 Abluft-Bypass zur Umgehung des Abhitzekessels

Für den Fall einer erforderlichen Stillsetzung des Abhitzekessels bei laufendem Ofenbetrieb oder für die Ableitung überschüssiger Wärme bei einem überhöhten Abluftvolumenstrom und Auftreten von überhöhten Ablufttemperaturen von über 400°C, ist parallel zur Abhitzekesselanlage ein Abluftbypass geschaltet. Der Abluftbypass besteht aus einer gasdicht verschweißten Rohrleitung mit den erforderlichen Kompensatoren. Zur Absperrung und Regelung der Abluftströme sind vor und nach dem Abhitzekessel Saugzüge sowie im Bypasskanal elektrisch angetriebene Jalousieklappen installiert. Um beim Schließen der Absperrklappen zu hohe Unterdrücke im Abhitzekessel, die zu einer Kontraktion des Abhitzekessels führen könnten, zu vermeiden, befindet sich auf der Gaseintrittsseite des Abhitzekessels eine Frischluftklappe.

3.2.3 Wärmeträgeröl-Anlage

Die Wärmeträgerölanlage besteht im wesentlichen aus:

1. Thermo-Öl-Sammelbehälter als Füll- und Ablassbehälter für das Thermo-Öl einschließlich Nachfüll-/Entleerpumpen. Inhalt : 20 m³; DIN 4754
2. Thermo-Öl-Ausdehnungsbehälter mit Niveauregulierung als Druckhaltesystem, ausgelegt als Druckbehälter einschließlich Ölmangelsicherung. Inhalt : 1 m³; DIN 4754
3. Stickstoff-Überlagerungseinrichtung zum Schutz gegen Oxidation und Eindringen von Wasserdampf aus der Atmosphäre im Bereich des Ölsammelbehälters und des Überlaufbehälters.
4. Wärmeträger-Öl-Pumpen und Rohrleitungssystem. Aus Sicherheitsgründen als Doppel-Pumpengruppe ausgeführt.

Auslegungsdaten Thermo-Ölkreislauf

Ausgekoppelter Wärmestrom	MW	8,25
Oberflächenverluste	MW	0,05
Nutzleistung*	MW	8,20
Thermo-Öl *	Sorte	Mobiltherm 594
Thermo-Öl (Gesamtinhalt)	m ³	25
Volumenstrom (85°C)*	m ³ /h	106
Volumenstrom (230°C)	m ³ /h	120
Thermoöl-Eintrittstemperatur*	°C	85
Thermoöl-Austrittstemp. (Normalbetr.)*	°C	230
Thermoöl-Austrittstemp. (max. Betriebstemperatur)	°C	250
Maximale Temperatur (kurzzeitig)	°C	300°C
Druckverlust (Normalbetrieb)	bar	9,5
Druckverlust (Anfahrbetrieb) max.	bar	12
Wärmeträgeröl-Pumpen	Typ	Kreiselpumpe
Nennndruck	bar	16
Antriebsleitung Ölpumpe (installiert)	kW	45
Antriebsleistung Ölpumpe (Normalbetrieb)	kW	32,20

* maßgeblich für Garantie

3.2.4 Wärmeträgermedium

Bei der Auswahl des Wärmeträgeröles wurde auf folgende Kriterien geachtet:

1. Verwendung eines nicht halogenisierten Wärmeträgeröles.
2. Hohe thermische Beständigkeit, um Rückstandsbildungen im System zu minimieren und um eine lange Lebensdauer zu garantieren.
3. Niedrige Betriebsviskosität, um Rohrleitungsverluste zu minimieren und um hohe Wärmeübertragungswerte zu gewährleisten. Dadurch wird ein schnelles Aufheizen des Systems ermöglicht.

Aus den besagten Gründen wurde das Wärmeträgeröl Mobiltherm 594 ausgewählt.

3.3.0 ORC-Anlage

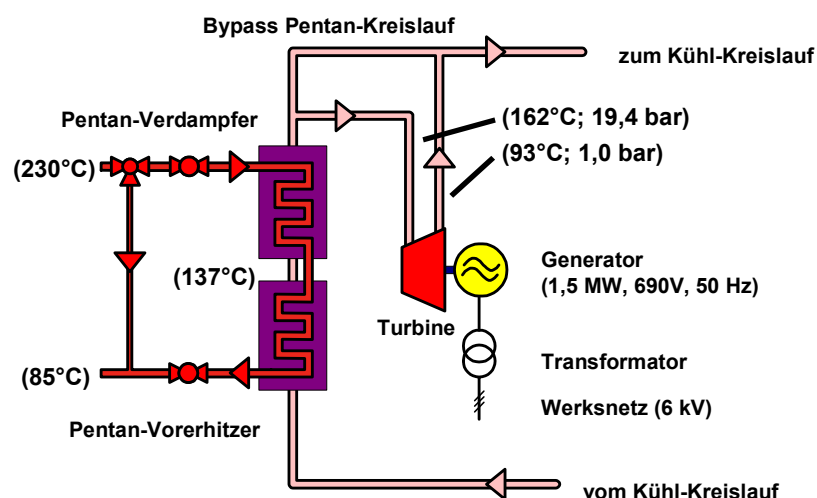
Die ORC-Anlage besteht im wesentlichen aus:

- 3.3.1 Pentan-Verdampfer und -Vorwärmer
- 3.3.2 Turbine
- 3.3.3 Generator
- 3.3.4 Treibmedium

3.3.1 Pentan Verdampfer und -Vorerhitzer

Das im Abhitzeessel auf 230°C vorgewärmte Wärmeträger-Öl wird in der nachgeschalteten ORC-Anlage nacheinander den Wärmetauschern, zuerst einem Pentan-Verdampfer und dann einem zweistufigen Pentan-Vorerhitzer, zugeführt (s. Bild 4). Hier wird im Gegenstrom das flüssige Pentan mit einer Vorlauftemperatur von 57°C auf 162°C erhitzt und verdampft. Das Wärmeträger-Öl wird beim Durchlauf durch den Pentan-Verdampfer und -Vorerhitzer auf 85 °C abgekühlt und hiernach über die Wärmeträgeröl-Pumpe erneut dem Abhitze-

Bild Nr. 4 ORC-Anlage/Stromerzeugung



kessel zugeführt.

Pentan-Verdampfer und -Vorerhitzer bestehen aus U-Röhrenwärmetauscher mit horizontaler Anordnung der Rohrbündel. Die Rohreinheit verfügt über eine Einlagenschweißung mit Stahlrohren aus St 37, die in Rauchrohrwänden enden, und von Umlenksegmenten und Einbauten getragen wird. Das Gehäuse besteht aus einem zylindrischen Stahlbehälter aus St 37. Die relative thermische Ausdehnung zwischen Mantel und Rohrbündeln wird durch einen Edelstahlkompensator, angeordnet am Ausgang des Gehäuses, kompensiert. Das Wärmeträger-Öl fließt durch die Rohrbündel, während das Pentan in den Wärmetauscherbehälter fließt.

Für eine optimale Energieausbeute und zur Regulierung des Niveaus des flüssigen Pentans ist am Pentan-Verdampfer ein Ausgleichsgefäß angeschlossen.

Auslegungsdaten: Pentan-Verdampfer und Vorerhitzer

Wärmeträgermedium	Typ	Mobiltherm 594
Durchflussrate*	84,60	t/h
Wärmeenergieeintrag*	8,2	MW
Treibmedium	Typ	N-Pentan
Durchflussrate Treibmedium max.	60	t/h
Zulässiger max. Betriebsdruck		
- Rohrseitig	16	bar
- Behälter	32	bar
Pentan-Verdampfer	1	Stück
Thermoöl-Eintrittstemperatur*	230	°C
Thermoöl-Austrittstemperatur	152	°C
Pentan-Eintrittstemperatur	137	°C
Pentan-Austrittstemperatur	162	°C
Pentan-Vorerhitzer	2	Stück
Thermoöl-Eintrittstemperatur	152	°C
Thermoöl-Austrittstemperatur*	85	°C
Pentan-Eintrittstemperatur	57	°C
Pentan-Austrittstemperatur	137	°C

* maßgeblich für Garantie

3.3.2 Turbine

Mit dem 162 °C heißen und auf 19,4 bar vorgespannten Pentandampf wird eine 2-stufige Turbine angetrieben. Das Pentan verlässt die Turbine mit einer Temperatur von 93 °C und einem Druck von 1,03 bar. Die Turbine ist mit einer mechanischen Kupplung mit einem konventioneller Wechselstrom-Generator verbunden. Der Thermische Wirkungsgrad beträgt rd. 14 %.

Die Turbine ist speziell für den Betrieb mit organischen Medien ausgelegt und arbeitet nach dem Impulsverfahren. Die Einlassventile sind für einen hohen Wirkungsgrad der Turbinen konstruiert und ermöglichen eine hohe Variabilität des Turbinenbetriebes bei Lastwechsel. Die Anpassung der Turbinenleistung bei gleichbleibender Drehzahl erfolgt über Regelung der Durchflussmenge des in die Turbine eintretenden Pentandampfes, indem der Druck im Pentan-Verdampfer geregelt wird.

Die Gleitlager der Turbine als auch die Turbinenwelle werden über eine Öldruckschmierung geschmiert. Damit kein Schmieröl in den Pentankreislauf gelangen kann, sind die ölgeschmierten Teile der Turbine durch einen Sperrkreislauf getrennt. Das Schmieröl wird unter regeltem Druck den Lagern und der Wellenabdichtung zugeführt. Das zurückfließende Schmieröl wird in einem Zwangs-Luftkühler gekühlt.

Auslegungsdaten: Turbine

Typ	Impulsturbine	
Stufen	2	
Nennleistung	1,5	MW
Leistung gem. Auslegung	1,32	MW
Drehzahl	3000	U/min
Druck vor Turbine	19,4	bar
Druck nach Turbine	1,03	bar
Temperatur vor Turbine	162	°C
Temperatur nach Turbine	93	°C
Lager	Wälzlager	Typ
Schmierung	Zwangsschmierung	Typ

3.3.3 Generator

Unter den genannten Betriebsbedingungen an der Turbine können vom Generator brutto 1,3 MWel mit einer Wechselspannung von 690V und einer Frequenz von 50 Hz erzeugt werden. Der Generator ist im modularen Aufbau mit der Turbine verbunden. Verwendet wird ein konventioneller Generator, der mit dem Werks-Stromnetz synchronisiert ist. Der erzeugte Strom wird über einen Transformator auf eine Spannung von 6 kV umgespannt und direkt in das Werksnetz abgeben und hat damit keinen Einfluss auf das Einspeisenetz. De facto wirkt sich das An- und Abfahren der Anlage wie das Aus- bzw. Einschalten eines Großantriebes aus.

Von den Antrieben für die Pentan-Pumpe, der Ventilatoren des Luft-Kondensators und der Thermoöl-Pumpe werden ca. 0,2 MW Leistung aufgenommen, so dass insgesamt von einer Netto-Stromerzeugung von rd. 1,1 MW auszugehen ist.

Auslegungsdaten: Generator

Spannung	V	660
Phasen	Anzahl	3
Frequenz	Hz	50
LOS	° Grad	93
Typ		Asynchrongenerator
Leistung	MW	1,5
Drehzahl bei Vollast	min ⁻¹	3.000
Anzahl Kohle	Stück	2
Spülung		Eigen-Luftgekühlt
Gleitlager		Zwangsschmierung
Wirkungsgrad	%	96
Schutzart		(IEC, Klasse F)
Temperatur max.	°C	90
Schutzart		3 PCD, eingebettet in der Wicklung, 1 PCD für jede Lagerung, 1 RTD (PT 100) für jede Wicklung
Kompensation		Kondensatoren mit Generator verbunden zur Kompensation der Blindleistung
Verbindung Wicklung		Dreieckschaltung, 3 Ausgänge

3.3.4 Treibmedium (Pentan)

Ein wichtiges Element der ORC-Kreisprozesse und Thermoölanlagen in physikalischer, chemischer, physiologischer, ökologischer und ökonomischer Hinsicht ist das einzusetzende Treibmedium.

Als Treibmedium wird auf Grund jahrzehntelanger positiver Erfahrung seitens des Anlagenbauers Pentan verwendet. Pentan zeichnet sich im Vergleich zu anderen in Frage kommenden Treibmedien wie Ammoniak, halogenierten Kohlenwasserstoffen und Kohlenwasserstoffen wegen seiner günstigen thermodynamischen Eigenschaften unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Aspekte des Umwelt-, Arbeitsplatz- und Ex-Schutzes aus. Gegenüber der Verwendung von Wasserdampf bewirken der niedrige Verdampfungspunkt und die hohen Dampfdrücke einen höheren thermischen Wirkungsgrad des ORC-Verfahrens gegenüber konventionellen Wasserdampfkraftwerken. Die Einsatzmenge beträgt ca. 6 m³.

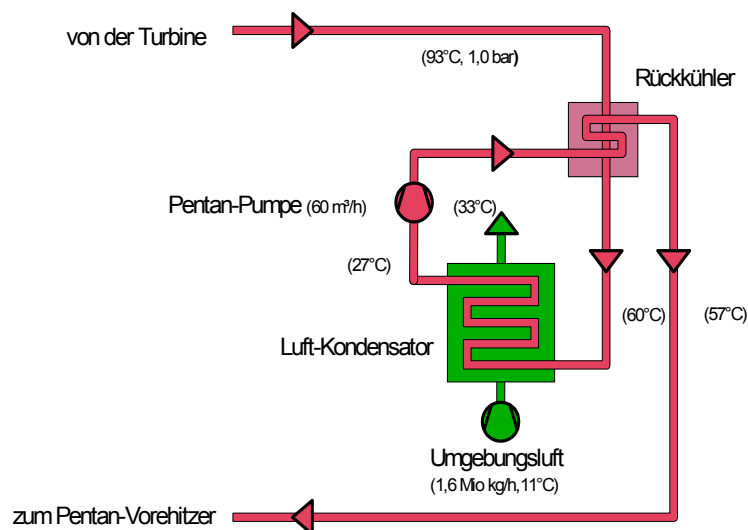
Wesentliche Kriterien für die Auswahl von Treibmedien sind:

- Unbrennbarkeit
- Ungiftigkeit (Verzicht auf F-Cl- Zusätze und Ammoniak)
- Gute Verträglichkeit mit Werkstoffen der Anlage
- thermodynamische Eignung hinsichtlich Stabilität bei den höchsten Prozesstemperaturen
- Verfügbarkeit
- geringe Kosten (Einkaufspreis/ Entsorgung)
- Arbeitsplatzschutz

3.4.0 Luft-Kondensator

In dem sich an die Turbine anschließenden Kühlkreislauf wird das 93°C heiße Pentan in 2 Stufen wieder auf 57°C heruntergekühlt und mit der Pentandruck-erhöhungspumpe in den Kreislauf zum Pentan-Vorerhitzer wieder zugeführt. In der ersten Stufe erfolgt die Kühlung von 93 °C auf 60°C in einem Rückkühler. Der Rückkühler wird dabei auf der Kaltseite mit dem in der zweiten Stufe in einem Luftkondensator von 60°C auf 28,6 °C gekühlten Pentan beaufschlagt (s. Bild 5).

Bild Nr. 5 Kühl-Kreislauf



Aus sicherheitstechnischen Betrachtungen heraus ist die Luftkondensator -Anlage so ausgelegt, dass im Falle einer Sicherheitsabschaltung der Turbine oder des Generators, die gesamte vom Pentan-Kreislauf aufgenommene Wärme mit einer maximalen Temperatur von 205°C und bei einer maximalen Umgebungstemperatur von 40°C sicher abgeführt werden kann.

Die Wärmeübertragungsflächen des Luftkondensators bestehen aus Rohrbündeln, die in einer Ebene quer zur Durchströmungsrichtung angeordnet sind. Die Kühlrohre sind aus St 37 ausgeführt, auf die Kühlrippen aus Aluminium angeflanscht sind.

Das kondensierte Pentan fließt nach Abkühlung, der Schwerkraft folgend, über einen Filter der Pentandruckerhöhungspumpe zu, die das Pentan dem Rückkühler zuführt.

Der Pentanvolumenstrom wird über den Flüssigkeitsstand des Pentan-Verdampfers geregelt. Der Kondensationsdruck kann durch Zu- und Abschalten der Ventilatoren am Luftkondensator annähernd konstant gehalten werden.

Auslegungsdaten: Luft-Kondensator

Kühlmedium	Umgebungsluft	Jahresmittel (März-Dezember)
Jahresdurchschnittstemperatur	11	°C
Kühlluftmenge max.	1.696.500	kg/h
Ventilatoren	6	Stück
Leistung	12	KW je Ventilator
Drehzahl der Ventilatoren	180	min ⁻¹

3.5.0 Überwachungseinrichtung

Die gesamte Anlage wurde für einen mannlosen Betrieb konzipiert und erfolgt über Blindschaltbilder mit Bedien- und Kontrollelementen aus dem zentralen Leitstand. Start und Stop erfolgen automatisch. Für einen Versuchsbetrieb kann die Anlage auch vor Ort an- bzw. abgefahren werden.

Das gesamte Einzelmeldungswesen, Visualisierung, Vorortantrieb etc. erfolgt über die Steuerungssoftware CEMAT.

Sicherheitsrelevante Ventile zur Kontrolle der Dampf- und Flüssigkeitsbewegungen im Pentan-Kreislauf werden pneumatisch angesteuert. Sämtliche Ventile entsprechen den Normen des American National Standards Institute (ANSI), Klasse 150 oder 300, deren Eignungen, gem. der Druckbehälter Verordnung, durch den TÜV-Würzburg überprüft wurde. Die Ventile werden entweder durch An/Aus der Kolbenrotationsschalter oder Federmembranschalter betrieben. Die Druckluftversorgung der Schalter wird entweder durch Tauchmagnet-An-/Aus-Ventile oder durch pneumatische Pegelregler und elektro-pneumatische Transducer kontrolliert. Pentan-Verdampfer und Luft-Kondensator sind mit Überdruckventilen versehen.

Sicherheitsrelevante Ventile im Bereich des Thermoöl-Kreislaufes werden elektromagnetisch angesteuert. Es werden ausschließlich Ventile, die der Bauartzulassung für Wärmeträgeröl-Anlagen gem. GGG 40.3 entsprechen, eingesetzt.

3.6.0 Mess- und Regelungskonzept

Um einen sicheren und gefahrlosen Betrieb zu gewährleisten wurde entsprechend den Auflagen der Genehmigung und dem TÜV folgendes Sicherheitskonzept aufgebaut:

3.6.1 Klinkerkühler

Durch einen plötzlichen erhöhten Materialaustrag aus den Drehofen -sei es durch einen Mehlschuss, Ansatzfall oder einen Austrag einer Klinkerkugel- kommt es in der Regel im nachgeschalteten Klinkerkühler zu einem Wärmestau, der zu einem Anstieg der Klinkerkühler-Ablufttemperatur führen kann. Dieser Fall kann u.U. auch zu einer Überschreitung der maximal zulässigen Klinkerkühler-Ablufttemperatur vor dem Heiß-Elektrofilter von 400°C führen.

Um den Elektrofilter vor überhöhten Temperaturen zu schützen, wird zur Kühlung der Klinkerkühler-Abluft, beim Auftreten von Mittenlufttemperaturen über 370°C, im Bereich des zweiten Rostes Wasser eingedüst. Bei einem weiteren Anstieg über 430 °C wird zusätzlich eine Frischluftklappe geöffnet. Beide Kühlvorrichtungen werden erst dann wieder ausgeschaltet, wenn die Mittenlufttemperatur 330°C unterschreitet.

3.6.2 Abhitzekeessel und Wärmeträgerölkreislauf

Bei der Abhitzekeesselanlage und dem Wärmeträgeröl-Kreislauf basiert das Sicherheitskonzept in erster Linie auf der Überwachung der Wärmeträgeröl-Temperatur und der Klinkerkühler-Ablufttemperatur. Hierbei ist die sichere Abschaltung der Wärmezufuhr über die Klinkerkühler-Abluft, die einen sicheren Betrieb des Thermoöles unter der Filmtemperatur von 280°C sowie der Schutz des Abhitzekeessels von 400°C gewährleistet.

Der Abhitzekeessel wird beim Auftreten einer von über 3 min. anhaltenden Klinkerkühler-Mittenlufttemperaturen von über 350 °C, bzw. bei einer Überschreitung der Wärmeträgeröl-Temperaturen von über 250°C, sofort durch Öffnen der Bypass-Leitung heruntergefahren und außer Betrieb genommen. Dabei wird gleichzeitig die ORC-Anlage durch die nachgeschaltete Sicherheitskette abgefahren.

Durch Öffnen einer am Eintritt des Abhitzekeessels installierten Frischluftklappe kann das System zusätzlich gekühlt werden. Die Frischluftklappe verhindert weiterhin zusätzlich, dass bei einem sofortigen Schließen der Heißgaszuführung ein Unterdruck im Abhitzekeesselgehäuse entsteht.

3.6.3 ORC-Anlage und Pentankreislauf

Bei der ORC Anlage basiert das Mess- und Regelkonzept in erster Linie auf der Überwachung des Pentandruckes und der sicheren Abschaltung des Wärmeintrages über den Wärmeträgerölkreislauf, die einen sicheren Betrieb im Satteldampfgebiet gewährleisten. Um den Druck sicher zu erfassen, erfolgt die Messung über eine bauteilgeprüfte Messvorrichtung.

Der Pentan-Verdampfer wird im Satteldampfgebiet mit geringfügiger Überhitzung von 10-20°C betrieben. Daraus resultierend, ist das System für einen maximalen Betriebsdruck von 32 bar ausgelegt.

Der Druck des Pentan-Kreislaufs nach Pentan-Verdampfer wird über die Wärmezufuhr des Wärmeträgeröles geregelt. Hierzu wird das Dreiwegeventil des Wärmeträgeröl-Kreislaufes vor Pentan-Verdampfer angesteuert.

Pentan-Bypass

Im Falle der Abschaltung der Turbine und/oder des Generators wird der Pentan-Bypass geöffnet und gleichzeitig die Pentan-Zufuhr zur Turbine geschlossen. In diesem Fall ist die gesamte vom Pentan-Kreislauf ausgekoppelte Wärme über den Luft-Kondensator abzuführen. Durch den vorgeschalteten Rückkühler wird das 193 °C heiße und auf bis zu max. 32 bar vorgespannte Pentan über eine im Rückkühler vorgeschaltete Druckreduziervorrichtung entspannt.

Der nach dem Rückkühler nachgeschaltete Luft-Kondensator ist in seiner Leistung so ausgelegt, dass er bei Umgebungstemperaturen von bis zu 40°C und einer Pentan-Temperatur von 193°C nach dem Pentan-Verdampfer störungsfrei betrieben werden kann.

Pentanleckagen

Um Pentanleckagen, die zu einer Überschreitung zulässiger Konzentrationsgrenzen innerhalb des Turbinengebäudes führen könnten, zu vermeiden, sind an kritischen geflanschten Rohrverbindungen im Bereich der Pentan-Pumpe und der Turbine Pentan-Schnüffelsonden installiert. Beim Erreichen von 20 % UEG (untere Explosionsgrenze; 20% = 1,3 Vol. %) des zulässigen Grenzwertes wird ein Alarmsignal ausgelöst; parallel hierzu wird über die Sicherheitskette die Raumbelüftung auf maximale Leistung hochgefahren und die Anlage zur Überprüfung kontrolliert abgefahren. Bei Überschreiten von 40 % UEG des Grenzwertes spricht die gesamte Sicherheitskette an, und die Stromerzeugungsanlage wird über Not-Aus heruntergefahren und abgeschaltet. Ferner erfolgt die Spannungsfreischaltung mit Zwangsbelüftung des Gebäudes.

Nach Ansprechen der Sicherheitskette der ORC-Anlage werden zum sicheren Abschalten der Wärmezufuhr der Wärmeträgeröl-Bypass und der Klinkerkühler-Abluft-Bypass aufgefahren.

Druckbehälter

Ausführung und Überprüfung der Druckbehälter erfolgte nach der Druckbehälter-Verordnung DV 6 - 17. Wegen der Fertigung der ORC-Anlage nach US-Amerikanischen Standards erfolgte im Rahmen einer Vorprüfung durch den TÜV zusätzlich eine Auditierung des Turbinenherstellers (ORMAT) nach ISO 9001 für „Design, manufacture of power plants closed-cycle vapor turbogenerators, heat exchangers alternators, controls and related accessories“.

4. Angewandte wissenschaftliche Methodik der Messkampagnen

4.1 Angewandte wissenschaftliche Methodik der Ofenversuche

Im Rahmen der vertraglichen Vereinbarung zwischen dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) und der Heidelberger Zement AG wurde ein Messprogramm zur Untersuchung der Effizienz der ORC-Anlage unter verschiedenen Betriebs- sowie tages- und jahreszeitlichen Bedingungen festgelegt.

Das Messprogramm bestand aus vier Messkampagnen; nach jeder Messkampagne wurde ein Messbericht erstellt, welche dem LfU vorliegen.

Die angewandten wissenschaftlichen Methoden und Techniken entsprechen den Regelwerken und Durchführungsrichtlinien des Forschungsinstituts des Verbandes der deutschen Zementindustrie (VDZ), die bei der Heidelberger Zement AG durchgängig zur Anwendung kommen. Namentlich zu erwähnen ist die VT10 „Auswertung von Drehofenuntersuchungen“.

Diese spiegeln sich im Rahmen des Messprogramms und der Techniken der Probenahme als auch der Probenanalyse sowie der Annahmen und Berechnungswege wider. Im weiteren sei auf diese Richtlinie verwiesen.

Die Bewertung der ORC-Anlage, die notwendigen Vorgehensweisen und Berechnungen, wurden in Einklang mit der Norm DIN 1942 (Abnahmeversuch an Dampferzeugern) durchgeführt.

Der Probenahme-Aufwand, die physikalischen und thermodynamischen Messgrößen sowie deren Mess- und Entnahmeintervalle werden im folgenden vorgestellt. Die jeweils verwendeten Messinstrumente werden im direkten Zusammenhang kurz beschrieben. Die einzelnen Messungen und Auswertungen der Kampagnen werden im nächsten Kapitel zusammenfassend dargestellt und bewertet. Die notwendigen Details wurden den, dem LfU vorliegenden einzelnen Messberichten entnommen.

Massenströme

	Massenstrom	Ermittlungsart	Zeitintervall
1.	Klinker	Klinkerwiegung über Schiffsverladung	über Versuchszeitraum
2.	Ofenmehl	Ofenmehlwaage	stündlich
3.	Rohgas-Staub	LKW-Verwiegung	alle 4-6 h über 24 h
4.	Bypass-Staub	LKW-Verwiegung	2 x pro 24h
5.	Klinker-Staub	LKW-Verwiegung	2 x pro 24 h
6.	Reingas-Staub	Werte aus Messwertrechner	½-stündlich
7.	Petrolkoks-Staub	Kohlenwaage	24 h
8.	Altreifen	gezählte Stückzahl	24 h
9.	Altöl	Zählerstand Tanklager	24 h
10.	Wassereindüsung Kühler	Wasseruhr	24 h
11.	WT-Wassereindüsung	Wasseruhr	24 h
12.	Renoxal	Wasseruhr	24 h

Volumenströme

	Volumenstrom	Mess-Art	Zeitintervall
1.	Kühler-Zuluft	Normeinlaufmessdüsen	2 x in 12 h
2.	Kühlerabluft-Reingaskamin	Prandtlmessung	2 x in 12 h
3.	Kühlluft Kunststoffbrenner	Gebläsedaten	
4.	Primärluft	Normeinlaufmessdüsen	3 x in 12 h
5.	Förderluft Kohlenstaub	Gebläsedaten	1 x in 12 h
6.	Falschluf Ofenkopf	Spalte / Druck	2 x in 12 h
7.	Bypass-Kühlluft	Prandtlmessung	2 x in 12 h
8.	Bypass-Abgas	Prandtlmessung	2 x in 12 h
9.	Verdüngungsluft Renoxal	Volumenstromanzeige	
10.	Ofenabgas WT je Strang	Prandtlmessung	2 x in 12 h

Temperaturen

	Medium	Mess-Stelle	Zeitintervall
	Zuluft	Primärluft Kühlluft Kühler Kühlluft Bypass	2 x in 12 h 3 x in 12 h 2 x in 12 h
2.	Stoffströme	Ofenmehl Kohlenstaub Altöl Gießereialtsand Kaltklinker Heißklinker	3 x in 12 h 3 x in 12 h 3 x in 12 h 3 x in 12 h 2-stündl.in 12 h 3 x in 12 h
3.	Abgas	Kühlerabluft Bypass Ofenabgas nach WT	2 x in 12 h 2 x in 12 h 2 x in 12 h
4.	Oberflächen/Strahlung	Ofenmantel Kühler Ofenkopf Zyklonwärmetauscher	1 x in 12 h 1 x in 12 h 1 x in 12 h 1 x in 12 h

Für die Temperaturmessungen wurden in Abhängigkeit des Temperaturniveaus und des zu messenden Mediums unterschiedliche Instrumente verwendet. Alle Volumenstromtemperaturen wurden mittels Handthermometer mit NiCr-Ni-Fühler erfasst. Das gleiche Messgerät wurde ebenfalls für Ofenmehl, Kohlenstaub und Altöl verwendet. Dieses Gerät basiert auf elektrischer Widerstandsmessung; Widerstand und Temperatur korrelieren bei diesem Messprinzip, womit sich die Temperatur eindeutig bestimmen lässt. Die Umgebungstemperatur wird mit der werkseigenen Wetterstation aufgenommen und zentral im Leitstand visualisiert.

Besondere Verfahren sieht die VDZ-Richtlinie VT10 für die Temperaturmessung von Kalkklinker vor. Klinker wird als Kalkklinker bezeichnet, wenn er den Klinkerkühler verlässt. Hier wird dem Förderband eine Probe entnommen und einem Isolationsbehälter zugeführt. Der Isolationsbehälter ist mit einem PT100-Thermometer ausgestattet, welches Messdaten an einen graphischen Schreiber übergibt. Dieses Verfahren wird angewandt, um den Zeitverzug des Thermometers bis zum Temperaturgleichgewicht zu beurteilen. Eine rasche Abkühlung der Klinkerprobe wird durch die Isolation verhindert und eine graphische Extrapolation, lässt eine Bestimmung der wahren Klinkertemperatur, trotz des oben beschriebenen Zeitverzugs des Messgerätes zu.

Die Heißklinkertemperatur wird durch ein Glühfadenpyrometer (Optix, Fa. Keller) mittels Farbkorrelation bestimmt.

Strahlung und Konvektion bzw. die Oberflächentemperaturen der Anlagen werden durch ein Infrarot (Strahlungs-)pyrometer (Comet 8000 MaviTherm) gemessen und anschließend flächenspezifisch integriert.

Drücke

	Mess-Stelle	Zeitintervall
1.	nach Zyklonwärmetauscher	2 x während des Versuchszeitraums
2.	Ofeneinlauf	2 x während des Versuchszeitraums
3.	Ofenkopf	2 x während des Versuchszeitraums

Umgebungszustände

1.	Temperatur	stündlich während des Versuchszeitraums
2.	Luftdruck	1 x Tag
3.	relative Feuchte	1 x Tag

Gaszusammensetzung

	Mess-Stelle	Zeitintervall
1.	nach Zyklonwärmetauscher	2 x während des Versuchszeitraums
2.	Ofeneinlauf	2 x während des Versuchszeitraums
3.	Bypass -Abgas	2 x während des Versuchszeitraums

Elektrischer Energiebedarf

	Verbraucher-Gruppe	Zeitintervall
1.	Klinkerkühler	stündlich über Stromzähler; 24 h
2.	Ofenantrieb	stündlich über Stromzähler; 24 h
3.	Zyklonwärmetauscher-Gebläse	stündlich über Stromzähler; 24 h
4.	Feuerung	stündlich über Stromzähler; 24 h

Probenahmen

	Stoff	Menge	Zeitintervall	Menge nach Probenteilung für Labor
1.	Ofenmehl	1 kg	stündlich	Polab+24 h-Durchschnitt á 35 g
2.	Heißmehl Stufe 4	1L	2-stündlich	24 h-Durchschnitt á 35 g
3.	Klinker	5 kg	stündlich	Polab+24 h-Durchschnitt á 50 g
4.	Bypass-Staub	0,5L	2-stündlich	24 h-Durchschnitt á 35 g
5.	Rohgas-Staub	1 kg	3x in 24 h	während der Rohgasstaubverwiegung
6.	Petrolkoksstaub	2 kg	1 x in 24 h	
7.	Altreifen			Literaturwerte
8.	Altöl	1L	4-stündlich	24 h-Durchschnitt á 1L
9.	Altsand	1 kg	2-stündlich	
10.	Renoxal	1L	1x in 24 h je Tank	

Analysen

	Probe	Labor	durchzuführende Analysen
1.	Ofenmehl	Werk Werk HTC HTC Werk	NF-Bestandteile incl. SO ₃ mit RFA Glühverlust Cl, K ₂ O, Na ₂ O nasschemisch brennbare Bestandteile Feinheit/Feuchte
2.	Heißmehl	HTC Werk HTC	NF-Bestandteile incl. SO ₃ mit RFA Glühverlust Cl, K ₂ O, Na ₂ O nasschemisch
3.	Klinker	HTC Werk HTC Werk	NF-Bestandteile incl. SO ₃ mit RFA Glühverlust Cl, K ₂ O, Na ₂ O nasschemisch Freikalk
4.	Bypass-Staub	HTC Werk HTC	NF-Bestandteile incl. SO ₃ mit RFA Glühverlust Cl, K ₂ O, Na ₂ O nasschemisch
5.	Rohgas-Staub	HTC HTC HTC HTC	NF-Bestandteile incl. SO ₃ mit RFA Glühverlust Cl, K ₂ O, Na ₂ O nasschemisch Feuchte
6.	Altöl	HTC	Heizwert Hu Dichte, S, Cl
7.	Altreifen		Literaturwerte
8.	Kunststoffe	HTC	Heizwert, Cl, S, Feuchte, Elementaranalyse
9.	Gießereialtsand	HTC	umfassende Analyse
10.	Renoxal	HTC	Cl+Br, SO ₃ ,

4.2 Mess-Programm Stromerzeugungs-Anlage

Zieleinstellungen für den Versuchszeitraum

1.	Klinkerkühler		
	Abluftstrom	Nm ³ /h	150.000
	Abgastemperatur	°C	275
2.	Wärmeträgeröl		
	Temperatur vor ORC-Anlage	°C	230

Volumenströme

	Volumenstrom	Bestimmungsart	Zeitintervall
1.	Klinkerkühler-Abluft	Prandtlrohrmessung	4 x während des Versuchszeitraums
2.	Wärmeträgeröl	Druckdifferenzmessung an Venturirohr	stündlich während des Versuchszeitraums

Temperaturen

	Medium	Mess-Stelle	Zeitintervall
1.	Klinkerkühler-Abluft	vor Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
2.	Wärmeträgeröl	vor Pentan- Vorerhitzer	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Pentan-Verdampfer	stündlich während des Versuchszeitraums
3.	Pentan	vor Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Luft-Kondensator	stündlich während des Versuchszeitraums

Drücke

	Medium	Mess-Stelle	Zeitintervall
1.	Klinkerkühler-Abluft	vor Abhitzekeessel	2x im Versuch
		nach Abhitzekeessel	2x im Versuch
2.	Wärmeträgeröl	vor Förderpumpe	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Förderpumpe	stündlich während des Versuchszeitraums
		vor Venturi-Rohr	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Venturi-Rohr	stündlich während des Versuchszeitraums
		vor ORC-Anlage	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach ORC-Anlage	stündlich während des Versuchszeitraums
3.	Pentan	vor Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Abhitzekeessel	stündlich während des Versuchszeitraums
		nach Förderpumpe	stündlich während des Versuchszeitraums

Umgebungszustände

	Medium	Mess-Stelle	Zeitintervall
1.	Umgebungsluft	vor Luft-Kondensator	stündlich während des Versuchszeitraums

Elektrischer Energiebedarf

	Verbraucher-Gruppe	Ermittlungsart	Zeitintervall
1.	Generator	Stromzähler	stündlich während des Versuchszeitraums
2.	ORC-Nebenaggregate	Stromzähler	stündlich während des Versuchszeitraums
3.	ORC-Raumbelüftung	Stromzähler	stündlich während des Versuchszeitraums
4.	Wärmeträgeröl-Pumpe	Kennlinie Förderpumpe	stündlich während des Versuchszeitraums

5. Versuchsdurchführung und -ergebnisse

5.1 Umfang der Versuche

Im Rahmen der vom Land Bayern in Auftrag gegebenen begleitenden Anlagenuntersuchungen wurden zwischen Dezember 1999 und November 2000 insgesamt vier Versuche bei verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Ziel der Versuche war es, über einen Zeitraum von 12 Stunden alle relevanten Messergebnisse zu sammeln und anschließend zu bewerten. Die begleitenden Verwiegungen und Probenahmen an der Klinkerproduktionslinie erfolgten jeweils über einen Zeitraum von 24 Stunden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der vier Versuche dargestellt. Basis dieser gemittelten Werte sind die vier Einzelauswertungen, die als gesonderte Berichte dem Landesamt für Umweltschutz (LfU) vorliegen.

5.2 Versuchsdurchführung

5.2.1 Versuchsziele

Ziel der vier Langzeitversuche war es, die Ofenanlage und die Stromerzeugungsanlage in verschiedenen Leistungsbereichen und unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu betreiben. So wurde die Ofenanlage nicht nur im Nennleistungsbereich, sondern auch bei möglichst hoher Leistung unter Zugabe der verschiedenen genehmigten Sekundärstoffe betrieben.

In Kapitel 4 wurde das allgemeine Versuchs- und Analysenprogramm für die durchgeführten Messungen an der Ofen- und Stromerzeugungsanlage im Einzelnen bereits aufgeführt.

Überblick

Zielparameter für die Versuchszeiträume

			Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
1.	Klinker-Ofenleistung	t/d	3000	> 3000	~ 3000	~ 3000
2.	O ₂ -Gehalt nach WT	%	2	~ 2	~ 2	~ 2
3.	Bypass-Rate	%	2-4	2.5	2.4	~ 3
4.	Klinkerkühler-Abluftstrom	Nm ³ /h	150.000	160.000 165.000	150.000- 160.000	150.000- 155.000
5.	Abluft-Temperatur	°C	275	> 275	~ 275	> 275
6.	KST-Klinker		97	97	97	97
7.	Betriebsart		Verbund/ direkt im gl. Zeittakt	s. Vers. 1	s. Vers. 1	s. Vers. 1
8-	Hauptziele		Überprüfung der Ausle- gungswerte bei Auslegungs- Außentempe- ratur	Messung bei stark erhöhter Ofenleistung	Einfluss von höherer Umge- bungstemp. und neuer Zugabeein- richtung für Kunststoffe.	Auswirkung der Papier-Rest- stoffzugabe bei Normalbetrieb.

Brennstoffmix für die Versuche (Wärmeeintrag in das System)

			Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
1.	Petrolkoks	%	63,3	60,5	56,1	59,9
2.	Altöl	%	18,3	19,6	20,1	16,4
3.	Altreifen	%	7,8	9,7	8	9,9
4.	Kunststoff	%	9,5	9,1	14,9	12,9
5.	Papier-Reststoff	%	-	-	-	~ ± 0
6.	Gießereialsand	%	1,1	1,1	0,9	0,9
	Summe	%	100	100	100	100

- **Versuch 1; 1. Dezember 1999 - Durchführung und Ziele:**

Der 1. Versuch der Langzeituntersuchung wurde am 01.12.1999 über einen Zeitraum von 12 Stunden durchgeführt. Zur Überprüfung der für die Bewertung der Stromerzeugungsanlage vom Lieferanten vorgegebenen Umgebungstemperatur-Korrekturkurven, wurde der Zeitpunkt des Versuches in eine Jahreszeit gelegt, in der man Umgebungstemperaturen erwarten konnte, die denen des Lengfurter Jahresmittels in etwa entsprechen.

Versuchsziel war es die Ofenanlage möglichst nahe den für die Auslegung der Abhitzekeesselanlage relevanten Betriebswerten zu betreiben. D.h. Einstellung der Ofenlinie auf eine Klinkerproduktion von 3000 t/d Klinker mit einem Klinkerkühlerabluftvolumenstrom nach Elektrofilter von ca. 150.000 Nm³/h und 275 °C Ablufttemperatur. Der Brennstoffmix sollte dem üblichen Standard entsprechen, eine Zugabe von Papierreststoffen war nicht geplant.

- **Versuch 2; 30. Mai 2000 - Durchführung und Ziele**

Der 2. Versuch wurde am 30.05.2000 über einen Zeitraum von 12 Stunden durchgeführt.

Ziel dieses Versuchs war es, die Ofenanlage und die Stromerzeugungsanlage mit maximal möglicher Leistung zu betreiben; d.h. für die Ofenanlage eine Klinkerleistung von mehr als 3000 t/d und für den Klinkerkühler Klinkerkühlerablufttemperaturen nach Elektrofilter von mehr als 275 °C. Der Brennstoffmix entsprach bis auf einen leicht erhöhten Altölanteil dem üblichen Standard, eine Zugabe von Papierreststoffen war nicht geplant.

- **Versuch 3; 13./14. Sept. 2000 - Durchführung und Ziele**

Der 3. Versuch im Rahmen der Langzeituntersuchung wurde am 13./14. September 2000 über einen Gesamtzeitraum von 12 Stunden durchgeführt.

Ziel des 3. Versuchs war es, die Ofenanlage und die Stromerzeugungsanlage im Nennleistungsbereich zu betreiben; d.h. für die Ofenanlage eine Klinkerleistung von ca. 3000 t/d und für den Klinkerkühler Klinkerkühlerablufttemperaturen nach EGR von mindestens 275 °C.

Im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchen wurde bei diesem Versuch die Zugabemenge von Kunststoffresten mittels neuer Anlagentechnik im Vergleich zu den bisherigen Versuchen stark erhöht. (diese Anlagentechnik wurde Mitte 2000 in Betrieb genommen). Aus diesem Grund wurde auch für den 3. Versuch auf die Zugabe von Papierreststoffen verzichtet, um eine möglichst stabile Anlagenbetriebsweise zu gewährleisten. Weiterhin sollte gezeigt werden, wie sich der Außentemperatureinfluss im Spätsommer auf den Wirkungsgrad der Stromerzeugungsanlage auswirkt.

- **Versuch 4; 28. November 2000 - Durchführung und Ziele**

Der 4. Versuch der Langzeituntersuchung wurde am 28. November 2000 ebenfalls über einen Zeitraum von 12 Stunden durchgeführt.

Ziel dieses Versuchs war es, die Ofenanlage und die Stromerzeugungsanlage im Nennleistungsbereich unter Zugabe der genehmigten Sekundärstoffe zu betreiben. Für die Ofenanlage galt es, eine Klinkerleistung von ca. 3000 t/d und für den Klinkerkühler eine Klinkerkühlerablufttemperatur nach Elektrofilter von mindestens 275 °C zu erreichen. Im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchen wurde bei diesem Test der Einfluss der Papierreststoffzugabe auf den Prozess überprüft, da diese Betriebsweise bisher nicht untersucht worden war.

5.3.0 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der nachfolgenden Versuchsergebnisse basiert auf den, während des Versuchszeitraumes durchgeführten Messungen und den daraus ermittelten Massen-, Volumen- und Wärmebilanzen.

Die Ergebnisse der vier Einzelversuche werden in den nachfolgenden Tabellen mit den Auslegungswerten und den Mittelwerten der vier Versuche gegenübergestellt. Außerdem erfolgt eine Bilanzierung aller Einzelversuche.

Die Klinkerleistung der Ofenanlage lag bei den verschiedenen Messungen zwischen 2923 t/d und 3279 t/d (Auslegungsgröße für ORC-Anlage ist ca. 3000 t/d bei einer Klinkerkühlerablufttemperatur nach EGR von 275 °C).

5.3.1 Betriebswerte Klinkerkühler, Abhitzekessel und Wärmeträgeröl-Kreislauf

Die Betriebsbedingungen des Klinkerkühlers sowie der nachgeschalteten Abhitzekesselanlage während der verschiedenen Versuchszeiträume - im Vergleich zu den Auslegungsbedingungen - sind aus der nachfolgenden Gegenüberstellung ersichtlich. In der Tabelle sind die Mittelwerte über den berücksichtigten Versuchszeitraum (i.a. 12 h Versuchsdauer) dargestellt. Aufgrund von summierten Rundungsfehlern können die in den folgenden Tabellen angegebenen MW-Werte geringfügig von denen in den Wärmebilanz-Tabellen (Kapitel 5.3.7) angegebenen Werten differieren.

Auslegungs- und Betriebsdaten des Klinkerkühlers

		Auslegung	Ø Langzeit- versuche	1. Langzeit- versuch	2. Langzeit- versuch	3. Langzeit- versuch	4. Langzeit- versuch
Ofenleistung	t/d	3000	3067	2980	3279	3086	2923
Klinkerkühler-Zuluft	Nm ³ /h	249.371	242.845	246.065	258.085	247.038	220.193
Klinkerkühler- Abluftvolumenstrom	Nm ³ /h	165.984	161.413	159.221	178.829	166.219	141.383
Sekundärluft-Vol.strom	Nm ³ /h	100.639	117.867	109.060	123.217	128.810	110.380
Klinkerkühler-abluft- temp.	°C	276	289	278	298	302	279
Sekundärlufttemp. (Mittel aus gemessener und bilanzierter Tempera- tur)	°C	891	862	855	906	831	854
Heißklinker	°C	1354	1313	1294	1330	1306	1324
Kaltklinkertemp.	°C		147	120	151	140	177
Kühlerwirkungsgrad	%		64	65,8	65,4	62,1	63

Auslegungs- und Betriebsdaten Abhitzekeesselanlage

Abhitzekeessel		Auslegung	Ø Langzeit- versuche	1. Langzeit- versuch	2. Langzeit- versuch	3. Langzeit- versuch	4. Langzeit- versuch
Ofenleistung	t/d	3000	3.067	2.980	3.279	3.086	2.923
Abgas-Volumenstrom vor Abhitzekeessel	Nm ³ /h	150.000	132.257	125.489	141.737	136.302	125.612
Abgas Volumenstrom über Bypass geführt	Nm ³ /h	0	29.156	33.732	37.092	29.917	15.772
Klinkerkühler- abwärmestrom	MW	13,9	15,59	14,76	17,8	16,77	13,02
Wärmestrom vor Abhitzekeessel	MW	13,9	12,83	11,64	14,2	13,82	11,67
Wärmestrom nach Abhitzekeessel	MW	5,48	4,62	4,06	5,4	4,96	4,09
Wandwärmeverluste des Abhitzekeessels	MW	0,12	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05
ausgekoppelter Wär- mestrom über Wärme- trägerölkreislauf (incl. Wandwärmever- luste)	MW	8,42	8,16	7,57	8,78	8,85	7,58

Auslegungs- und Betriebsdaten des Wärmeträgeröl-Kreislaufs

Wärmeträgeröl-Kreislaufs		Auslegung	Ø Langzeitversuche	1. Langzeitversuch	2. Langzeitversuch	3. Langzeitversuch	4. Langzeitversuch
Wärmeträgeröltemp. nach Pentan- Vorerhitzer/Verdampfer	°C	85	85	82	89,8	87	84
Wärmeträgeröltemp. vor Pentan-Vorerhitzer/Verdampfer	°C	230	218	204	231	229	207
Wärmeträgeröl-Massenstrom	t/h	84,6	92,02	93,01	90,65	91,89	92,54
Wandwärmeverluste	MW	0,05	0,07	0,09	0,05	0,06	0,06
ausgekoppelter Wärmestrom (incl. anteiligem Wandwärmeverlust)	MW	8,2	8,07	7,41	8,6	8,74	7,46

5.3.2 Zusammenfassende Bewertung der Betriebsdaten – Klinkerkühler, ORC-Anlage

- Die Ofenanlage wurde während der Versuchszeiträume mit einer durchschnittlichen Klinkerproduktionsleistung von 3067 t Klinker/d (min. 2923 t/d, max. 3279 t/d) betrieben. Damit wurde die Auslegungsleistung von 3000 t/d um 2 % nur leicht überschritten.
- Der Klinkerkühler wurde im Mittel der vier Versuche mit den zum Auslegungszeitpunkt der Stromerzeugungsanlage angenommenen Werten betrieben. Die Werte der einzelnen Versuche lagen zwischen 220.193 und 258.085 Nm³/h (Zuluft) und zwischen 141.383 und 178.829 Nm³/h (Abluft). Die Bandbreite der Messwerte ergibt sich aus den verschiedenen Betriebsweisen und -zielen der während der Versuche.

- In den Versuchen zeigte sich, dass ein erheblicher Wärmestrom an dem Wärmeträgeröl-Abhitzekessel über die Absperr-Jalousienklappe in der sogenannten Bypassleitung vorbeigeführt wird. Während in den ersten Versuchen noch bis zu 20 % auf diese Weise über diese Klappe geleitet wurden, zeigte der letzte Versuch, dass durch konsequente Überprüfung und Justage der Klappe der Wärmestrom auf ca. 10 % des Gesamtwärmestromes vermindert werden konnte.
- Durchschnittlich wurden zum Abhitzekessel $132.257 \text{ Nm}^3/\text{h}$ mit einer Wärmeleistung von ca. 12,83 MW geführt. Damit lag die abgegebene Wärmeleistung der Klinkerkühlerabluft aufgrund des über die Jalousienklappe geführten Blindstromes um ca. 10 % unter dem Auslegungswert von 13,9 MW.
- Von der Abhitzekesselanlage wurden im Mittel 8,16 MW über den Thermoölkreislauf aus dem Klinkerkühlerabluft-Volumenstrom ausgekoppelt, was dem Auslegungswert von 8,2 MW sehr nahe kommt. (hier sind die Wandwärmeverluste bereits berücksichtigt).
In Abhängigkeit der Ablufttemperaturen und -volumenströme bewegte sich die ausgekoppelte Wärmemenge in einzelnen Versuchsphasen zwischen 5,7 MW und 9,7 MW und beweist damit die Flexibilität der ORC-Anlage. Die Wandwärmeverluste der Abhitzekesselanlage lagen im Durchschnitt bei ca. 0,05 MW.
- Von der ORC-Anlage wurden über den Pentan-Kreislauf im Pentan-Vorerhitzer und –Verdampfer im Mittel 8,07 MW aus dem Wärmeträgeröl-Kreislauf ausgekoppelt, was dem Auslegungswert von 8,2 MW nahe kommt. Die Wandwärmeverluste im Bereich des ORC-Anlagenteils ,ermittelt als Bilanzrest, lagen bei 0,07 MW.

5.3.2.1 Einzelbewertung der Versuche

Einzelbewertung Versuch 1:

- Die Ofenanlage produzierte während des Versuchszeitraums eine durchschnittliche Klinker-Leistung von 2.980 t/d.
- Der Klinkerkühler wurde gegenüber der Situation zum Zeitpunkt der Auslegung der Stromerzeugungsanlage mit einem um 9.221 Nm³/h und damit rd. 6 % höheren Abluftvolumenstrom betrieben. Aus der Kühlerbilanz und den im Reingaskamin durchgeführten Gasvolumenstrom-Messungen ergaben sich rechnerisch außergewöhnliche Falschlufteintritte von ca. 18.000 Nm³/h, die letztendlich auf Leckagen im Bereich der isolierten Abluft-Rohrleitungen zurückzuführen waren.
- Der Klinkerkühlerbereichs-Wirkungsgrad lag bei 65,8 % und damit rund 3 % unter dem zum Zeitpunkt der Auslegung der Stromerzeugungs-Anlage von 67,5 %, was mit dem Ziel der Betriebsweise, nämlich eine hohe Wärmezufuhr zum Abhitzekessel zu erreichen, zusammenhing.
- Durch die nicht einwandfrei schließen Absprerr-Jalousienklappen der Bypassleitung der Abhitzekesselanlage wurden unbeabsichtigt ca. 21 % des zur Verfügung stehenden Wärmestromes über eine Parallelleitung an der Abhitzekesselanlage vorbeigeleitet.
- Zum Abhitzekessel wurden 125.194 Nm³/h mit einer Wärmeleistung von 11,64 MW geführt.
- Über die Abhitzekesselanlage wurden aus dem Klinkerkühlerabluft-Volumenstrom 7,41 MW ausgekoppelt. Phasenweise konnten in den ersten vier Stunden des Versuches auf Grund hoher Abgastemperaturen von über 300°C über 8,2 MW ausgekoppelt werden.

Einzelbewertung Versuch 2:

- Die Ofenanlage wurde am 30.05.2000 während des Versuchszeitraums mit einer durchschnittlichen Klinkerproduktionsleistung von 3.279 t Klinker/d betrieben. In der Spitze konnte die Ofenanlage mit einer Leistung von bis zu 150 t Klinker/h betrieben werden, was im idealen Dauerbetrieb einer Tagesleistung von 3600 t/d entsprochen hätte.
- Der Klinkerkühlerbereichs-Wirkungsgrad liegt bei 65,4 % und damit um rd. 2 % unter dem Auslegungspunkt für das System (67,5 %).
- Der Klinkerkühler wurde gegenüber dem Auslegungszeitpunkt der Stromerzeugungsanlage mit einem um ca. 28.800 Nm³/h und damit rd. 19 % höheren Abluftvolumenstrom betrieben, der nur teilweise auf die höhere Durchsatzleistung des Ofens zurückzuführen ist.
- Zum Abhitzeessel wurden 141.737 Nm³/h mit einer Wärmeleistung von ca. 14,2 MW geführt. Damit lag die abgegebene Wärmeleistung der Klinkerkühlerabluft noch im Auslegungsbereich von 13,9 MW.
- Aus der Kühlerbilanz und den im Reingaskamin durchgeführten Gasvolumenstrom-Messungen ergaben sich rechnerisch Falschlufteintritte von ca. 11.250 Nm³/h. Dieser Wert ist im Vergleich zum ersten Versuch deutlich gesunken und ist auf Instandhaltungsmaßnahmen zurückzuführen. Der Falschlufzutritt ist hauptsächlich durch Zutritt am Klinkerabwurf (Abwurf auf Klinkertransportband) und am Klinkerstaubtransport zu erklären.
- Von der Abhitzeesselanlage wurden über den Thermoölkreislauf 8,78 MW (Auslegungswert: 8,4 MW) aus dem Klinkerkühlerabluft-Volumenstrom ausgekoppelt. Phasenweise konnten während des Versuchs auf Grund von Ablufttemperaturen von mehr als 300 °C fast 9,5 MW über den Wärmeträgerölkreislauf ausgekoppelt werden. Damit wurde die obere Leistungsgrenze der Stromerzeugungsanlage angefahren.

Einzelbewertung Versuch 3:

- Die Ofenanlage erzeugte am 13.09. und 14.09.2000 während des Versuchszeitraums eine durchschnittliche Klinkerproduktionsleistung von 3.086 t Klinker/d (gegenüber Auslegungsleistung von 3000 t/d).
- Der Klinkerkühler wurde gegenüber dem Auslegungszeitpunkt der Stromerzeugungsanlage mit einem um ca. 16.000 Nm³/h und damit rd. 10 % höheren Abluftvolumenstrom betrieben. Der Grund liegt in einer Kühlerbetriebsweise, die gezielt mehr Luft in den mittleren Bereich des Kühlers leitet (höherer Enthalpiestrom für die Verstromungsanlage).
- Der Klinkerkühlerbereichswirkungsgrad lag bei dem Versuch ungewöhnlich niedrig bei 62,1 % (ohne Berücksichtigung der verstromten Wärmeenergie), da die Priorität der Kühlerbetriebsweise in einer guten Ausnutzung der ORC-Anlage liegt (Kühlerauslegung 67,5 %).
- Durch die nicht völlig gasdicht schließende Jalousien-Absperrklappe der Bypassleitung der Abhitzekesselanlage wurden je nach Temperaturbedingungen zwischen 10 % und 16 % des zur Verfügung stehenden Wärmestromes über den Bypass an der Abhitzekesselanlage vorbeigeleitet. Insbesondere bei Temperaturen deutlich über 300 °C nach EGR wird die Absperrklappe thermisch so beaufschlagt, dass die Spaltmaße der Jalousie etwas größer werden und damit einen höheren Blindstrom zulassen.
- Zum Abhitzekessel wurden 136.302 Nm³/h mit einer Wärmeleistung von ca. 13,8 MW geführt. Damit lag die abgegebene Wärmeleistung der Klinkerkühlerablufte nur knapp unter dem Bereich des Auslegungswertes von 13,9 MW.
- Von der Abhitzekesselanlage wurden über den Thermoölkreislauf 8,8 MW (Auslegungswert: 8,4 MW) aus dem Klinkerkühlerablufte-Volumenstrom ausgekoppelt (unter Berücksichtigung der Wandwärmeverluste). Bestätigt wurden die Erfahrungen aus dem zweiten Versuch, dass mit Ablufttemperaturen von 300 – 320 °C bis zu 9,4 MW über den Wärmeträgerölkreislauf ausgekoppelt werden können. Damit wird zeitweise die obere Leistungsgrenze der Stromerzeugungsanlage angefahren.

Einzelbewertung Versuch 4:

- Die Ofenanlage wurde mit einer durchschnittlichen Klinkerproduktionsleistung von 2.923 t Klinker/d (gegenüber Auslegungsleistung von 3000 t/d), betrieben.
- Der Klinkerkühler wurde gegenüber dem Auslegungszeitpunkt der Stromerzeugungsanlage mit einem um ca. 9.000 Nm³/h und damit rd. 6 % geringeren Abluftvolumenstrom betrieben. Der Grund dafür lag in einer Kühlerbetriebsweise mit einer gezielt reduzierten Luftmenge im hinteren Bereich des Kühlers, um eine geringere Staubbeladung der Kühlerabluft zu erreichen. Aufgrund der geringeren Kühlluftmenge in diesem Bereich konnte auch die Klinkerkalttemperatur nicht auf die niedrigeren Werte der vorangegangenen Versuche abgesenkt werden. Die Kaltklinkertemperatur lag mit ca. 177°C gerade noch in einem tolerierbaren Bereich.
- Der Klinkerkühlerbereichs-Wirkungsgrad lag bei diesem Versuch aufgrund der beschriebenen Kühlerbetriebsweise bei ca. 63 % (ohne Berücksichtigung der verstromten Wärmeenergie).
- Wie in den vergangenen Versuchen schon festgestellt, schließt die Jalousien-Absperrklappe der Abhitzeessel-Bypassleitung nicht gasdicht. Bei diesem vierten Versuch wurde halbstündlich manuell überprüft, ob die Jalousieklappe tatsächlich gegen den mechanischen Anschlag gefahren war und wurde ggf. vor Ort in die mechanische Endlage gebracht. Trotz dieser Überprüfung und Korrektur und abhängig von den Temperaturbedingungen wurden rechnerisch zwischen 6 % und 15 % des Abluftvolumenstroms über diesen Bypass an der Abhitzeesselanlage vorbeigeleitet. Durch die jeweilige Nachjustierung konnte der Blindstrom von durchschnittlich 17 – 20% (aus den vorangegangenen Versuchen) auf etwa 10 % Wärmeleistung verringert werden.
- Zum Abhitzeessel wurden 125.612 Nm³/h mit einer Wärmeleistung von ca. 11,67 MW geführt. Damit lag die abgegebene Wärmeleistung der Klinkerkühlerabluft deutlich unter dem Bereich des Auslegungswertes von 13,9 MW. Insgesamt wurden aufgrund der besonderen Kühlerbetriebsbedingungen fast 25.000 Nm³/h weniger gegenüber der Auslegung über den Wärmetauscher geführt.

5.3.4 Betriebswerte Stromerzeugung

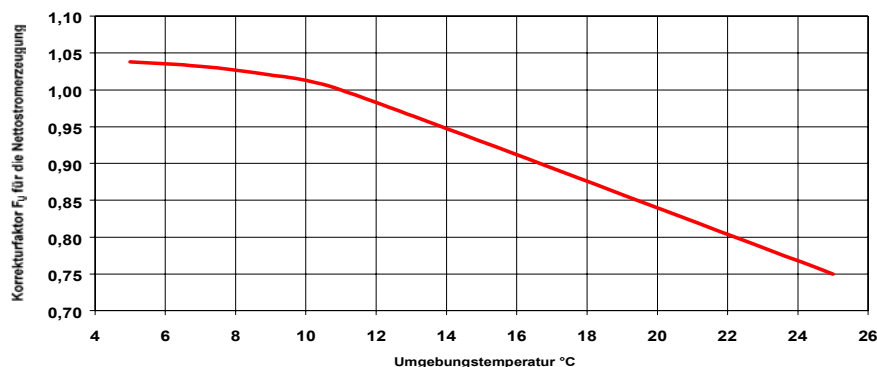
Stromerzeugung bezogen auf Auslegungsdaten (Werte in kW)

Stromerzeugung	Auslegung	Ø Langzeitversuche	1. Langzeitversuch	2. Langzeitversuch	3. Langzeitversuch	4. Langzeitversuch
Bruttostromerzeugung	1320	1206	1094	1386	1253	1089
ORC-Nebenaggregate	- 190	- 170	- 157	- 180,8	- 184	- 157
Nettostromerzeugung gem. Betriebsbedingungen	1130	1036	936	1205	1069	932
Gutschrift aus Korrektur	0	+ 174	+ 224	+ 19	+ 169	+ 284
Nettostromerzeugung ORC-Anlage	1130	1200	1160	1224	1238	1216
Rückrechnung gem. Auslegung						
Wärmeträgeröl-Pumpe	32	- 37	- 33	- 33	- 41	- 41
ORC Gebäudebelüftung *	0	- 9,8	- 13	- 12	- 8	- 6
6kV-Transformatorverluste *	0	- 36,5	- 33	- 42	- 38	- 33
Effektive Nettostromerzeugung des Gesamtsystems	1098	1117	1081	1137	1151	1136

* die ORC Gebäudebelüftung und der 6kV-Transformator mussten nachträglich eingeplant werden

Aufgrund der temperaturabhängigen Eigenschaftsänderungen der Arbeitsfluide und der Auslegung der Anlage auf eine Umgebungstemperatur von 11 °C muss bei der Ermittlung der tatsächlichen Stromerzeugung ein Korrekturfaktor ermittelt werden. Dieser Korrekturfaktor ist in der u.a. Grafik zu ermitteln und für die Berechnung der Netto-Stromerzeugung einzuschließen.

Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Nettostromerzeugungsleistung bei einer Wärmeträgeröleintrittstemperatur von 230°C



5.3.5 Zusammenfassende Bewertung der Strombilanzierung

- Unter den dargestellten Betriebsbedingungen betrug die durchschnittliche Bruttostromerzeugung der ORC-Anlage während des Versuchszeitraumes 1206 kW.
- Die bereitgestellte Leistung für die Nebenaggregate der ORC-Anlage, wie Pentan-Pumpe, Ventilatoren des Luftkondensators und der Turbinenlagerölschmierung betrug im Mittel zusammen ca. 170 kW. Damit wurde unter den gegebenen Betriebsbedingungen ohne Berücksichtigung der Temperaturkorrekturen für das Wärmeträgeröl eine durchschnittliche Nettostromerzeugung der ORC-Anlage von 1036 kW erzielt. Dem steht die Auslegungsgröße von 1130 kW gegenüber.
- Im Mittel lag damit die Netto-Stromerzeugung ca. 8 % unter dem Auslegungspunkt, was durch das in Kapitel 5.3.2 beschriebene Problem mit der nicht gasdicht schließenden Jalousienklappe größtenteils zu erklären ist.
- Unter Berücksichtigung der Temperatur-Korrekturfaktoren für das Thermoöl ergibt sich eine mittlere Nettostromerzeugung der ORC-Anlage von 1200 kW. Dieses Resultat liegt um ca. 7 % über dem vom Lieferanten abgegebenen Garantiewert von 1130 kW.
- Berücksichtigt man die zusätzlichen Verbraucher, wie Wärmeträgerölpumpe, ORC-Gebäuderaumbelüftung, sowie die Trafo-Verluste bei der Einspeisung, so konnte im Durchschnitt eine effektive Nettostromerzeugung von 1117 kW erzielt werden (Planzahl liegt bei 1098 kW).
- Der Wirkungsgrad der Anlage (Verhältnis von ausgekoppelter Energie zur Nettostromenergie) bewegt sich im Bereich zwischen 12,9 und 14,9 %. Im Durchschnitt wird ein Wirkungsgrad von 13,7 % erreicht.

5.3.5.1 Strombilanzierung - Einzelbewertung der Versuche

Einzelbewertung Versuch 1:

- Von der ORC-Anlage wurden über den Pentan-Kreislauf im Pentan-Vorerhitzer und -Verdampfer aus dem Wärmeträgeröl-Kreislauf 7,41 MW ausgekoppelt.
- Unter den zuvor aufgeführten Betriebsbedingungen betrug die durchschnittliche Bruttostromerzeugung der OEC-Anlage (OEC = ORC-Energy-Converter) während des Versuchszeitraums 1094 kW. Die bereitgestellte Leistung für die Nebenaggregate der OEC- Anlage (Pentan-Pumpe, Ventilatoren des Luftkondensators und der Turbinenlagerölschmierung) betrug 157 kW. Damit beträgt die nicht temperaturkorrigierte Nettostromerzeugung der ORC-Anlage 936 kW.
- Berücksichtigt man neben dem Korrekturfaktor für die Außentemperatur (hier: 0,81) auch die zusätzlichen Verbraucher, wie Wärmeträgeröl-Pumpe, OEC-Gebäuderaumbelüftung, so ergibt sich eine effektive Nettostromerzeugung von 1081 kW.

Einzelbewertung Versuch 2:

- Die durchschnittliche Bruttostromerzeugung der ORC-Anlage während des Versuchszeitraums 1386 kW. Über längere Phasen (ca. 3 Stunden) konnte sogar die Leistungsgrenze der Anlage von 1500 kW angefahren werden.
- Die bereitgestellte Leistung für die Nebenaggregate der OEC- Anlage für Pentan-Pumpe, Ventilatoren des Luftkondensators und der Turbinenlagerölschmierung betrug zusammen 180 kW. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors (0,98) sowie der zusätzlichen Verbraucher (Wärmeträgeröl-Pumpe, OEC-Gebäuderaumbelüftung) ergibt sich eine Nettostromerzeugung der OEC- Anlage von insgesamt von 1137 kW (Garantiewert von 1130 kW).

Einzelbewertung Versuch 3:

- Unter den dargestellten Betriebsbedingungen betrug die durchschnittliche Bruttostromerzeugung der OEC-Anlage während des Versuchszeitraums 1253 kW.
- Aufgrund der höheren Außentemperaturen ergab sich aus den Korrekturkurven für die Wärmeträgeröl-Durchflussmenge und -Eintrittstemperatur ein Korrekturfaktor von 0,87. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors und der zusätzlichen Verbraucher (Wärmeträgeröl-Pumpe, OEC-Gebäuderaumbelüftung), ergibt sich eine effektive Nettostromerzeugung von 1151 kW.

Einzelbewertung Versuch 4:

- Unter den dargestellten Betriebsbedingungen betrug die durchschnittliche Bruttostromerzeugung der OEC-Anlage während des Versuchszeitraumes 1089 kW und lag damit deutlich unter dem Auslegungswert. Aufgrund der Kühlerbetriebsweise war das jedoch zu erwarten.
- Unter Berücksichtigung des Temperatur-Korrekturfaktors und der zusätzlichen Verbraucher (wie Wärmeträgeröl-Pumpe, OEC-Gebäuderaumbelüftung), ergibt sich eine effektive Nettostromerzeugung von 1136 kW.

5.3.6 Bewertung der Energiebilanz

5.3.6.1 Brennstoffenergie

Basierend auf den Ergebnissen der Einzelversuche ergab sich im Mittel für die Herstellungsstufe „Klinkerbrennbetrieb“ ein spezifischer Energieleistungsbedarf von 0,94 MWh/t Klinker. Hiervon wurden ca. 40 % durch Sekundärbrennstoffe gedeckt.

Brennstoff-Energiemix als Durchschnitt der Versuche

	Energieträger	Brennstoff-energie	Verbrauch MWh/h	Verbrauch MWh/t Kli.	Energieanteil
1.	Petrolkoks	Primär-energie	72,66	0,566	60
2.	Altöl	Sekundär-energie	22,52	0,176	18,6
3.	Altreifen	Sekundär-energie	10,78	0,084	8,9
4.	Kunststoff	Sekundär-energie	14,05	0,11	11,6
5.	Papier-Rest-stoff	Sekundär-energie	0	0	~ ± 0
6.	Gießereialt-sand	Rohstoff	1,09	0,008	< 1
	Summe		121,1	0,944	100

5.3.6.2 Elektrische Energie

Aus dem Durchschnitt der vier Versuche ergibt sich für die Produktionsstufe „Klinkerbrennbetrieb“ ein elektrischer Leistungsbedarf von 4.188 kWh/h. Durch die Eigenerzeugung von Strom mittels der ORC-Anlage wird der Fremdleistungsbedarf an elektrischer Energie in dieser Produktionsstufe um 26 % auf 3.071 kWh/h gesenkt.

Bezogen auf den gesamten elektrischen Energiebedarf von Klinkerproduktion und Zementmahlung reduziert sich der Fremdleistungsbezug um ca. 10 %.

**Bilanz der elektrischen Energieverbraucher bezogen auf die
Produktionsstufe Klinkerbrennbetrieb**

Elektrische Energie	Verbraucher/Erzeuger	Mittel [KWh/h]	Verbrauch [kWh/t Kli.]	Anteil %
Ofenanlage	Klinkerkühler			
	Ofenrohr Feuerung Wärmetauscher Gesamt-Summe	4188,1	32,6	100,0%
Stromerzeugung	Generator*	-1373,0	-10,7	-32,8%
	Pentanpumpe			siehe Summe OEC
	Luftkondensator			siehe Summe OEC
	Ölschmierung			siehe Summe OEC
	Summe OEC-Konverter	209,0	1,6	5,0%
	Wärmeträgerölpumpe	37,0	0,3	0,9%
	OEC-Gebäudebelüftung	9,8	0,1	0,2%
	Trafo-Verluste	38,5	0,3	0,9%
	Gesamtsumme	-1117,2	-8,7	-26,7%
	Total	3070,9	23,9	73,3%

*bezogen auf 11 °C und Berücksichtigung einer Messtoleranz von 3 %

5.3.6.3 Energieeffizienz

- **Gesamtanlage – Klinkerkühler/ORC-Anlage:**

Für den Klinkerkühler in seiner Gesamtheit in Verbindung mit der ORC-Anlage ergibt sich aus den dargestellten Werten eine Erhöhung der Effizienz um 2,3 % aufgrund der Gewinnung von elektrischer Energie aus der Kühlerabluft.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Energieeintrag in den Kühler:	1,448 MJ/kg
Rückgewinnung von 1,2 MW elektr. zusätzlich zur Rückgewinnung von heißer Verbrennungsluft:	0,034 MJ/kg

Effizienzsteigerung: ~ 2,3 %

- **Teilanlage – Klinkerkühlerabluft:**

Sofern die Klinkerkühlerabluft isoliert betrachtet wird, verringern sich die Energieabgaben an die Umwelt erheblich. Sofern nur der Wärmeverlust über Abluftkamin, die Wärmeauskopplung der Luftkühler der ORC-Anlage sowie die Wandwärmeverluste betrachtet werden, ergibt sich eine erhebliche Verbesserung der Energieausnutzung.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Abgabe von Energie über Abluftkamin ohne ORC-Anlage:	~ 0,438 MJ/kg
Abgabe von Energie über Abluftkamin und ORC-Luftkühler nach Installation der ORC-Anlage:	0,315 MJ/kg

Minderung der Energieverluste: ~ 28 %

- **Teilbereich – Kühlerabluft und ORC-Anlage:**

Für die Klinkerkühlerabluft ergibt sich aus den dargestellten Werten eine Energieeffizienz von 7,8 % aufgrund der Gewinnung von elektrischer Energie aus der Kühlerabluft.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Energieaustrag durch Kühlerabluft:	0,438 MJ/kg
Rückgewinnung von 1,2 MW elektr. zusätzlich zur Rückgewinnung von heißer Verbrennungsluft:	0,034 MJ/kg

Effizienz: ~ 7,8 %

- **Teilbereich – Wärmeträgerölanlage/ORC-Anlage:**

Für den Bereich der Wärmeauskopplung im Wärmeträgerölkessel ergibt sich aus den dargestellten Werten eine Effizienz von 14,7 % durch die Gewinnung von elektrischer Energie aus der Kühlerabluft.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Energieauskopplung über Wärmetauscher der Wärmeträgerölanlage:	0,231 MJ/kg
Rückgewinnung von 1,2 MW elektr.:	0,034 MJ/kg

Effizienz: ~ 14,7 %

- **Teilbereich – Pentankreislauf/ORC-Anlage:**

Für den Bereich der Wärmeauskopplung im Pentanverdampfer ergibt sich aus den dargestellten Werten eine Effizienz von 94,7 % für diesen Bereich.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Gesamtenergieangebot durch Wärmeträgeröl:	0,374 MJ/kg
Energieinhalt des Pentan vor Turbine:	0,354 MJ/kg

Effizienz: ~ 94,7 %

- **Teilbereich – Turbine/Generator:**

Für den Bereich der Energieumwandlung in der Turbine und im Generator ergibt sich aus den dargestellten Werten eine Effizienz von ca. 28 %.

Folgende Daten (bezogen auf Klinker) sind dabei zugrunde gelegt:

Energieangebot vor Turbine:	0,354 MJ/kg
abzügl. Energie nach Turbine:	0,232 MJ/kg
Auskopplung elektr. Energie (1,2 MW):	0,034 MJ/kg
Effizienz:	~ 27,9 %

5.3.7 Wärmebilanzen der Einzelversuche und der Auslegung

5.3.7.1 Versuch 1

Abhitzeessel		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg°C		MW	
			Nm3/h			kJ/nm3°C			
Einnahmen									
Kühlerabluft	Eintritt Abhitzeessel		125376	278		1,32	11,63		367
Wärmeträgeröl	Eintritt Abhitzeessel		93007	82		2,36	4,99		
Summe							16,62		
Ausgaben									
Kühlerabluft	nach Abhitzeessel		125376	114		1,31	4,06		
Wärmeträgeröl *	Austritt Abhitzeessel		93007	205		2,36	12,49		
Wandwärmeverluste	Abhitzeessel						0,07		
Summe							16,62		
Verluste der	Wärmeträgerölleitung						0,09		
Wärmeträgeröl	vor Pentan-Voererh.						12,40		

Wärmeträgerötemp. temperatur von 205,69°C auf 205,1°C korrigiert

OEC-Anlage		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg		MW	
			Nm3/h			kJ/Nm3			
Einnahmen									
Wärmeträgeröl *	vor Pentan-Voererh.		93007	204	0	2,35	12,40		
Pentan	vor Pentan-Voererh.		50580	56	16,2	4,79	3,78		269
Summe							16,18		
Ausgaben									
Wärmeträgeröl	nach Pentan-verd.		93007	82		2,35	4,99		
Wandwärmeverluste	OEC						0,10		
Pentan	nach Pentan-Verd.		50580	150	15,8	5,26	11,09		790
Summe							16,18		

Turbine		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg		MW	
			Nm3/h			kJ/Nm3			
Einnahmen									
Pentan	vor Turbine		50580	150	15,8	5,26	11,09		790
Summe							11,09		
Ausgaben									
Pentan	nach Turbine		50580	85	0,9	5,95	7,10		506
Turbine	adiabate Leistung						3,99		
Summe							11,09		

Rückkühler		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg		MW	
			Nm3/h			kJ/Nm3			
Einnahmen									
Pentan	nach Turbine		50580	85	0,9	5,95	7,10		506
Pentan	nach Pentan-Pumpe		50580	17	16,23	7,15	1,70		121
Summe							8,80		
Ausgaben									
Pentan	vor Pentan-Vorerhitzer		50580	56	16,23	4,79	3,78		269
Pentan	vor Kondensator		50580	58	0,84	6,19	5,03		358
Summe							8,80		

Kondensator		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg		MW	
			Nm3/h			kJ/Nm3			
Einnahmen									
Pentan	vor Kondensator		50580	58	0,84	6,19	5,03		358
Luft	vor Kondensator		1315116	7		1,30	3,32		
Summe							8,34		
Ausgaben									
Pentan	nach Kondensator		50580	13	0,80	9,30	1,70		121
Luft	nach Kondensator		1315116	14		1,30	6,64		
Summe							8,34		

Pentan-Pumpe		1. Versuch	kg/h	°C	bar	kJ/kg		MW	
			Nm3/h			kJ/Nm3			
Einnahmen									
Pentan	vor Pumpe		50580	13	0,80	9,3	1,70		121
Pumpleistung							1,70		
Ausgaben									
Pentan	nach Pumpe		50580	17	16,23	7,2	1,70		121

5.3.7.4 Versuch 4

Abhitzeessel		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg°C	MW	
				Nm3/h			kJ/nm3°C		
Einnahmen									
Kühlerabluft	Eintritt Abhitzeessel			125612	279		1,32	11,68	368
Wärmeträgeröl	Eintritt Abhitzeessel			92540	84		2,36	5,08	
Summe								16,76	
Ausgaben									
Kühlerabluft	nach Abhitzeessel			125612	115		1,31	4,09	
Wärmeträgeröl *	Austritt Abhitzeessel			92540	207		2,36	12,60	
Wandwärmeverluste	Abhitzeessel							0,07	
Summe								16,76	
Verluste der Wärmeträgeröl	Wärmeträgerölleitung vor Pentan-Voererh.							0,06	
								12,54	

OEC-Anlage		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg	MW	
				Nm3/h			kJ/Nm3		
Einnahmen									
Wärmeträgeröl *	vor Pentan-Voererh.			92540	207		2,36	12,54	
Pentan	vor Pentan-Voererh.			53650	62	17,1	4,67	4,35	292
Summe								16,89	
Ausgaben									
Wärmeträgeröl	nach Pentan-verd.			92540	84	0	2,36	5,08	
Wandwärmeverluste	OEC							0,04	
Pentan	nach Pentan-Verd.			53650	150	15,8	5,26	11,77	790
Summe								16,89	

* incl. Wärmeverlusten

Turbine		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg	MW	
				Nm3/h			kJ/Nm3		
Einnahmen									
Pentan	vor Turbine			53650	150	15,8	5,26	11,77	790
Summe								11,77	
Ausgaben									
Pentan	nach Turbine			53650	88	0,9	5,91	7,76	520
Turbine	adiabate Leistung							4,02	
Summe								11,77	

Rückkühler		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg	MW	
				Nm3/h			kJ/Nm3		
Einnahmen									
Pentan	nach Turbine			53650	88	0,9	5,91	7,76	520
Pentan	nach Pentan-Pumpe			53650	21	17,10	6,12	1,96	132
Summe								9,72	
Ausgaben									
Pentan	vor Pentan-Vorerhitzer			53650	59	17,10	4,75	4,17	280
Pentan	vor Kondensator			53650	60,7	0,84	6,13	5,55	372
Summe								9,72	

Kondensator		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg	MW	
				Nm3/h			kJ/Nm3		
Einnahmen									
Pentan	vor Kondensator			53650	60,7	0,84	6,13	5,55	372
Luft	vor Kondensator			1315116	7,5		1,30	3,57	
Summe								9,12	
Ausgaben									
Pentan	nach Kondensator			53650	19	0,80	7,65	2,14	143
Luft	nach Kondensator			1315116	15		1,30	6,98	
Summe								9,12	

Pentan-Pumpe		4. Versuch		kg/h	°C	bar	kJ/kg	MW	
				Nm3/h			kJ/Nm3		
Einnahmen									
Pentan	vor Pumpe			53650	19	0,80	7,65	2,14	143
Pumpleistung	Bilanzrest							0,006	
Summe								2,14	
Ausgaben									
Pentan	nach Pumpe			53650	23	17,10	6,1	2,14	144
Summe								2,14	

5.3.7.5 Versuchsdurchschnitt

Abhitzekessel	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg°C kJ/nm3°C	MW	
Einnahmen							
Kühlerabluft	Eintritt Abhitzekessel	132257	289		1,32	12,83	382
Wärmeträgeröl	Eintritt Abhitzekessel	92022	85		2,38	5,16	
Summe						17,99	
Ausgaben							
Kühlerabluft	nach Abhitzekessel	132257	121		1,31	4,62	
Wärmeträgeröl	Austritt Abhitzekessel	92022	218		2,38	13,32	
Wandwärmeverluste	Abhitzekessel					0,057	
Summe						17,99	
Verluste der Wärmeträgerölleitung	Wärmeträgerölleitung					0,05	
Wärmeträgeröl	vor Pentan-Voererh.					13,27	

OEC-Anlage	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg kJ/Nm3	MW	
Einnahmen							
Wärmeträgeröl *	vor Pentan-Voererh.	92022	218		2,38	13,27	
Pentan	vor Pentan-Voererh.	55200	64	19,27	4,64	4,59	299
Summe						17,86	
Ausgaben							
Wärmeträgeröl	nach Pentan-verd.	92022	85	0	2,38	5,18	
Wandwärmeverluste	OEC					0,07	
Pentan	nach Pentan-Verd.	55200	157	17,7	5,24	12,61	822
Summe						17,86	

* incl. Wärmeverlusten

Turbine	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg kJ/Nm3	MW	
Einnahmen							
Pentan	vor Turbine	55200	157	17,7	5,24	12,61	822
Summe						12,61	
Ausgaben							
Pentan	nach Turbine	55200	92	1,1	5,86	8,25	538
Turbine	adiabate Leistung					4,36	
Summe						12,61	

Rückkühler	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg kJ/Nm3	MW	
Einnahmen							
Pentan	nach Turbine	55200	92	1,1	5,86	8,25	538
Pentan	nach Pentan-Pumpe	55200	29	19,27	5,66	2,47	161
Summe						10,73	
Ausgaben							
Pentan	vor Pentan-Vorerhitzer	55200	65	19,27	4,64	4,6	300
Pentan	vor Kondensator	55200	65	1,03	6,15	6,12	399
Summe						10,73	

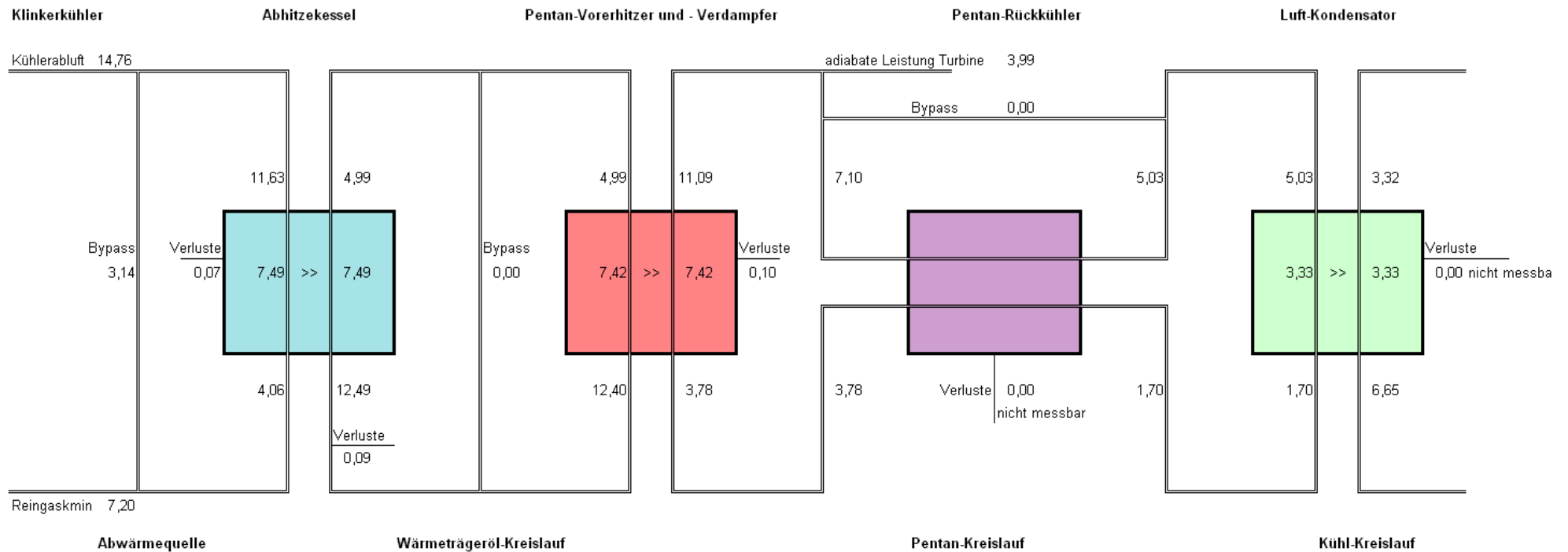
Kondensator	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg kJ/Nm3	MW	
Einnahmen							
Pentan	vor Kondensator	55200	65	1,03	6,15	6,12	399
Luft	vor Kondensator	1315116	11		1,30	5,28	
Summe						11,40	
Ausgaben							
Pentan	nach Kondensator	55200	25	0,97	6,58	2,46	164
Luft	nach Kondensator	1315116	18,9		1,30	8,94	
Summe						11,40	

Pentan-Pumpe	Durchschnitt 1-4	kg/h Nm3/h	°C	bar	kJ/kg kJ/Nm3	MW	
Einnahmen							
Pentan	vor Pumpe	55200	25	0,97	6,58	2,46	164
Pumpleistung	Bilanzrest (< 0,12)					0,01	
Summe						2,47	
Ausgaben							
Pentan	nach Pumpe	55200	29	19,27	5,66	2,47	161
Summe						2,47	

5.3.7.6 Blockbilddarstellung der Ergebnisse

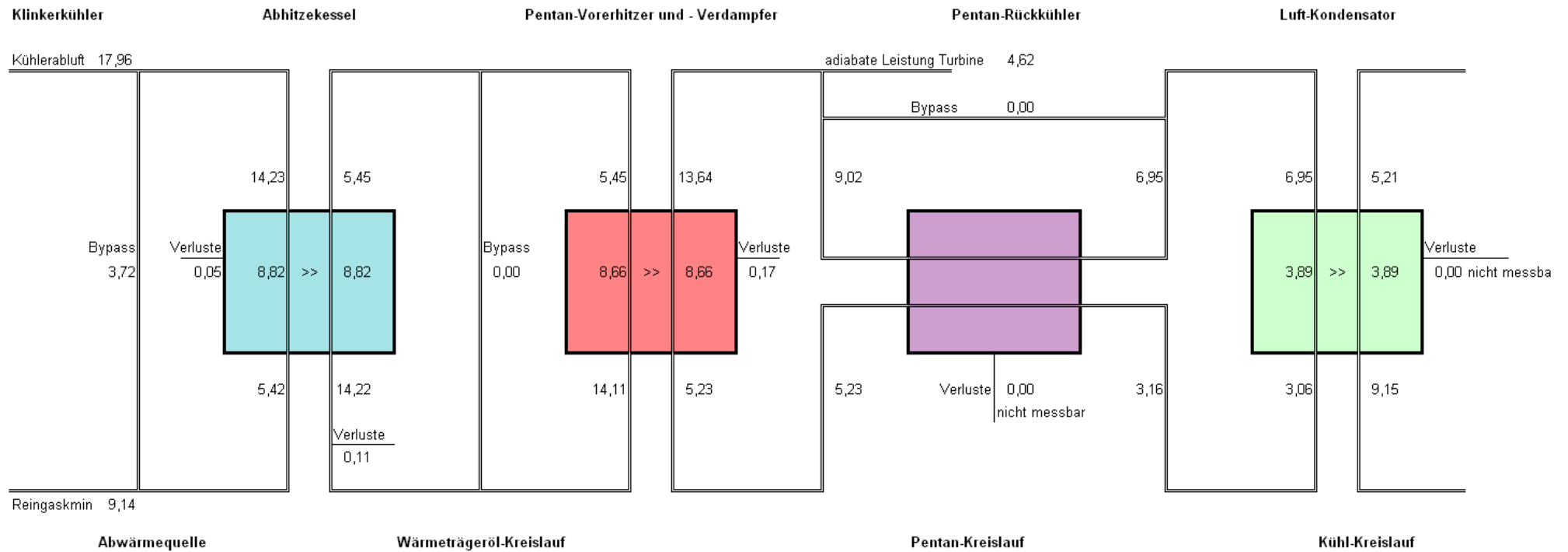
- **Auswertung Blockschaltbild – Versuch 1**

Langzeitversuch Nr. 1
Werte in MW



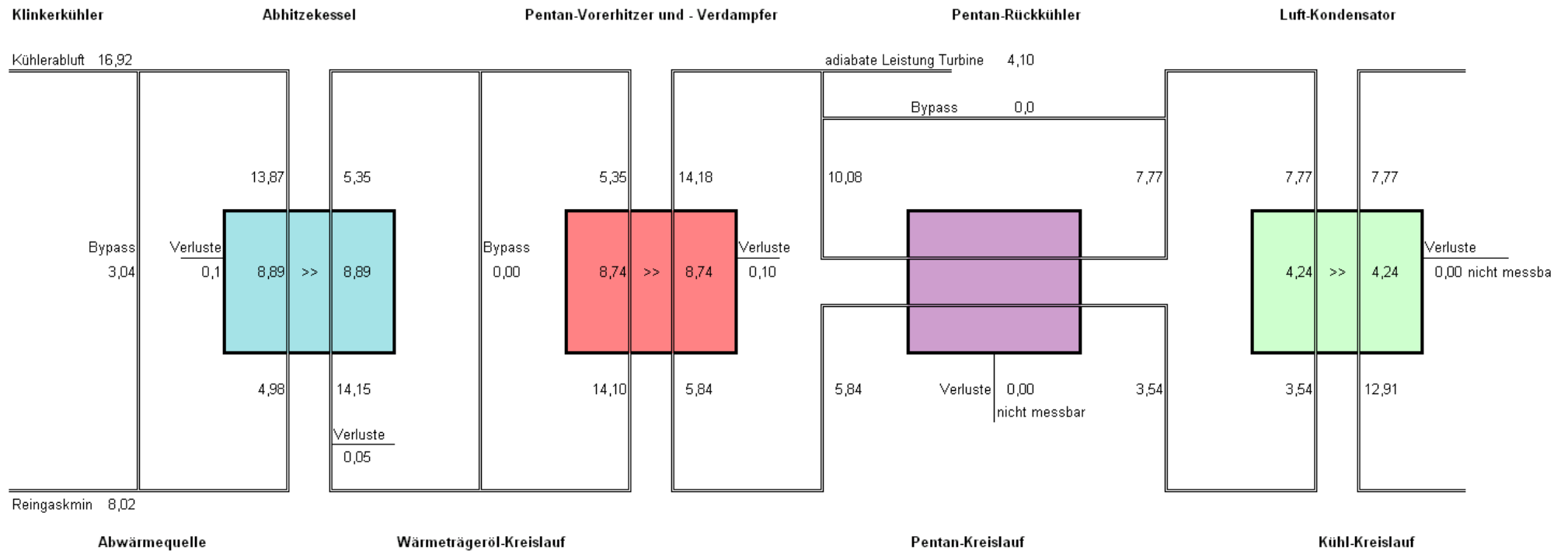
• Auswertung Blockschaltbild – Versuch 2

Langzeitversuch Nr. 2
Werte in MW



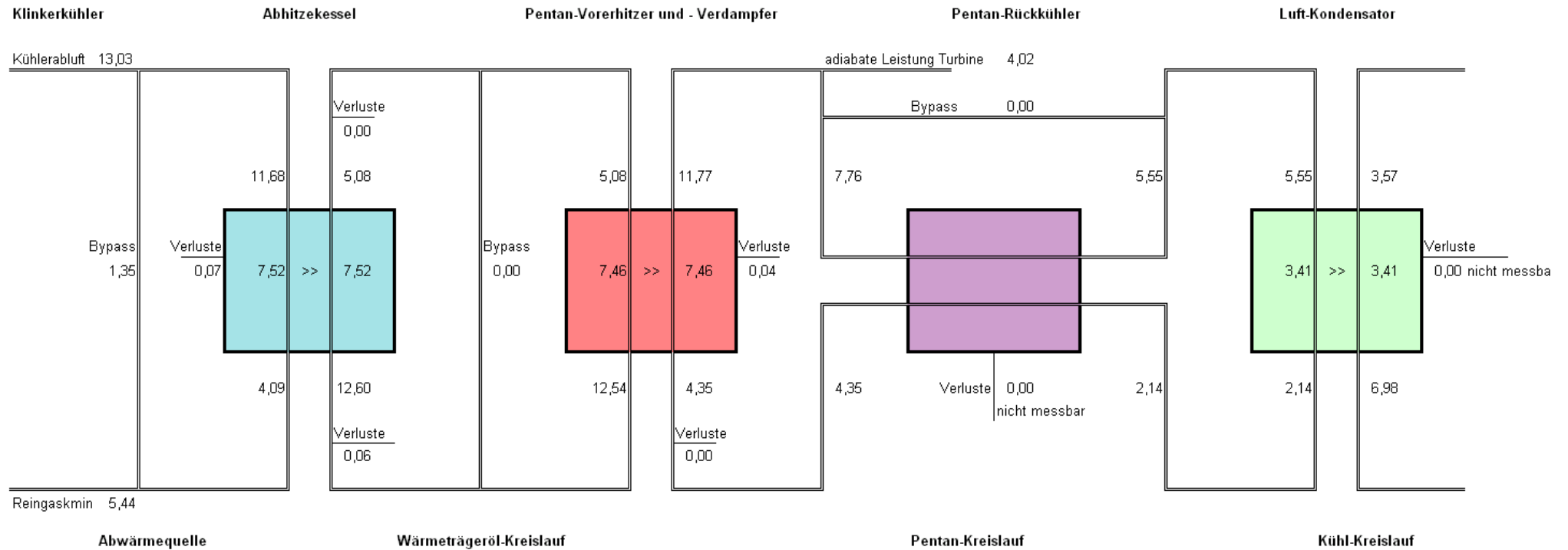
• Auswertung Blockschaltbild – Versuch 3

Langzeitversuch Nr. 3
Werte in MW



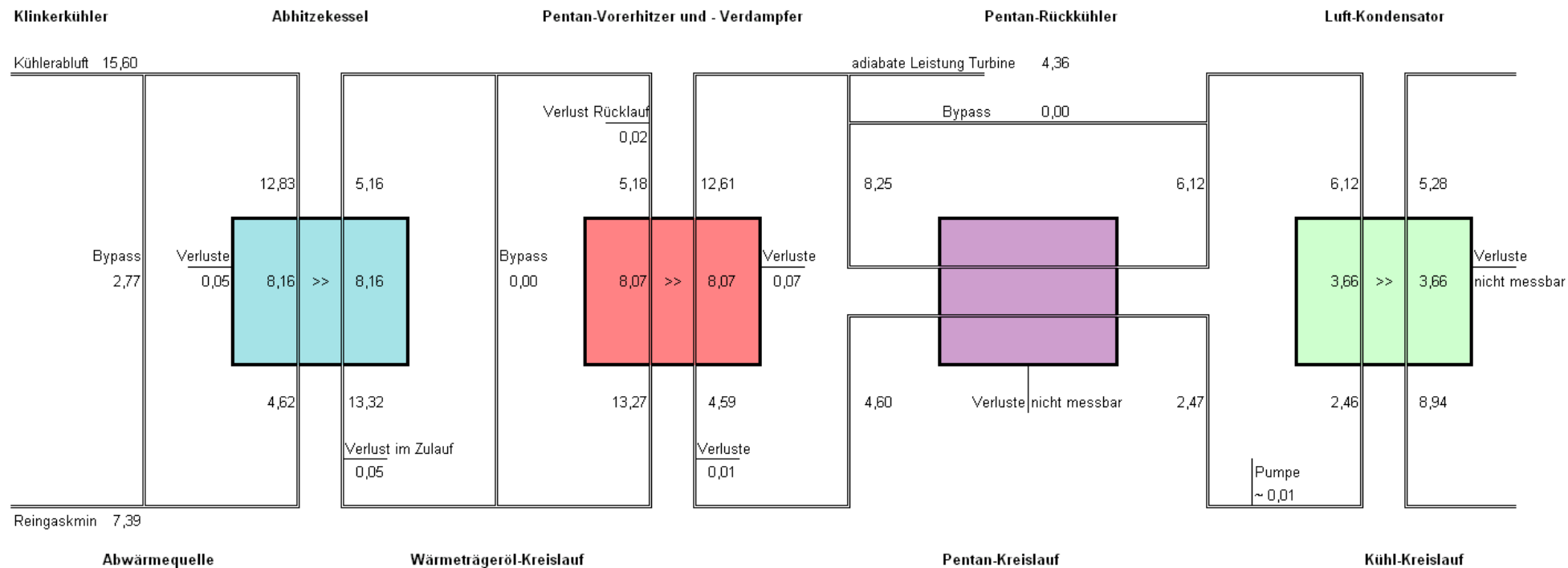
• Auswertung Blockschaltbild – Versuch 4

4. Langzeitversuch
Werte in MW



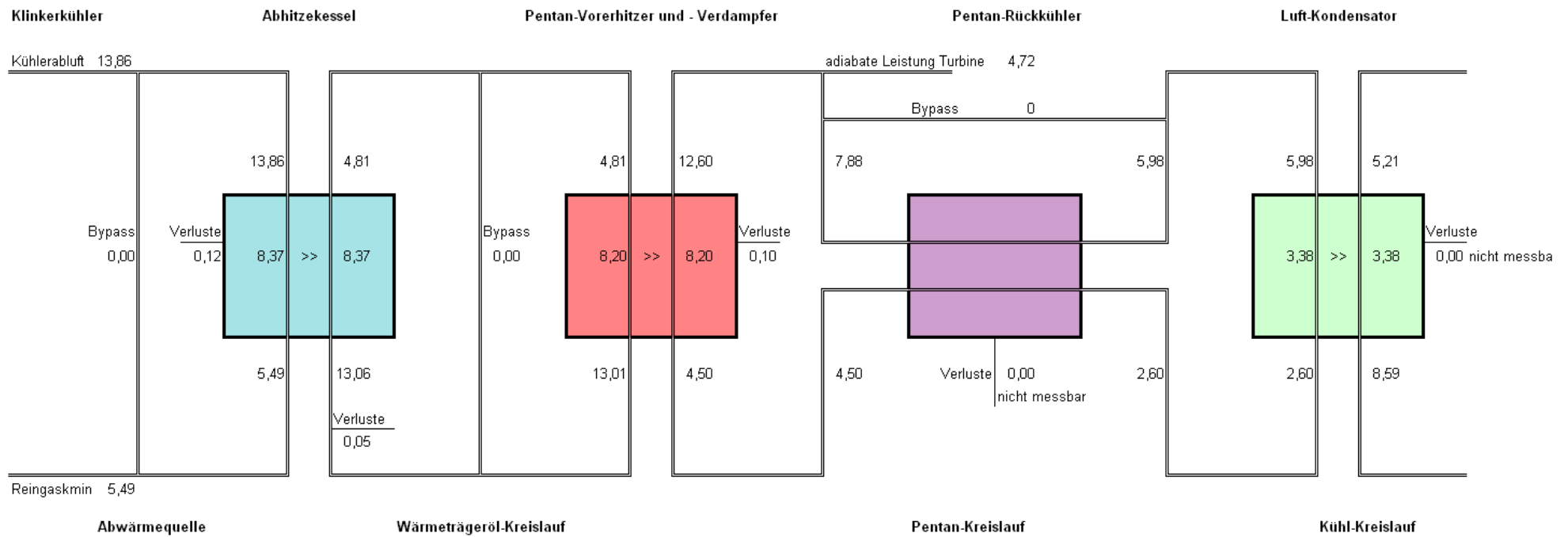
• Auswertung Blockschaltbild – Durchschnitt Versuche 1-4

Durchschnitt Versuch 1 - 4
Werte in MW



• Auslegungswerte - Blockschaltbild

zum Auslegungszeitpunkt
Werte in MW



5.4 Gesamtbewertung der Installation

5.4.1 Technische Kriterien

- **Verfügbarkeit**

Die Langzeitverfügbarkeit der ORC-Anlage ergibt sich primär aus dem Verhältnis der Ofenlaufzeit (7015 h im Jahr 2000) zur Laufzeit der ORC-Anlage. Im gesamten Jahresdurchschnitt 2000 ergibt sich damit eine Verfügbarkeit von 97,1 %.

Jedoch ist diese Zahl erklärungsbedürftig: Zum einen sind Stillstände der ORC-Anlage aufgrund von gravierenden Schäden im Jahr 2000 nicht zu verzeichnen. Und zum anderen schaltet die ORC-Anlage bei außergewöhnlichen Produktionssituationen (z.B. zu hohe Kühlerablufttemperaturen) automatisch ab.

- **Gesamtproduktion**

Die Gesamterzeugung der ORC-Anlage über den betrachteten Versuchszeitraum liegt bei rd. 8000 MW/Jahr. Damit ist die theoretische maximale Netto-Erzeugung von rd. 8,8 GW im Durchschnitt zu 90 % erreicht worden.

- **Erzeugung**

Anhand der Einzelversuche ist erkennbar, dass die ORC-Anlage eine sehr hohe Flexibilität hinsichtlich des Leistungsspektrums aufweist. Ausgekoppelte Wärmeströme zwischen 5 MW und 9,6 MW (nach Abhitzekeessel) sind problemlos über den Pentankreislauf im System Turbine/Generator umsetzbar. Eine Steigerung des ausgekoppelten Wärmestroms ist in gewissen Grenzen noch erzielbar (s. Kapitel Optimierungspotenzial).

- **Erreichbarkeit der Projektziele**

Die in Kapitel 1.1.0 dargestellten Ziele sind überwiegend erreicht oder übertroffen worden. Die Netto-Stromerzeugung liegt im Mittel bei 1117 kW (Auslegung: 1113 kW). Die Eigenbedarfsdeckung des Stromanteils liegt bei ca. 10 %, was im Vergleich zum Ziel von 12 % mit den geringfügig höheren Gesamt-Strombezügen aufgrund erweiterter Anlagentechnik erklärbar ist.

Sowohl die angestrebte strombedingte Reduzierung der CO₂-Emissionen als auch eine erhöhte Flexibilität im Strombezug in Abhängigkeit der Tageszeit wurden realisiert.

Besonders wichtig für das Unternehmen HEIDELBERGER ZEMENT AG ist der Know-how-Gewinn durch Planung, Errichtung und Betrieb der ORC-Anlage. Hier wurden Grundlagen für die Abwärmenutzung in anderen Werken geschaffen. Durch die Veröffentlichung der Langzeit-Untersuchungsergebnisse werden diese Erkenntnisse auch anderen interessierten Anwendern zugänglich gemacht.

- **Vergleich - Kühlerbetrieb vor und nach Installation der ORC-Anlage**

Vor Installation der ORC-Anlage wurde der Kühler mit einem normierten Wirkungsgrad von 65 – 68 % betrieben. Die spezifische Kühlluftmenge lag bei ca. 1,9 Nm³/kg Klinker und Klinkeraustrittstemperaturen von 60 – 90 °C wurden erreicht.

Mit Inbetriebnahme der ORC-Anlage wurde versucht, den Abwärmestrom des Klinkerkühlers zu erhöhen, um die auskoppelbare Wärme im Abhitze-kessel nach Kühler-Filter zu steigern. Damit wurde die Kühlerbetriebsweise verändert. Die Kühlluftmenge unter Rost 2 und Rost 3 wurde den Möglichkeiten entsprechend erhöht. Insgesamt wird der Kühler im Durchschnitt mit einer spezifischen Kühlluftmenge von ca. 1,95 – 2 Nm³/kg Klinker betrieben. Die Klinkerendtemperaturen liegen heute bei 130 – 150 °C, da die Rekuperation auf dem ersten Rost des Kühlers bewusst geringfügig vermindert wurde, um ein erhöhtes Wärmeangebot im mittleren Bereich des Kühlers zu erreichen.

Hinsichtlich der Emissionssituation (Reingasstaub) ist der Betrieb vor und nach Installation der ORC-Anlage unverändert.

5.4.2 Emissionsseitige Kriterien

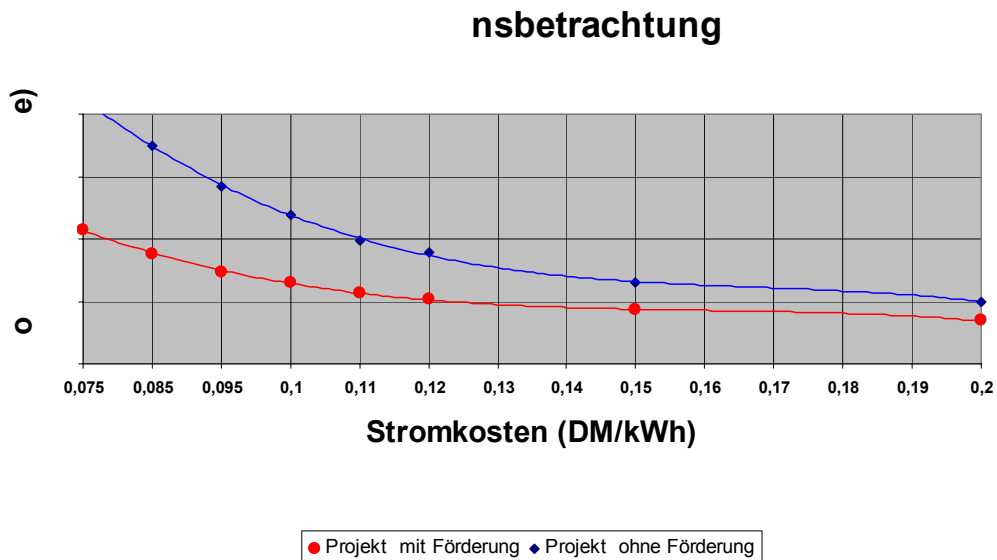
Die ORC-Anlage ist im Kühlerabluftstrom installiert worden, was bedeutet, dass nur die Abluft nach Kühlerabluft-Elektrofilter zur Abwärmeverwertung genutzt wird. Dadurch wird der Gesamtwärmestrom der Kühlerabluft (errechnet aus Volumenstrom und Ablufttemperatur), der an die Atmosphäre abgegeben wird, um etwa 8,2 MW von 12,8 MW auf 4,6 MW verringert.

Ein direkter Einfluss auf die Summe der Emissionen der Klinkerproduktionslinie (Staub, Schadgase) wurde durch die ORC-Anlage in der vorliegenden Schaltungsart nicht erreicht und war auch kein erklärtes Ziel des Projekts. Allerdings muss in der Gesamtbilanz die CO₂-Minderung bei der Fremdstromerzeugung aufgrund des verringerten Strombezugs aus den öffentlichen Netzen erwähnt werden.

Eine Erhöhung des Lärmpegels der gesamten Produktionsanlage wurde nicht verzeichnet. Zum einen ist die Turbine mitsamt Generator in einem vorbildlich abgeschirmten Gebäude installiert worden und zum anderen überdecken die bereits vorhandenen Lärmquellen der Gesamtanlage die Abstrahlungen der auf dem Dach der ORC-Anlage installierten Lüfterventilatoren des Pentan-Luftrückkühlers.

5.4.3 Wirtschaftliche Kriterien

In der folgenden Grafik ist der Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage dargestellt. Die Grundlage für die dynamische Amortisationsrechnung ist eine lineare Abschreibung über 10 Jahre sowie die für den Standort Deutschland marktüblichen Zinssätze.



Randbedingungen für Rechnung mit Nettostromerzeugung von 1,2 MW:

- für Amortisations-Berechnung:

Gesamtinvestitionen real	7,88	Mio. DM
Fördermittel UBA	2,176	Mio. DM
jährl. Betriebskosten	0,12	Mio. DM
Laufzeit	300	Tage/a

In der ersten Amortisationsbetrachtung zu Beginn der Projektphase (1996) wurde noch von einer Strompreisbasis von 0,1 bis 0,12 DM/kWh mit eher steigender Tendenz ausgegangen. Dazu waren die Investitionsannahmen damals eher niedriger. In Verbindung mit den in 1996 avisierten öffentlichen Fördermitteln konnten Kapitalrückflusszeiten von 8 – 10 Jahren berechnet werden.

Aufgrund der veränderten Rahmenbedingungen auf dem Strommarkt ist der Preis für Strom seit 1999 stark gesunken. Bei der heutigen Situation mit Kosten von 0,06 – 0,08 DM/kWh, den tatsächlich aufgewendeten Investitionen, den begleitenden Untersuchungen des Projekts und unter Berücksichtigung der öffentlichen Fördermittel erreicht das Projekt eine Kapitalrückflusszeit von ca. 20 Jahren. Ohne Berücksichtigung der Fördermittel für diese innovative Anlage würden bei heutiger Marktlage sogar weit mehr als 30 Jahre erreicht werden. Inwieweit eine solche Amortisationszeit überhaupt eine Investition rechtfertigen lässt, muss anhand der verschiedenen Einflussfaktoren und deren Gewichtung von Fall zu Fall genauestens überprüft werden.

Beeinflusst wird die Amortisation auch von den spezifischen Anlagenkosten. Bei einer höheren Stromausbeute würden auch die jeweiligen Investitionskosten je erzeugter MW erheblich sinken. Für den eigentlichen Teil der ORC-Anlage (Turbine, Generator, Pentankreislauf, Kühlung) sinken die spezifischen Investitionen für diesen Anlagenbereich von ca. 1500 US-\$/kW (1,5 MW-Anlage) auf ca. 1100 US-\$/kW (3 MW-Anlage). Zu diesen Werten müssen dann noch alle Investitionen für den Wärmeträgeröl-Kreis, die Massiv-/Stahlbaukosten, Elektroinstallationen hinzugerechnet werden, die je erzeugter Kilowattstunde jedoch auch günstiger werden.

6. Optimierungspotential

1. Ein wichtiges Optimierungspotential ist in der Dichtigkeit der Kühlerabluft-Bypass-Klappe aus den Ergebnissen heraus zu erkennen. Hier ist zu prüfen, wie die Zu-Endstellung der Bypass-Jalousienklappe so erreicht werden kann, so dass nur ein minimaler Restspalt der Klappe offen bleibt.

Anhand der Versuchsergebnisse zeigt sich, dass bei konsequenter maximaler Schließung der Jalousien-Absperrklappe der Wärme-Blindstrom von ca. 18 – 22 % auf 10 – 15 % des Gesamtwärmestromes gesenkt werden konnte. Dazu wurde die Klappe vor Ort manuell gegen den mechanischen Anschlag gefahren.

Die Kosten der Umstellung der bestehenden Steuerung (ggf. Änderung an Induktionsschaltern oder Motor/Getriebe-Typ) können derzeit nicht genau beziffert werden, sollten aber in einem akzeptablen Bereich (< DM 20.000) liegen. Damit könnte der Abwärmestrom zum Abhitzeessel der ORC-Anlage im Durchschnitt um 400 – 600 kW erhöht werden, woraus dann eine Erhöhung der Netto-Stromerzeugung im Bereich von 40 – 80 kWh/h (280 – 480 MWh/a) resultieren würde.

Alternativ ist die Installation eines praktisch gasdicht schließenden Schiebers zu überdenken. Für diesen Fall bedeutet das eine Erhöhung des Wärmestromes vor Abhitzeessel. Die Einzelversuche haben gezeigt, dass Wärmestromauskopplungen von mindestens 9,8 MW über den Abhitzeessel (Auslegung 8,42 MW) erzielt werden können. Damit scheint der derzeitige Blind-Wärmestrom zum größten Teil im Abhitzeessel nutzbar zu sein. Sofern man von einer Erhöhung des ausgekoppelten Wärmestroms von 1,5 MW ausgeht, könnten damit rund 120 – 160 kWh/h Elektr. Energie zusätzlich erzeugt werden. Jährlich könnte damit die Stromausbeute um 900 – 1200 MWh/a gesteigert werden.

Sollte der aus dem Abhitzekeessel auskoppelbare Wärmestrom eine Sättigung erreichen und mit einem erhöhten Wärmeangebot nur noch die Abluftverluste ansteigen, ist außerdem eine Anpassung der Kühlerfahrweise hinsichtlich einer verbesserten Sekundärluft-Rekuperation (Verbesserung der Wärmerückgewinnung aus dem Heißklinker für die Verbrennungsluft im Drehrohrofen) denkbar.

Generell sollte bei einer Neuanlage auf die Dichtigkeit dieses Absperrorgans geachtet werden, da sonst erhebliche Wärmeströme ungenutzt bleiben (in diesem Fall 1,35 – 3,7 MW).

Die Kosten für einen nachträglichen Austausch der vorhandenen Jalousienklappe gegen z.B. einen Schieber liegen im Bereich von 100.000 – 130.000 DM incl. Montage. Aufgrund eines erhöhten Platzbedarfs muss ein Austausch der Klappe planerisch auf die Umsetzbarkeit hin untersucht werden.

2. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit besteht, soweit es die Leistungsdaten der Wärmeträgeröl-Förderpumpe zulassen, in der Regelung der Wärmeträgeröl-Durchflussmenge in Abhängigkeit vom gemessenen Wärmestrom. Zur Zeit ist die Einstellung der Wärmeträgeröldurchflussmenge nur über ein manuell betätigtes Ventil möglich. Eine Frequenzregelung der Wärmeträgerölpumpen könnte zur Vergleichmäßigung des Wärmestroms genutzt werden und eine stärkere Abkühlung des Wärmeträgeröls bei niedrigerem Abhitzeangebot vermeiden.

3. Durch eine Drehzahlregelung der Kühlerzuluftgebläse insbesondere im mittleren und hinteren Teil des Kühlers bestünde das Potential, die Klinkerkühlerabluft im Mittel auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben und damit zumindest zeitweise die Stromerzeugungsanlage gleichmäßiger zu betreiben. Damit könnte die Stromausbeute im Dauerbetrieb insgesamt erhöht werden. Gleichzeitig wäre die Stromaufnahme der Kühlerzuluftgebläse absenkbar, die heute mit Drallreglersystemen ausgerüstet sind. Limitierender Faktor für eine Regelung der Kühlluftmenge stellt aber derzeit die Kaltklinkertemperatur auf dem temperaturempfindlichen Gummi-Klinkertransportband zwischen Stahlzellenband (nach Kühler) und Klinkerhalle dar.

7. Übertragbarkeit

Das Werk Lengfurt profitiert aufgrund der Tatsache, dass die Kühlerabluftenergie (Temperatur und Volumenstrom) bisher ungenutzt war, ganz besonders vom Einsatz der ORC-Anlage. Eine Umwandlung der thermischen Energie in elektrische Energie mittels des Niedrigtemperaturverstromungssystems ist insbesondere deswegen sinnvoll, da eine energetische Verwendung der Abwärme ohne Umwandlung nicht möglich ist und die sonst gängige Praxis der Rohmaterialtrocknung, mangels Rohmaterialfeuchte, für diesen Energiestrom keine Nutzung finden kann.

Die Randbedingungen, Möglichkeiten und Übertragbarkeit des ORC-Prinzips werden in den folgenden Kapiteln grob dargestellt.

7.1 Bedeutung und Übertragbarkeit der ORC-Technik für Anlagen der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie

Wie das vorgestellte Beispiel der ORC-Anlage im Werk Lengfurt zeigt, ist es problemlos möglich, einen Abwärmestrom mit einem schwankenden Temperaturniveau (220 – 350 °C) für eine effiziente Erzeugung elektrischer Energie zu nutzen. Im vorliegenden Fall wird die Klinkerkühlerabluft zur Energieausnutzung herangezogen. Jedoch sollten grundsätzlich auch die anderen, größeren Abwärmequellen eines Zementwerkes betrachtet werden.

Am Beispiel des Werkes Lengfurt sind grundsätzlich drei Quellen denkbar:

- Klinkerkühlerabluft
- Ofenabgas
- Bypass-Abgas

Die Klinkerkühlerabluft hat im Mittel einen Energieinhalt von 13 – 17 MW mit z.T. stark schwankendem Temperaturniveau. Klinkerstaub in der Kühlerabluft ist stark schleißend und somit sollte ein Rohrbündelwärmetauscher nur mit einem entstaubten Abluftstrom beaufschlagt werden. Diese Überlegung ließ sich im Werk Lengfurt ideal realisieren, da hier als Entstaubungsaggregat ein Heiß-Elektrofilter installiert war. Nach Auskopplung von durchschnittlich 8,2 MW gehen noch ca. 4-6 MW über den Reinluftkamin in die Atmosphäre über.

Das Ofenabgas (inkl. Bypassgas) im Werk Lengfurt wird intermittierend zur Trocknung der Rohstoffe (zeitgleich auch Mahlung) genutzt. Im Durchschnitt stehen hier **nutzbare** Abwärmeströme (nutzbar für die Auskopplung zur Stromerzeugung) von 8-9 MW zur Verfügung (da das Abgas noch eine Mindesttemperatur nach Wärmeauskopplung benötigt). Damit wäre es theoretisch möglich, die Leistung einer ORC-Anlage, die heute für die Klinkerkühlerabluft verwendet wird, mindestens zu verdoppeln. Voraussetzung für die Nutzung der Ofenabgase ist eine Wärmetauscherbauart, die auch die Rohgasstaubbelastung ($\sim 50 \text{ g/m}^3$) sicher verkraftet, da eine Heißentstaubung der Ofenabgase auf hohem Temperaturniveau aufgrund der Anlagentechnik wirtschaftlich nicht durchführbar ist. Des Weiteren wäre praktisch die gesamte Ofenanlage ab Ofeneinlauf bis zum Kamin für einen höheren Unterdruck auszulegen. Im Fall von bestehenden Anlagen führt dies zu unverträglich hohem Aufwand. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde dies auch für die Anlage in Lengfurt geprüft. Die Anlagenkosten für den Wärmetauscherabgasstrang waren demnach etwa doppelt so hoch wie für den Klinkerkühlerabluftstrang. In Neuanlagen wäre der zusätzliche Aufwand erneut zu prüfen.

Die Nutzung von Bypassgasen ist im Werk Lengfurt aufgrund der Anlagenkonfiguration und der relativ niedrigen Bypassrate (gleichbedeutend mit geringem Volumenstrom) ebenfalls nur theoretisch denkbar. Der angebotene Wärmestrom liegt im Bereich $< 2 \text{ MW}$ und ist schon deshalb wirtschaftlich nicht nutzbar.

Bei der Betrachtung der Übertragbarkeit auf andere Anlagen der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie ist folgendes festzuhalten:

- Grundsätzlich nutzbar sind Abwärmeströme von Klinkerkühlerabluft, Ofenabgas oder Bypassgas – oder anderen Anlagenteilen mit nennenswerten Abwärmeströmen. Die Wärmeströme können durchaus in gewissen Grenzen schwanken, da das von der Anlagentechnik problemlos verkräftet wird.
- Das Temperaturniveau von gasförmigen Wärmeströmen sollte für die Anwendung der ORC-Technik zwischen mind. 150 °C und max. 350 °C liegen (/1/); höhere Temperaturen sollten für den Wasserdampfprozess genutzt werden. Die Grenzen sind anhand der jeweiligen Randbedingungen von Fall zu Fall festzulegen. Temperaturen < 150 °C führen zu Wirkungsgraden von deutlich < 10 %, was die Wirtschaftlichkeit einer ORC-Anlage erheblich in Frage stellt.
- Auskoppelbar sind auch kondensierende (mind. 100 °C) oder flüssige (mind. 120 °C) Wärmeströme /1/. Diese Stoffströme sind aber seltener in den Bereichen der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie anzutreffen.
- Sofern mehrere Abwärmequellen genutzt werden können, sind möglichst kurze Transportwege der ausgekoppelten Wärmeströme zur Turbine zu planen (Rohrleitungsverluste).
- Die spezifischen Investitionskosten nehmen mit steigender Stromerzeugung erheblich ab, was bei der Projektierung berücksichtigt werden sollte.
- Das Arbeitsfluid (im Falle der ORC-Anlage Lengfurt ist das Pentan) ist auf die Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls auszulegen (thermodynamische Eigenschaften des Arbeitsfluids), da diese den Wirkungsgrad der ORC-Anlage beeinflussen.

- Grundsätzlich muss anhand einer Sicherheitsanalyse geprüft werden, ob ein Überträgermedium zwischen Abwärmequelle und Arbeitsfluid geschaltet werden muss (Im Falle Lengfurt wurde hier ein Wärmeträgerölkreislauf installiert). Die Eigenschaften der organischen Arbeitsfluide (z.B. Explosionsfähigkeit etc.) sind hier zu bewerten. Eine Zusammenarbeit mit kompetenten Überwachungsorganisationen (z.B. TÜV) ist hier empfehlenswert.
- Bei einem Ausfall der Verstromungsanlage muss sichergestellt sein, dass der betreffende Volumenstrom mit seiner ursprünglichen Temperatur in den nachgeschalteten Anlagen verwendet werden kann (z.B. in Filter o.ä.).
- Für bestehende Produktionsanlagen sind die Kosten für Umbauten oder Anpassungen sehr genau zu prüfen, da sie einen erheblichen Teil der Investition ausmachen können.
- Bei Neuanlagen sollte der Einsatz der ORC-Technik geprüft werden, sofern nennenswerte Abwärmeströme nicht anderweitig genutzt werden können. Wo diese Abwärmeströme in den Anlagen der Zement-, Kalk- und Gipsindustrie jeweils anfallen und ob sich eine Nutzung rechnet, muss von Fall zu Fall geprüft werden.

7.2 Nutzung der ORC-Technik in anderen Industriezweigen

Grundsätzlich gelten die Aussagen aus Kapitel 7.1 auch für die Übertragbarkeit auf andere Industriezweige. Genutzt werden können auch hier gasförmige, flüssige oder kondensierende Abwärmeströme in den verschiedensten Prozessen in Abhängigkeit der jeweiligen Grenztemperaturen.

Die untere Leistungsgrenze für die Realisierung einer ORC-Anlage kann nicht pauschal festgelegt werden und hängt insbesondere von den Investitionskosten für Infrastruktur (Gebäude, Leitungen etc.) ab.

Inwieweit in verschiedenen Industriezweigen ungenutzte Abwärmepotenziale vorliegen, entzieht sich der Kenntnis der Berichterstatter. Jedoch ist schon heute davon auszugehen, dass in den größten Teilen der Industriebetriebe aufgrund der in den vergangenen Jahren stark gestiegenen Kosten für Brennstoffenergie die Energieeffizienz erheblich gesteigert wurde. Dennoch kann es sich lohnen, von Fall zu Fall zu prüfen, ob und mit welchem Aufwand Abwärmeströme zur Umwandlung in elektrische Energie genutzt werden können. Dieses gilt insbesondere für die Nutzung der Abwärme von Verbrennungsmaschinen (Dieselmotore, Gasturbinen), bei denen z.B. das Kühlwasser mittels ORC-Technik besser oder umfassender genutzt werden könnte, als mittels eines Wasserdampf-Abhitzekessels /1/.

8. Zusammenfassung und Ergebnisfeststellung

Ziel des Schlussberichtes ist eine umfassende Darstellung der Anwendung der ORC-Technologie im Zementwerk Lengfurt, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Messdaten, die im Rahmen von vier Messkampagnen durchgeführt wurden.

In diesem Schlussberichts wurde auf die angewandte wissenschaftliche Methodik eingegangen, die den Messkampagnen zugrunde liegt und es wurden die Ergebnisse der Messungen mit den vorab definierten Vorhabenszielen verglichen. Die Vorhabensziele wurden erreicht.

Die Bruttostromerzeugung liegt im Mittel bei 1206 kW und die Nettostromerzeugung ohne Berücksichtigung der vereinbarten Temperaturkorrektur für das Wärmeträgeröl bei 1036 kW (Auslegung: 1130 kW). Unter Berücksichtigung der Temperaturkorrektur wird eine Nettostromerzeugung von durchschnittlich 1200 kW erreicht, womit der Garantiewert um 7% übertroffen wird. Es ergibt sich ein durchschnittlicher effektiver Nettostromerzeugungswert unter Berücksichtigung aller direkten Stromverbraucher von 1117 kW (Abgabe an das Werksnetz).

Darüber hinaus wurde eine Potentialabschätzung des ORC-Verfahrens für andere Industriebereiche dargestellt. Es lässt sich generalisierend sagen, dass die Anwendung dieses Verfahrens vielfältiges Potential aufzeigt, in all jenen Fällen nämlich, in denen gasförmige oder flüssige Energieströme einer bestimmten Größenordnung ungenutzt bleiben. Grundsätzlich ist für jeden potentiellen Anwendungsfall eine Einzelfallprüfung durchzuführen, welche, neben der technologischen Anwendbarkeit, ebenfalls die wirtschaftliche absolute Vorteilhaftigkeit prüft.

Die Heidelberger Zement AG, als Technologie-Pionier dieser Technik im Zementwerksbereich, ist von den Dauerleistungserfolgen bei geringer Schadensanfälligkeit und hoher Verfügbarkeit überzeugt.

Die höhere Flexibilität beim Strombezug, die vermiedenen CO₂ – Emissionen durch Eigenproduktion von Strom und die Tatsache, für eine richtungsweisende Technologie beispielhaftes Muster zu sein, wird vom Werk Lengfurt und dem Unternehmen Heidelberger Zement AG als Vorteile gesehen, die den Unternehmenscharakter und das unternehmerische Selbstverständnis widerspiegeln.

9. Literaturverzeichnis

/1/ VDI-Berichte 377

Antriebsenergie aus Abwärme, Clausius Rankine-Prozeß (ORC); Möglichkeiten von Expansionsprozessen zur Umwandlung von Abwärme in mechanische Energie, Tagung Köln 1980

/2/ Organischer Umweg, Stromerzeugung aus industrieller Abwärme

H. Legmann, Yavne; Energie; Jahrgang 37, Heft 9/1985, Seite 90-92

/3/ Reducing Energy Costs

Energy reduction using waste heat recovery and generating systems (WH RGS) in cement plants; Jin Hongkim, Halla Business Group, Korea
International Cement Review, March/1995

/4/ DIN 4759

Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern, Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung

/5/ VDI 3033

Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern
Betreiben, Warten, Instandsetzen

/6/ VDZ-Monitoring-Bericht 1998

Verminderung der CO₂-Emissionen, Beitrag der deutschen Zementindustrie, Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf, Juli 1999

/7/ First waste heat power generating plant using the Organic Rankine Cycle Process

for utilizing residual clinker cooler exhaust air, ZKG International, No. 8/2000;
Eduard Baatz, Gerhard Heidt