

TNO-rapport
TNO-MEP – R 96/449

TNO Milieu, Energie
en Procesinnovatie

Laan van Westenek 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Telefoon 055 - 549 34 93
Fax 055 - 541 98 37

Warmteterugwinning in een Afvalwater-incinerator van AVR-Bedrijven

Datum
december 1996

Auteur(s)
Dr.Ir. P.J.T. Bussmann
Ing. W. Hesseling

Projectnummer
27589

Trefwoorden

Bestemd voor
AVR-Bedrijven,
T.a.v. J. Oskam (Hoofd Nieuwbouw)

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een
nationaal en internationaal erkend kennis- en contract-
research instituut voor bedrijfsleven en overheid op het
gebied van duurzame ontwikkeling en milieu- en
energiegerichte procesinnovatie.

Nederlandse Organisatie voor toegepast
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan
TNO zoals gedeponeerd bij de
Arrondissementsrechtbank en de Kamer van Koophandel
te 's-Gravenhage

Samenvatting

Algemeen

AVR is voornemens een drietal afvalwater-incinerators te bouwen. Deze installaties zullen het afvalwater verbranden afkomstig van een toekomstige chemische plant van ARCO op de Maasvlakte. AVR heeft in het kader van de MER-procedure een systeem voorgesteld, waarin wordt uitgegaan van een thermische behandeling van het afvalwater in een incinerator. De afval-waterstroom wordt daarbij met secundaire brandstof en stoom op een temperatuur van 950 °C gebracht, vervolgens met water afgekoeld en uiteindelijk afgevoerd naar de rivier. De totale warmte input voor de installatie bedraagt ongeveer 100 MW.

De vraag is aan de orde of een deel van de warmte kan worden teruggewonnen. De AVR heeft TNO-MEP daartoe uitgenodigd een mening te vormen. In dat kader heeft TNO-MEP een aantal activiteiten ontplooid: literatuuronderzoek, bedrijfsbezoeken, overleg leveranciers, energieberekeningen. De resultaten hiervan worden in dit rapport besproken.

We menen te moeten wijzen op het effect dat indampen van de afvalwaterstroom zou kunnen hebben op het energieverbruik. De warmtebehoefte zou tot minder dan de helft (42 MW) kunnen worden teruggebracht, door een deel van het afvalwater langs een niet thermische weg te behandelen. De niet-thermische route wordt door de AVR echter als onaanvaardbare beschouwd (zie ook MER).

Met betrekking tot de mogelijkheden voor warmteterugwinning wordt in dit rapport onderscheid gemaakt in het hoge en lage temperatuurtraject. In het vervolg wordt hierop nader ingegaan.

Warmteterugwinning in het hoge temperatuurtraject

Warmteterugwinning in het hoge temperatuur traject (950 °C tot 300 °C) vindt plaats in een concept dat bij Bayer (Brunsbüttel) is gerealiseerd. Hierbij wordt afvalwater behandeld in een drie-treks ketel, waarvan de eerste twee trekken leeg zijn (membraanwanden). In de derde trek staat een verticaal opgestelde, tegenstroom warmtewisselaar (schottenwisselaar) opgesteld. De referentielijst van de leverancier met dit concept is kort. Ervaring is voornamelijk opgedaan in Brunsbüttel.

Een aantal opmerkingen dienaangaande zijn op zijn plaats:

- De capaciteit van de ketel in Brunsbüttel is slechts 1/4 van de capaciteit per lijn, die in het voorgenomen AVR concept gewenst is.

- De installatie in Brunsbüttel is gebouwd in 1981 en heeft een groot aantal kinderziektes gekend. Het heeft twee jaar geduurd voordat men de plant enigszins in de vingers had. Problemen heeft men moeten oplossen met betrekking tot de branders, de afvoer van vloeibare zouten en de vervuiling op de warmtewisselaar.
- De leverancier heeft ongetwijfeld veel geleerd van de ervaringen in Brunsbüttel. Aanpassing in het ketelontwerp van Brunsbüttel zullen het onderhoud vereenvoudigen maar vervuiling van de warmtewisselaar zal blijven optreden en regelmatig onderhoud noodzakelijk maken.
- Vervuiling is sterk gelieerd aan de zoutvracht in de voeding. Bij een zoutconcentratie van 5% is de ketel aanzienlijk minder gevoelig voor vervuiling dan bij een concentratie van 50%
- In Brunsbüttel wordt, bij een zoutconcentratie van 5%, rekening gehouden met een stilstand (per ketel) van 10 uur per twee weken. Hierin is 4 uur verdisconteerd voor het afkoelen van de ketel, voordat een schoonmaakploeg (3 personen) de ketel in kan.

Een installatie zoals in Brunsbüttel is gevoelig voor vervuiling en vraagt regelmatig onderhoud. Dit wordt door de leverancier ook onderkend; de ketelbouwer stelt voor een ander ketelconcept te gebruiken, waarbij in het geheel geen bundels in de ketel worden toegepast. Met deze zogenaamde *Gassenkessel* wordt het noodzakelijke onderhoud verder beperkt. De leverancier kan geen referentielijst overleggen van dit ketel-concept in afvalwater-incinerators.

Met een afgassenketel kan stoom worden opgewekt (27 tot 40 bar en 400 °C) Het ketelrendement is laag en ligt tussen de 45% en 50%. Dit komt omdat de afgassen veel water bevatten en dus veel latente warmte meevoeren. De geproduceerde stoom kan worden gebruikt om elektriciteit te produceren. Het rendement van die omzetting is berekend en ligt tussen 28% en 30%. Het totaal-rendement komt daarmee op 13%-14%.

Bij een thermisch vermogen van de complete installatie van 100 MW en gebaseerd op 7586 bedrijfsuren (ontwerpgegevens AVR), kan met afgassen-ketels (3x) en turbines jaarlijkse ongeveer 100 GWh elektriciteit worden opgewekt (fl 7.5 miljoen). Investeringskosten voor de ketels en turbine worden geschat op fl 45 miljoen (3 ketels + 14 MW stoomturbine + installatie). Met betrekking tot de exploitatiekosten wordt verwezen naar data van AVR.

Warmteterugwinning in het lage temperatuurtraject

In het concept-MER rapport wordt voor de verwerking van het ARCO afvalwater geopteerd voor een incinerator zonder warmteterugwinning uit Japan. De Japanse leverancier heeft echter ook een concept **met** warmteterugwinning. Warmteterugwinning vindt daarbij plaats in het lage temperatuurtraject, waarbij een deel van de latente warmte uit de afgassen na de quench wordt gebruikt. De warmte wordt

overgedragen in een (vacuüm-)indampinstallatie. De Japanse leverancier stelt, dat bij de AVR deze manier van indampen niet is voorzien, omdat de afgedreven damp in het Japanse concept weer wordt gecondenseerd. Dit wordt gedaan om een vacuüm in de indampers te realiseren. De opgenomen (en teruggewonnen) warmte gaat hierdoor in de condensor alsnog verloren. Een mechanische damprecompressor om het vacuüm in stand te houden, in plaats van een condensor, kan echter uitkomst bieden. Dergelijk apparaten worden op vele plaatsen in de industrie succesvol ingezet. De (on)mogelijkheden van systemen met mechanische damprecompressie zouden in kaart moeten worden gebracht.

Indien 60% van de voeding in de vorm van damp aan de incinerator wordt toegevoerd (zoals voorzien door de AVR), dan kan maximaal 16 MW latente warmte worden teruggewonnen en dus secundaire brandstof worden bespaard.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave.....	5
1. Inleiding	6
2. Activiteiten	7
2.1 Literatuurstudie.....	7
2.2 Bedrijfsbezoeken	7
2.3 Verdere bedrijfscontacten.....	7
2.4 Berekeningen.....	8
3. Literatuur studie	9
4. Bedrijfscontacten	10
4.1 Bayer Brunsbüttel.....	10
4.2 Duitse leverancier.....	12
4.3 Het Japanse Concept.....	13
5. Het energetisch belang van indampen	15
6. Verschillen Brunsbüttel en voorgestelde AVR-installatie.....	17
6.1 Het concept.....	17
6.2 De capaciteit van de installatie.....	17
6.3 De Voeding.....	17
6.4 Het onderhoud	17
6.5 De bedrijfsuren	18
7. Warmteterugwinning zonder indampen	19
7.1 Uitgangspunten CYCLE berekeningen	19
7.2 Resultaten CYCLE-berekeningen	20
8. Conclusies	22
9. Referenties	24
10. Verantwoording	25
Bijlagen	
1. Schema's Installatie Bayer Brunsbüttel	
2. <i>Gassenkessel</i>	
3. Detailberekeningen energieverbruik indampen	
4. Details CYCLE-berekeningen	
5. Details Kosten Baten berekening AVR	

1. Inleiding

AVR is voornemens een drietal afvalwater-incinerators te bouwen. Deze installaties zullen het afvalwater verbranden afkomstig van een toekomstige chemische plant van ARCO op de Maasvlakte. AVR heeft in het kader van de MER-procedure een systeem voorgesteld, waarin wordt uitgegaan van een thermische behandeling van het afvalwater in een incinerator. De afval-waterstroom wordt daarbij met secundaire brandstof en stoom op een temperatuur van 950 °C gebracht en daarna met water afgekoeld. Voor deze procesgang vraagt de installatie ongeveer 100 MW aan warmte.

De vraag is aan de orde of een deel van de warmte kan worden teruggewonnen. De AVR heeft TNO-MEP daartoe uitgenodigd een mening te vormen. In dat kader heeft TNO-MEP een aantal activiteiten ontplooid, waarvan de resultaten in dat rapport zijn neergelegd.

Een overzicht van de werkzaamheden wordt gegeven in hoofdstuk 2. Door middel van een literatuuronderzoek (hoofdstuk 3) is geprobeerd een algemeen beeld te krijgen van de mogelijkheden en ervaringen met warmteterugwinning bij afvalwater-incinerators. Geconcludeerd moet worden dat praktijk-ervaring bij een klein aantal gebruikers en apparatenbouwers ligt. Relevante bedrijven zijn benaderd; in hoofdstuk 4 wordt hiervan verslag gedaan. Essentieel voor een optimaal energiegebruik is het antwoord op de vraag of de afvalwaterstroom kan worden ingedampd en in gescheiden fracties kan worden verwerkt. In hoofdstuk 5 wordt op de energetische consequenties van het een en ander ingegaan. Het gescheiden verwerken van het concentraat en condensaat uit de indampers wordt door de AVR echter van de hand gewezen (zie AVR-MER)

Naast het indampen zijn ook mogelijkheden om energie te besparen door middel van warmteterugwinning. Een Duits concept is gericht op het hoge temperatuurtraject (950 °C - 300 °C); terwijl een concurrerend concept uit Japan gebaseerd is op terugwinning van latente warmte (lage temperatuurtraject). In de hoofdstukken 6 en 7 worden de mogelijkheden van het Duitse concept vergeleken met het Japanse. Het rapport wordt afgesloten met een hoofdstuk conclusies.

De werkzaamheden zijn verricht door Dr.Ir. P.J.T. Bussmann en Ing. W. Hesseling beide van TNO-MEP (Apeldoorn). Berekeningen met betrekking tot het elektrisch rendement van een turbine gekoppeld aan een afgassenketel zijn uitgevoerd door Ir. M. Verschoor (TNO-MEP Apeldoorn). Specifieke materiaalkundige kennis is ingebracht door Ir. P. Rademakers en Ir. M. de Wacht (beide TNO-Industrie Apeldoorn)

2. Activiteiten

2.1 Literatuurstudie

Met betrekking tot de literatuur zijn de volgende activiteiten ontplooid:

1. De bestanden WASTE INFO, ENERGY en DERWENT INFO 1995 zijn geraadpleegd. Er is specifiek voor deze bestanden gekozen omdat hierin praktijkkennis wordt gerapporteerd. De sleutelwoorden waarmee is gezocht zijn:
INCINERATION
CAUSTIC
WASTE
ALKALI
2. Gebruik is gemaakt van TNO-rapporten. Met name wordt hierbij gewezen op een studie van Ir. P. Rademaker (TNO-Industrie) naar corrosie in AVI's, die in opdracht van de Novem is uitgevoerd in het kader van een project van het Nederlands Corrosie Centrum (NCC).
3. Gebruik is gemaakt van de relevante literatuur die in de studie van Rademaker is verzameld.

2.2 Bedrijfsbezoeken

In het kader van dit onderzoek is een bezoek gebracht aan Bayer in Brunsbüttel. Bayer Brunsbüttel beschikt over een installatie om afvalwater thermisch te behandelen (te verbranden) naar een Duits concept. Er is indringend gesproken met Dipl.-Ing. R. Krebber, plant-manager van de afvalwater-incinerator, waarbij het zwaartepunt heeft gelegen op het verkrijgen van inzicht in de overeenkomsten en verschillen tussen de installatie in Brunsbüttel en de voorgenomen AVR installatie.

De incinerator in Brunsbüttel is gebouwd door een Duitse firma. Om die reden is een bijeenkomst georganiseerd met de ingenieurs die nauw betrokken zijn geweest bij het totstandkomen van de plant in Brunsbüttel.

2.3 Verdere bedrijfscontacten

Voor de verwerking van het afvalwater van ARCO, opteert de AVR voor een installatie uit Japan zonder warmteterugwinning. Contact is gezocht met de leverancier. Deze heeft AVR-Chemie een zogenaamde Preliminar Proposal doen toekomen. Hierbij is een referentielijst opgenomen van bedrijven waar de leverancier een afvalwater-incinerator heeft gebouwd. Een poging is gedaan om met een aantal bedrijven contact op te nemen.

2.4 Berekeningen

Met de CYCLE-software zijn berekeningen uitgevoerd om beter zicht te krijgen op de energieopbrengst van een ketel gekoppeld aan een afvalwater-incinerator. De berekeningen zijn uitgevoerd door Ir. M. van der Schoor.

3. Literatuur studie

De resultaten van de zoekopdrachten in de literatuur (WASTEINFO, ENERGY en DERWENTH) zijn mager. Om die reden is in een later stadium ook in CHEMICAL ABSTRACTS gezocht.

De zoekopdrachten in WASTEINFO resulteerden in een lijst met 40 artikelen; waarvan een viertal relevant leek en is aangevraagd.

Van belang is een artikel van Grover R., en Gomaa, H.M., (1993) over bewezen technieken met betrekking tot het verwerken van caustic van olefin-plants. In het artikel passeren een aantal technieken de revue:

- Neutralization/steam stripping
- Wet air oxidation
- Low, Medium and High Pressure Oxidation
- Incineration
- Emerging Technologies (Catalytic wet air oxidation en Supercritical water oxidation)

Met betrekking tot het verbranden van caustic wordt een systeem behandeld, waarvoor ook AVR opteert (incinerator met quench en zonder warmteterugwinning). Er wordt gesteld dat de methode effectief is maar dat de operationele kosten hoog zijn. Er is sprake van slechts een klein aantal van dit type incinerators. Criteria voor het inzetten van deze techniek worden niet gegeven.

De zoekopdrachten in ENERGY resulteerden in een lijst met 10 artikelen, waarvan er één is aangevraagd. Deze bleek in het Japans en kon in het kader van deze studie niet worden meegenomen.

De zoekopdrachten in DERWENTH resulteerden in een lijst met 21 artikelen. Hiervan zijn een tweetal aangevraagd; ze bleken weinig relevante informatie te bevatten.

4. Bedrijfscontacten

4.1 Bayer Brunsbüttel

Algemeen

De installatie in Brunsbüttel is voor het onderzoek van belang in verband met de afgassenketel, die in de plant lay-out is opgenomen (zie bijlage 1). Warmteterugwinning vindt plaats in het hoge temperatuur traject (950 °C tot 300 °C). Hierbij vindt de verbranding van het afvalwater plaats in een drie-treks ketel, waarvan de eerste twee trekken leeg zijn (membraanwanden) en in de derde trek een verticaal opgestelde, tegenstroom warmtewisselaar (schottenwisselaar) staat opgesteld.

Op woensdag 16 oktober heeft een gesprek plaatsgehad met Dipl.-Ing. Rolf Krebber (UWS-betrieb; Ingenieur Betrieb). Van TNO-MEP waren daarbij aanwezig de heren Hesseling en Bussmann. In een 6 uur durend gesprek zijn de verschillende onderdelen van de plant in detail aan de order gekomen. In een later stadium is telefonisch contact gezocht met de heer Gehrt (UWS-betrieb Brunsbüttel).

Voorafgaand aan het bezoek van TNO-MEP zijn door de AVR een tweetal documenten ter beschikking gesteld. Met name:

- Besprekingsverslag van AVR-Chemie AVR/95/2220/VvO
- Artikel van Micher, G., Kiesewetter K-P, Krebber, R., 1985
Eindampfung und Gasphasen-Oxidation Industrieller Prozessabwässer mit Erzeugung von Abhitzedampf, in Cem.-Ing.-Techn. 57

Technische informatie

De installatie in Brunsbüttel bestaat uit een aantal onderdelen, waarvan de schema's in bijlage 1 zijn bijgevoegd:

- Totaal overzicht (Abwassersystem Werk Brunsbüttel de Bayer AG)
- Abwasser Eindampf Anlage
- Abwasser Verbrennungsanlage
- Abwasser Brenner
- Wärmerückgewinnung
- Flotation.

Met betrekking tot het energieverbruik en mogelijk energiebesparende maatregelen zijn de indampinstallatie en de afgassenketel van belang.

Voor een goed begrip van de werking van de installatie zijn de volgende zaken essentieel:

- De bedrijfsvoering is er op gericht om te allen tijde te voldoen aan de Duitse milieuwetgeving.

- De installatie wordt niet op deellast bedreven. Met andere woorden de branders staan aan of uit.

Energiehuishouding

De beschikbare gegevens met betrekking tot de energiehuishouding zijn doorgenomen, waarbij de volgende opmerkingen zijn te plaatsen:

1. De 5-traps indampinstallatie heeft een specifiek stoomverbruik van 0.27 (Mischer et al., 1985). Dat wil zeggen dat 0.27 ton stoom nodig is per ton uitgedreven damp. Dit wijkt enigszins af van het getal dat in het besprekingsverslag AVR-Chemie AVR/95/2220/VvO wordt gegeven (0.27 ton stoom per ton afvalwater; specifiek stoomverbruik van ongeveer 0.30). De indampinstallatie gebruikt licht oververhitte stoom (5 bar, 155 °C).
2. De mate waarin wordt ingedampt ligt niet vast en hangt af van het afvalwater dat moet worden verwerkt. De indampinstallatie wordt maximaal belast als de zoutconcentratie stijgt van 5% tot 70%. De operationele data uit Mischer et al. (1985) gaan uit van een indamping tot 50%. In het besprekingsverslag AVR-Chemie AVR/95/2220/VvO wordt melding gemaakt van een gemiddelde van 22% (27000 ton/yr concentraat, bij een voeding van 115.000 ton/yr). Deze gemiddelde waarde is door Krebber (Bayer) bevestigd. Krebber stelt, dat bepaalde afvalwaterstromen in het geheel niet worden ingedampt (afhankelijk van de giftigheid van de afgedreven damp).
3. Oorspronkelijk is in de installatie aardgas bijgestookt. Mischer et al. (1985) maakt melding van een energieverbruik van 950 m³/hr. De installatie is daarna aangepast en goedgekeurd voor het bijstoken van PCB vervuilde olie. Het besprekingsverslag AVR-Chemie AVR/95/2220/VvO maakt hiervan ook melding. Volgens het besprekingsverslag is daarnaast nog sprake van een aardgasverbruik van 150 m³ per uur om de afvoer van gesmolten zouten open te houden. Deze data zijn door Krebber bevestigd. In de berekeningen uit dit rapport is uitgegaan van een equivalent energieverbruik van 1100 (=950+150) Nm³/hr.
4. Naast brandstof is stoom nodig om het afvalwater in de brander te verstuiven. De hoeveelheden zijn gering (200-400 kg/hr; Mischer et al., 1985) en kunnen voor wat betreft de energie-inhoud worden verwaarloosd

Ketelonderhoud volgens ontwerp

Met betrekking tot de onderhoudsaspecten beperken we ons tot de derde trek van de ketel, waar de bundels zijn opgesteld. De bundels bestaan uit verticale schotten met warmtewisselaarbuizen (15 m hoog). Van groot belang is de temperatuur van de rookgassen bij intrede in de derde trek. Als maximum wordt 600 °C rookgastemperatuur aangehouden; daarboven zijn de zouten in de rookgassen vloeibaar en stollen deze op de bundels en wanden. De afgezette zouten groeien aan vanaf de ketelwand. Het doorstroomd oppervlak van de ketel wordt daardoor in de loop van de tijd steeds kleiner, waarbij de stoomtemperatuur afneemt. Met een roetblazer aan het begin van de derde trek probeert men tijdens bedrijf de vervuiling te ver-

wijderen. Indien nodig wordt handmatig met stalen stangen het zout van de pijpen gestoten. Lukt dit niet of onvoldoende, dan wordt de installatie uit bedrijf genomen en wordt de ketel lokaal bij de overgang naar de derde trek van binnen uit gereinigd. Deze werkzaamheden worden door drie personen uitgevoerd. Een dergelijk stop duurt gemiddeld 8-10 uur; de tijd tussen twee stops is sterk afhankelijk van de zouten en zoutconcentratie in de voeding (soms 1 maal per 14 dagen, soms om de 3-4 dagen).

Bij een correcte werking van de installatie zou van zoutafzetting op de bundels geen sprake zijn. De zouten in de rookgassen zijn dan in de gasfase reeds gestold en slaan op de bundels neer als een poeder. Kloppers zijn geïnstalleerd om het poeder van de bundels verwijderen. De zoutkristallen worden probleemloos onderin opvangen en afgevoerd.

4.2 Duitse leverancier

Naar aanleiding van de informatie verkregen bij Bayer Brunsbüttel, is contact opgenomen met de Duitse leverancier. Op woensdag 30 oktober heeft een gesprek plaatsgevonden waarbij vanuit Nederland de heer J. Oskam (AVR-Chemie) en P. Bussmann (TNO-MEP) aanwezig waren.

De afvalwater-incinerator in Brunsbüttel (nu 15 jaar in bedrijf) heeft de nodige kinderziektes gekend. Problemen met de branders en de zoutafvoer zijn naar tevredenheid opgelost. Problemen met betrekking tot vervuiling van de bundels zijn deels opgelost (bundelkloppers functioneren nu naar behoren). De vervuilingproblematiek bij de overgang van tweede naar derde trek van de ketel bestaat echter nog steeds. Het doorstroomd oppervlak groeit vanaf de ketelwand dicht. De zouten, die worden afgezet, zijn: NaCl , Na_2CO_3 en Na_2SO_4 ; waarvan de twee eerst genoemde ook in het afvalwater van ARCO zitten.

De Duitse leverancier stelt dat de vervuiling beter beheersbaar zou zijn, indien bij de overgang van tweede naar derde trek een maximum temperatuur van $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ werd aangehouden (nu $600\text{ }^{\circ}\text{C}$). De ketel zou daartoe wat hoger moeten zijn. Het probleem is daarmee echter maar ten dele opgelost. De zouten in de rookgassen moeten namelijk toch ergens in de ketel door het stolpunt en op die plaats zal aan de wanden altijd een opeenhoping van zouten ontstaan. De voorgestelde modificatie betekent dat de vervuiling ruim voor de bundel plaatsvindt; mogelijk wel op een plaats waar aangroei minder problematisch is of deze eenvoudiger is te verwijderen.

De leverancier stelt verder dat een ketel zonder bundels ideaal zou zijn. Een dergelijk concept is aan BASF geleverd (*Gassenkessel*, zie bijlage 2). De convectie warmteoverdracht zal in een dergelijke ketel slechts moeizaam tot stand komen; men heeft immers een groot warmtewisselend oppervlak nodig. Als gevolg hiervan

zal minder warmte worden teruggewonnen. (uittrede temperatuur van de rookgas-
sen 350 °C in plaats van 300 °C). Ook in een dergelijke ketel zal sprake zijn van
vervuiling maar deze zal minder problemen geven.

4.3 Het Japanse Concept

Algemeen

Het AVR MER rapport opteert voor een installatie zonder warmteterugwinning. Op
woensdag 6 november is telefonisch contact geweest met een Japanse leverancier.
Voorafgaand aan het gesprek zijn door de AVR een tweetal documenten aan TNO-
MEP ter beschikking gesteld. Met name:

- Meeting report + Attachments Operation experiences with Incinerator (Merks,
1996)
- Preliminary Proposal of Caustic Waste Incineration Plant for ARCO Chemical
Company PO/SM Plant (Anon, 1996)

Uit deze documenten blijkt dat de leverancier in 1994 een caustic afvalwater inci-
nerator zonder warmteterugwinning leverde aan een ARCO PO/SM-plant. De leve-
rancier heeft dus ervaring.

Een bijgevoegde referentielist van de leverancier laat zien, dat deze ook afvalver-
brandingsplants installeert waarbij sprake is van warmteterugwinning. Met de leve-
rancier is op dit gegeven nader ingegaan. Een en ander is ook per fax door de Ja-
panse leverancier vastgelegd.

Het Japanse concept met warmteterugwinning.

In het Japanse-concept met warmteterugwinning vindt de terugwinning plaats in de
rookgassen na de quench (90 °C). Deze rookgassen zijn verzadigd met water en
kunnen in principe worden gebruikt bij het (vacuüm-)indampen van het inkomende
afvalwater. Het energetisch effect van een dergelijke indamp installatie komt in
hoofdstuk 6 nog uitgebreid aan de orde. De leverancier stelt dat bij de AVR deze
manier van indampen niet is voorzien, omdat de afgedreven damp wegens het hoge
gehalte aan koolwaterstoffen onmogelijk langs een niet-thermische route kan wor-
den behandeld. De charme van het indampen (i.e. het scheiden van de afvalwater-
stroom in twee fracties, waarvan één fractie langs een niet-thermisch route kan
worden behandeld) gaat daarmee verloren.

In het Japanse concept met warmteterugwinning is sprake van vacuüm-indampers.
Het vacuüm wordt gerealiseerd door de afgedreven damp te condenseren. Hierbij
gaat de teruggewonnen warmte alsnog verloren. De energie winst wordt pas be-
haald door het condensaat langs een niet-thermische route te behandelen.

Er zijn echter alternatieve methoden om een vacuüm te realiseren, waarbij de teruggewonnen warmte **niet** verloren gaat. Een mechanische damprecompressor bijvoorbeeld kan uitkomst bieden. Een dergelijk apparaat wordt op vele plaatsen in de industrie succesvol gebruikt. De (on-)mogelijkheden van een dergelijk concept zouden moeten worden bekeken. De mening dat damp condenseert in de compressor, berust op een misverstand.

Indien 60% van de voeding in de vorm van damp aan de incinerator wordt toegevoerd (zoals voorzien door AVR), dan kan 16 MW latente warmte worden teruggewonnen.

5. Het energetisch belang van indampen

Gebaseerd op gegevens van Bayer zijn een drietal berekeningen uitgevoerd, waarbij de mate van indampen (met verse stoom) als variabele is genomen. In de berekeningen is verondersteld, dat de afgescheiden damp langs een niet-thermische route wordt behandeld. Deze veronderstelling is gemaakt om het energetisch belang van een partiële, niet-thermische route te illustreren. We zijn ons daarbij van bewust, dat in het AVR-MER rapport wordt beargumenteerd, dat een dergelijke verwerking geen optie is.

Gekeken is naar:

- installatie zonder indampen;
- installatie met een gemiddeld indampen, waarbij het zoutpercentage in de voeding toeneemt van 5% tot 13% (volgens AVR is dit het maximum in verband met de viscositeit van de voeding).
- installatie met een maximaal indampen, waarbij het zoutpercentage toeneemt van 5% tot 50% (situatie zoals die in Brunsbüttel voorkomt).

Het berekende energieverbruik is omgerekend naar MJ per ton verwerkt afvalwater. Details van de berekeningen worden gegeven in bijlage 3. Resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

Indampen		Energieverbruik per ton afvalwater			Capaciteit	Teruggewonnen	
Zoutvracht		Stoom verbruik	Gas verbruik	Totaal	Afvalwater	Stoom	Rendement
van	naar	(ton)	(Nm ³)	(MJ)	(ton/hr)	(ton/hr)	ketel overall
5%	5%	0,00	314	11031	3.5	10	56% 56%
5%	13%	0.162	125	4753	8.8	10	56% 52%
5%	50%	0.243	31	1613	35.0	10	56% 38%

De tabel maakt een aantal zaken duidelijk:

- Het specifieke energieverbruik (MJ per ton afvalwater) van de installatie is sterk gekoppeld aan de mate van indampen. Het energieverbruik per ton aangevoerd afvalwater daalt spectaculair van 11031 MJ naar 1613 MJ (85%) bij het indampen naar een zoutconcentratie van 50%.
- Bij een verregaande indamping van de afvalwaterstromen, stijgt de verwerkingscapaciteit van de installatie aanzienlijk: van 3.5 naar 35 ton/h . (Bij constant vermogen van de branders).
- De stoomproductie is gekoppeld aan het vermogen dat door de branders wordt gegenereerd. Aangezien dit vermogen constant is verondersteld, zal ook de stoomproductie constant zijn.

- Het ketelrendement gebaseerd op de bovenwaarde en onderwaarde van aardgas is respectievelijk 56% (HHV) en 62% (LHV). Dit lage rendement wordt veroorzaakt doordat voelbare warmte in de afgassen slechts ten dele wordt teruggewonnen (tot 300 °C), latente warmte gaat in zijn geheel verloren.
- Naarmate het stoomverbruik voor het indampen toeneemt, daalt het overall rendement van de installatie.

6. Verschillen Brunsbüttel en voorgestelde AVR-installatie

Concentreren we ons op de verschillen met de AVR situatie, dan zijn een aantal zaken van belang.

6.1 Het concept

In hoofdstuk 5 is aangetoond, dat het vanuit energetisch oogpunt essentieel is om de afvalwaterstroom in te dampen en de fracties daarna gescheiden te verwerken. De vermindering in het energieverbruik bij een dergelijke werkwijze is spectaculair. Voor de AVR is dit echter geen optie (zie AVR-MER).

6.2 De capaciteit van de installatie

AVR-chemie heeft besloten een installatie neer te zetten bestaande uit drie parallelle, identieke lijnen. De verwerkingscapaciteit van iedere lijn is 110.000 ton per jaar en komt overeen met die van de installatie van Bayer Brunsbüttel. De indampinstallatie bij Bayer brengt de afvalwaterstroom echter terug tot 27.000 ton per jaar, zodat de capaciteit van het verbrandingsdeel bij Bayer slechts 25% is van de capaciteit die bij AVR-Chemie is voorzien.

6.3 De Voeding

Bij AVR is sprake van een continue stroom afvalwater van constante samenstelling. Bij Bayer daarentegen is de afvalwaterstroom niet continu en is een grote buffercapaciteit nodig. Ondanks de buffer komt het echter regelmatig voor, dat de installatie bij gebrek aan voeding een tijd uit bedrijf gaat (de incinerator is immers niet op deellast te bedienen). Ook de samenstelling van het bij Bayer aangevoerde afvalwater varieert sterk (dichtheid varieert van 1.04 tot 1.1 ton/m³). De verschillen na de indampers zijn nog veel groter (dichtheid van 1.04 tot 1.6 ton/m³). Dit heeft direct consequenties voor het onderhoud dat aan de installatie moet worden gepleegd.

6.4 Het onderhoud

De installatie waarvoor AVR-Chemie opteert, is eenvoudig (concept zonder indampers, zonder warmteterugwinning) en dus onderhoudsvriendelijk. Alleen het schoonmaken van de brander zal op gezette tijden moeten gebeuren; naar de ervaring van Bayer en afhankelijk van de zoutlast gemiddeld 1x per dag. Dit is conform

de ervaringen met het Japanse concept bij Nihon Oxirane (Merks, 1996, Meeting report Nihon Oxirane Co.).

Een concept met indampers, incinerator en warmteterugwinning (zoals bij Bayer) is zonder meer gecompliceerder. Bij Bayer wordt de plant draaiende gehouden in 5 ploegendienst met 4 personen. Hierbij wordt opgemerkt dat het personeel is verdeeld over de hele installatie (waterzuivering, indampers, ketels).

Het noodzakelijk onderhoud aan de afgassenketel bij Bayer (Lurgi/Stein-müller concept) is sterk afhankelijk van de zoutconcentratie in de voeding aan de ketel. Hoe lager de zoutconcentratie hoe geringer de kans op vervuiling. Met andere woorden het noodzakelijke ketel onderhoud is sterk afhankelijk van het wel of niet installeren van een indampinstallatie.

In beide concepten worden de rookgassen uiteindelijk met water gekoeld. In het Japanse concept is de dompelquench gevoelig voor de vorming van ketelsteen. AVR denkt dit probleem te kunnen ondervangen door de quench te bedrijven met gedestilleerd water in plaats van oppervlakte water.

6.5 De bedrijfsuren

Volgens opgave wil AVR-Chemie de afvalwater-incinerator jaarlijks 7586 uur in bedrijf hebben. In 1995 had de installatie van Bayer 7000 bedrijfsuren (de indampinstallatie kende 7230 bedrijfsuren). Het reinigen van de warmtewisselaar in de ketel staat in de boeken voor 572 bedrijfsuren. Hierbij zijn een aantal opmerkingen relevant:

- Voor het schoonmaken met behulp van een roetblazer wordt de installatie niet afgekoeld; alleen de toevoer van afvalwater wordt gestopt.
- Hetzelfde geldt ook voor het gebruik van stootstangen om zoutmutsen en -baarden te verwijderen.
- Gemiddeld 1 maal per week wordt de ketel afgekoeld en gaan twee schoonmakers de ketel in. Een dergelijk stop duurt gemiddeld 8-10 uur (426 uur). Dit onderhoud wordt vaak gecombineerd met stilstand veroorzaakt om andere redenen. Zo gaan onder andere 175 bedrijfsuren verloren door gebrek aan te verwerken afvalwater.

Iedere 2-3 jaar is er sprake van algemeen onderhoud aan de ketel gedurende 6-8 dagen.

7. Warmteterugwinning zonder indampen

In de AVR-MER wordt een somber beeld gegeven van de energiehuishouding van het voorgestelde verwerkingsconcept (figuur 4.3 van het de AVR-MER). Enige nuancering is echter op zijn plaats. In alle concepten, waarin uitsluitend sprake is van een thermische reiniging, gaat veel warmte verloren. Substantiële warmteterugwinning is maar ten dele mogelijk.

Om de nuancering te kwantificeren zijn met de CYCLE software berekeningen uitgevoerd. De mogelijkheden voor warmteterugwinning met een afgassenketel (Duitse concept) hebben daarbij centraal gestaan. De uitgangspunten voor de berekeningen en de resultaten worden in de paragrafen 7.1 en 7.2 gepresenteerd. Details van de berekeningen worden in bijlage 4 gegeven

7.1 Uitgangspunten CYCLE berekeningen

In het Duitse concept met afgassenketel (maar zonder indamping) vindt warmteterugwinning plaats in het temperatuurtraject van 950 °C tot 300 °C. Met de ketel wordt slechts in beperkte mate warmte teruggewonnen; veel gaat ook verloren (voelbaar en latent). De latente warmteverliezen zijn extra hoog door het hoge watergehalte.

In de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gekozen:

- Rookgassen komen voor de afgassenketel ter beschikking op een temperatuurniveau van 950 °C.
- Met betrekking tot de samenstelling van de rookgassen is verondersteld dat de secundaire brandstof bij benadering kan worden beschreven als C_nH_{2n} .
- Het afvalwater bestaat voor 90% uit water.

Het bovenstaande leidt tot een afgassenstroom waarvan de samenstelling bij benadering wordt gegeven door: 53 mol% N_2 , 39 mol% H_2O en 8 mol% CO_2 .

Verder geldt dat:

- Energie inhoud van gasstromen worden berekend vanaf het referentie niveau van 15 °C en 1 bar.
- De temperatuur aan de uitgang van de ketel 300 °C, tenzij anders wordt vermeld.

7.2 Resultaten CYCLE-berekeningen

De resultaten van de CYCLE berekeningen zijn samengevat in onderstaande tabel. De hoeveelheid warmte (enthalpie), die na de branders aan de afgassenketel wordt aangeboden, is gelijk aan 96 MW. Deze waarde komt goed overeen met de berekeningen uit de concept-MER, en is gebruikt voor de normering van de berekeningsresultaten.

Drie cases zijn doorgerekend:

- Case 1: waarbij warmte aan de rookgassen wordt onttrokken in het temperatuurtraject van 950 °C tot 300 °C en stoom wordt geproduceerd van 40 bar en 400 C.
- Case 2: waarbij de stoomdruk is aangepast aan de situatie bij de AVR.
- Case 3: waarbij de temperatuur van de rookgassen die de ketel verlaten 50 °C hoger ligt. Deze case laat zien wat de energetische consequenties zijn van het installeren van een Duits concept met zogenaamde *Gassenkessel*.

Afgas °C	Stoom Conditie	Beschikbaar	Rendement		
			Ketel	Elec.	Overall
300	40 bar / 400 °C	100%	47.7%	29.6%	14.1%
300	27 bar / 400 °C	100%	47.7%	27.8%	13.3%
350	40 bar / 400 °C	100%	44.3%	29.6%	13.1%

Een aantal conclusies kunnen worden getrokken:

1. In alle cases is het ketelrendement laag; slechts 44-48% van de warmte kan met een afgassenketel worden teruggewonnen.
2. Indien de geproduceerde stoom wordt gebruikt om elektriciteit te produceren, dan moet rekening worden gehouden met een omzettingsrendement van ongeveer 28%.
3. Het overall rendement van de installatie (omzetting van warmte naar elektriciteit) ligt tussen 13-14% en is dus laag.

Economie

Hoewel de economische aspecten van een afgassenketel strikt genomen buiten het kader van deze studie vallen, worden hier toch richtbedragen gegeven.

Een afgassenketel in de AVR-situatie moet in staat worden geacht om ongeveer 70 ton stoom per uur (40 bar 400 °C) te produceren. Volgens een opgave van de DACE (Dutch Association of Cost Engineers) kost een package unit stoomketelinstallatie fl 185.000,- tot fl 125.000,- per ton stoom per uur. Uitgaande van het maximum van fl 185.000, resulteert dit in een investering van fl 13 miljoen. Onze inschatting is, dat de prijsopgaven van de DACE gelden voor afgassenketels in gasgestookte installaties, waar warmtewisselaars met gevinde pijpen kunnen wor-

den toegepast. Een afgassenketel achter een incinerator zal ongetwijfeld duurder zijn. Gegevens van de AVR komen uit op een prijs per ton stoom per uur van fl 370.000,= (gebaseerd op een investering van fl 11 miljoen in een ketel met een capaciteit 30 ton stoom per uur in de DTO9 plant). Dit zou resulteren in een investering van fl 25 miljoen.

De restcapaciteit van aanwezige condenserende turbines is te klein. Bij plaatsing van een nieuwe turbine is een additionele investering nodig. Bij een vermogen van 14 MW resulteert dit in een investering van fl 11 miljoen in het mechanisch gedeelte van de stoomturbine installatie (14 MW turbine, tandwielkast, generator, condensorsysteem, dearators, voedingswater-voorverwarmers (3x) + instrumentatie). Inclusief gebouwen, aansluitingen, start-up voorzieningen en uitvoering van de werkzaamheden worden de kosten geschat op fl 20 miljoen. De data zijn verkregen van producenten van relevante apparatuur en komen overeen met data van AVR.

Aan opbrengsten mag een elektriciteitsproductie van 14 MW gedurende 7586 uur per jaar worden verwacht; oftewel een opbrengst van 106 GWh. Per kWh ontvangt de AVR fl 0.075 (inclusief vergoeding piekcapaciteit). De opbrengst van de installatie is fl 8 miljoen per jaar

Een meer gedetailleerde berekening, waarbij ook rekening is gehouden met operationele kosten, is door AVR gemaakt. De resultaten hiervan zijn in bijlage 5 opgenomen

8. Conclusies

Het rapport toont aan dat het energieverbruik tot minder dan de helft kan worden teruggebracht, door de afvalwaterstroom in te dampen en de damp langs een niet thermische weg te behandelen. De niet-thermische route is voor de AVR echter onaanvaardbaar (zie ook MER)

De AVR is van plan de gehele afvalwaterstroom thermisch te verwerken in een installatie zonder warmteterugwinning. Dit concept is eenvoudig, onderhoudsvriendelijk en kent een energieverbruik van ongeveer 100 MW. De vraag is gerechtvaardigd of een deel van de warmte kan worden teruggewonnen. Met betrekking tot warmteterugwinning zijn in principe twee alternatieven beschikbaar: terugwinning in het hoge temperatuurtraject (950 °C - 300 °C) en terugwinning van latente warmte (150 °C - 80 °C).

Hoge temperatuur warmteterugwinning kan worden gerealiseerd met een afgassenketel. De referentielijst van de Duitse leverancier is kort; ervaring is voornamelijk opgedaan bij Bayer in Brunsbüttel. De installatie in Brunsbüttel heeft de nodige kinderziektes gekend maar men heeft de problemen nu onder controle. Bij een hoge zoutconcentratie in het afvalwater (50%) is de afgassenketel gevoelig voor vervuiling en heeft iedere 3 a 4 dagen onderhoud. Bij de AVR zal deze problematiek minder spelen, omdat de zoutconcentratie lager is. Naar verwachting zullen de ketels éénmaal per week gedurende 8-10 uur uit bedrijf moeten om te worden gereinigd.

Van de warmte die na de incinerator beschikbaar komt, kan met een afgassenketel slechts 44-48% worden teruggewonnen in de vorm van stoom (400 °C). Dit rendement is laag omdat er in de afgassen extreem veel water zit. Indien de stoom wordt gebruikt om elektriciteit te produceren, dan moet rekening worden gehouden met een omzettingsrendement van 28%. Het overall rendement van de installatie (omzetting van warmte naar elektriciteit) bedraagt dan 13-14%

De mogelijkheden voor hoge temperatuur-warmteterugwinning zullen afhangen van economische beschouwingen. De noodzakelijke investeringen in afgassenketels worden geschat op fl 25 miljoen (gebaseerd op gegevens van de AVR). De restcapaciteit van aanwezige condenserende turbines is te klein. Investeringen in het mechanisch gedeelte van een stoomturbine installatie (14 MW turbine, tandwielkast, generator, condensorsysteem, dearators, voedingswater-voorverwarmers (3x) + instrumentatie) worden geschat op fl 11 miljoen. Inclusief gebouwen, aansluitingen, start-up voorzieningen en uitvoering van de werkzaamheden worden de kosten geschat op fl 20 miljoen. Dit komt overeen met data van AVR. Mogelijke opbrengsten worden geschat op fl 8 miljoen per jaar (gebaseerd op een elektriciteitsprijs van fl 0.075 per kWh en inclusief vergoeding piekcapaciteit).

Lage temperatuur-warmteterugwinning kan worden gerealiseerd in concepten waarin water uit de rookgassen wordt gecondenseerd. Het probleem is dat deze warmte slecht moeizaam kan worden hergebruikt. Te denken valt aan stadsverwarming of de produkte van gedestilleerd water.

De Japanse leverancier heeft een concept, waarin latente warmte uit de afgassen wordt teruggewonnen bij het indampen van de inkomende afvalwaterstroom. De energie winst wordt daarbij behaald, door een deel van de afvalwaterstroom langs een niet-thermische route te behandelen. Zoals eerder is opgemerkt, is de niet-thermische route voor de AVR onaanvaardbaar (zie ook MER)

Een installatie met mechanische damprecompressor kan uitkomst bieden. Een dergelijk apparaat wordt op vele plaatsen in de industrie succesvol gebruikt. De (on-)mogelijkheden van een dergelijk concept zouden moeten worden bekeken. Indien 60% van de voeding in de vorm van damp aan de incinerator wordt toegevoerd (zoals voorzien door AVR), dan kan met mechanische damprecompressie 16 MW latente warmte worden teruggewonnen.

9. Referenties

Anon (1989),
Outlook for Commercial Hazardous Wastes Management Facilities: A Nation
Wide Perspective, The Hazardous Waste Consultant, April 1989

Grover, R., en H.M. Gomaa (1983),
Proven Technologies Manage Olefin Plant's Spent Caustic, Hydrocarbon
Processing, september 1993

Merks, R., (1996),
Meeting Report Nihon Oxirane Co.

Mischer, G., Kiesewetter K-P. en R. Krebber (1985),
Eindampfung und Gasphasen-Oxidation Industrieller Prozessabwasser mit
Erzeugung von Abhitzedampf, Cem.-Ing.-Tech., 57 nr 10.

Van Os. V., (1995),
Bezoekverslag Bayer Brunsbüttel AVR/95/2220/VvO

Rademakers, P., et al. (1994)
Componenten voor Installaties voor Thermische Afvalverwerking, Novem
projectnr. 355100/1050, Utrecht.

Anon (1996),
Preliminary Proposal of Caustic Waste Incineration Plant for ARCO Chemical
Company PO/SM Plant, Tokyo, 1996

10. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

AVR-Bedrijven
J.Oskam (Hoofd Nieuwbouw)
Prof. Gerbrandyweg 10,
3197 KK Rotterdam/Botlek

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Dr.Ir. P.J.T. Bussmann
Ing. W. Hesseling

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

niet van toepassing

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

oktober 1996 - november 1996

Ondertekening:

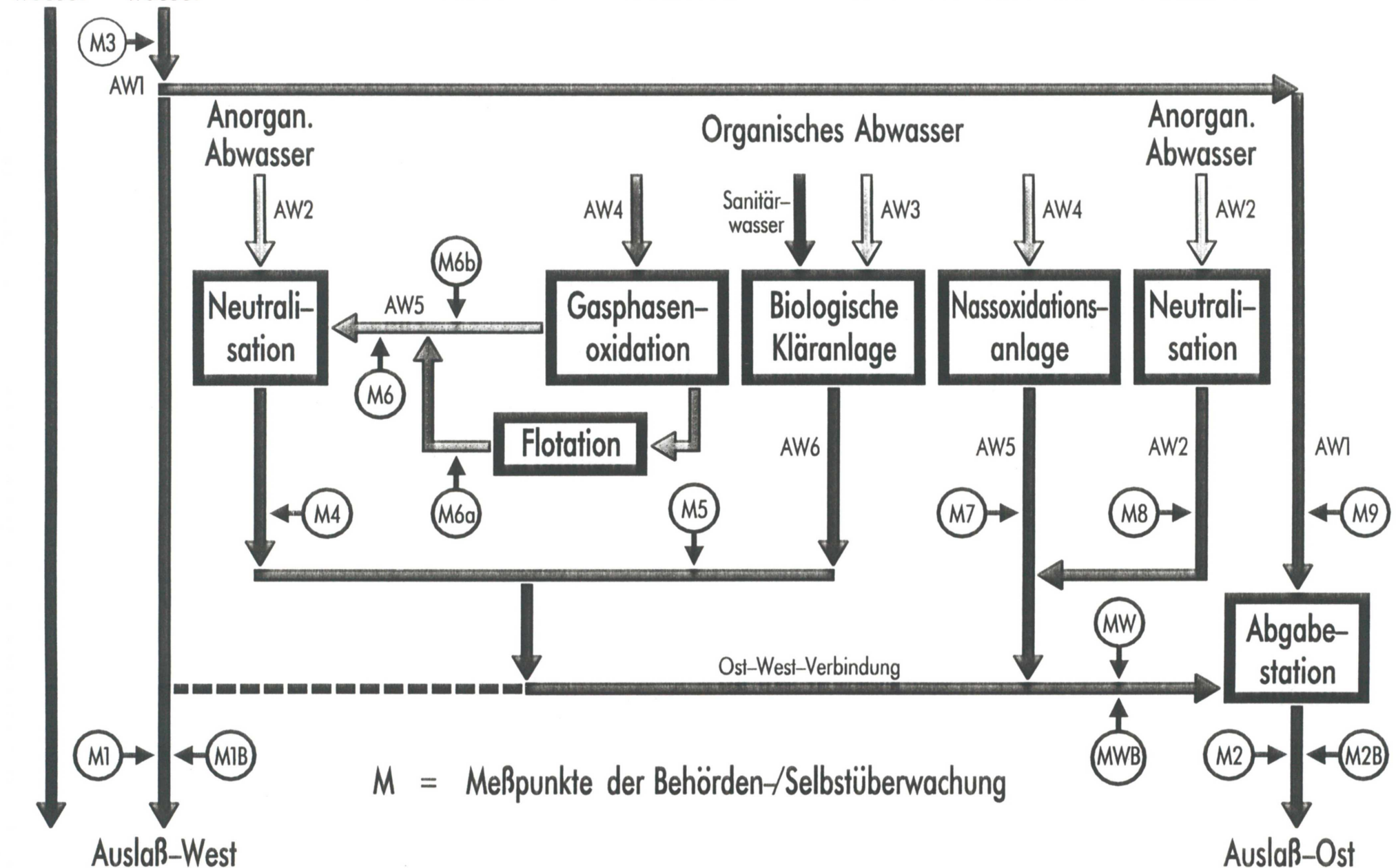
Goedgekeurd door:

Dr.Ir. P.Bussmann

BIJLAGEN

1. Schema's Installatie Bayer Brunsbüttel

Abwassersystem Werk Brunsbüttel der Bayer AG



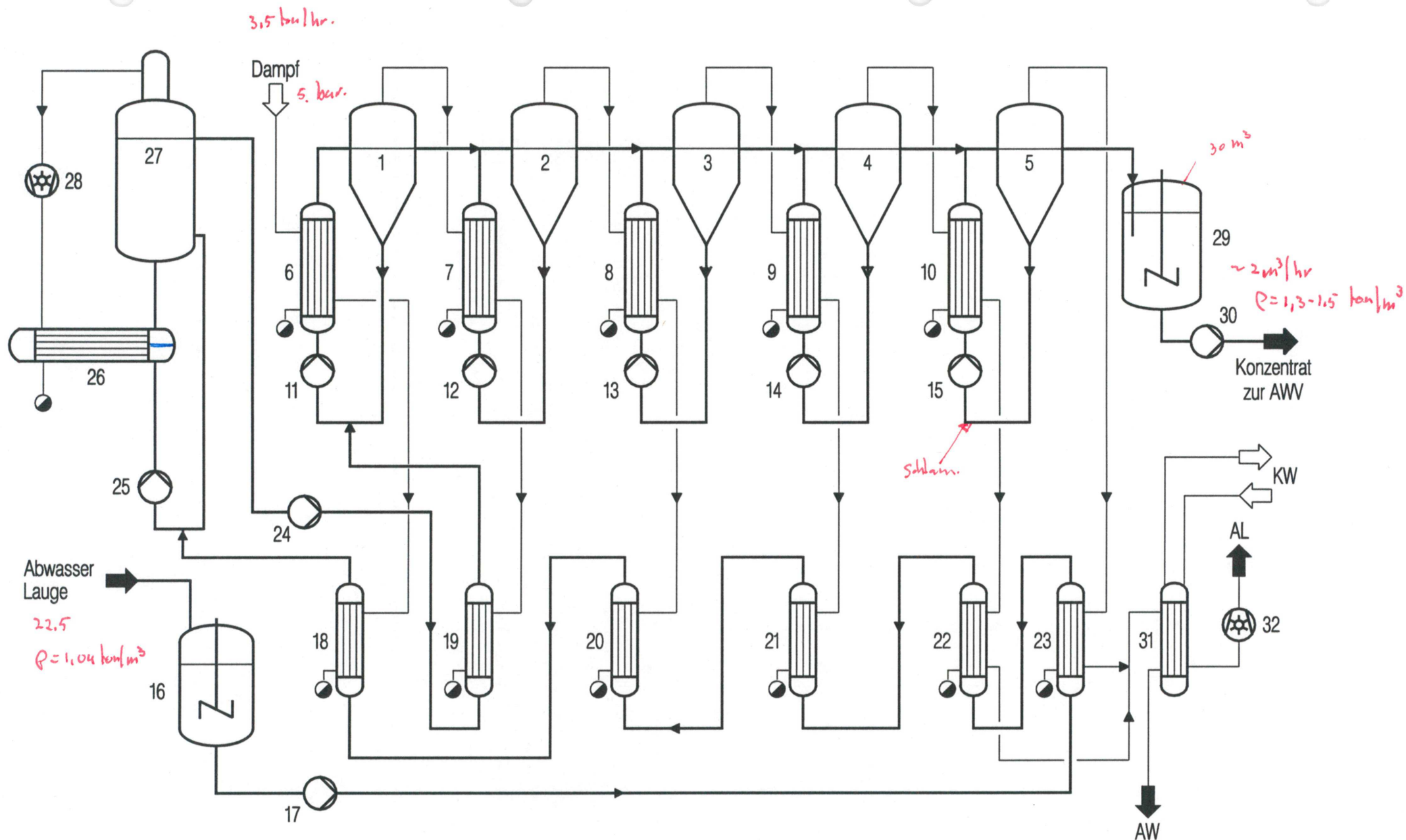
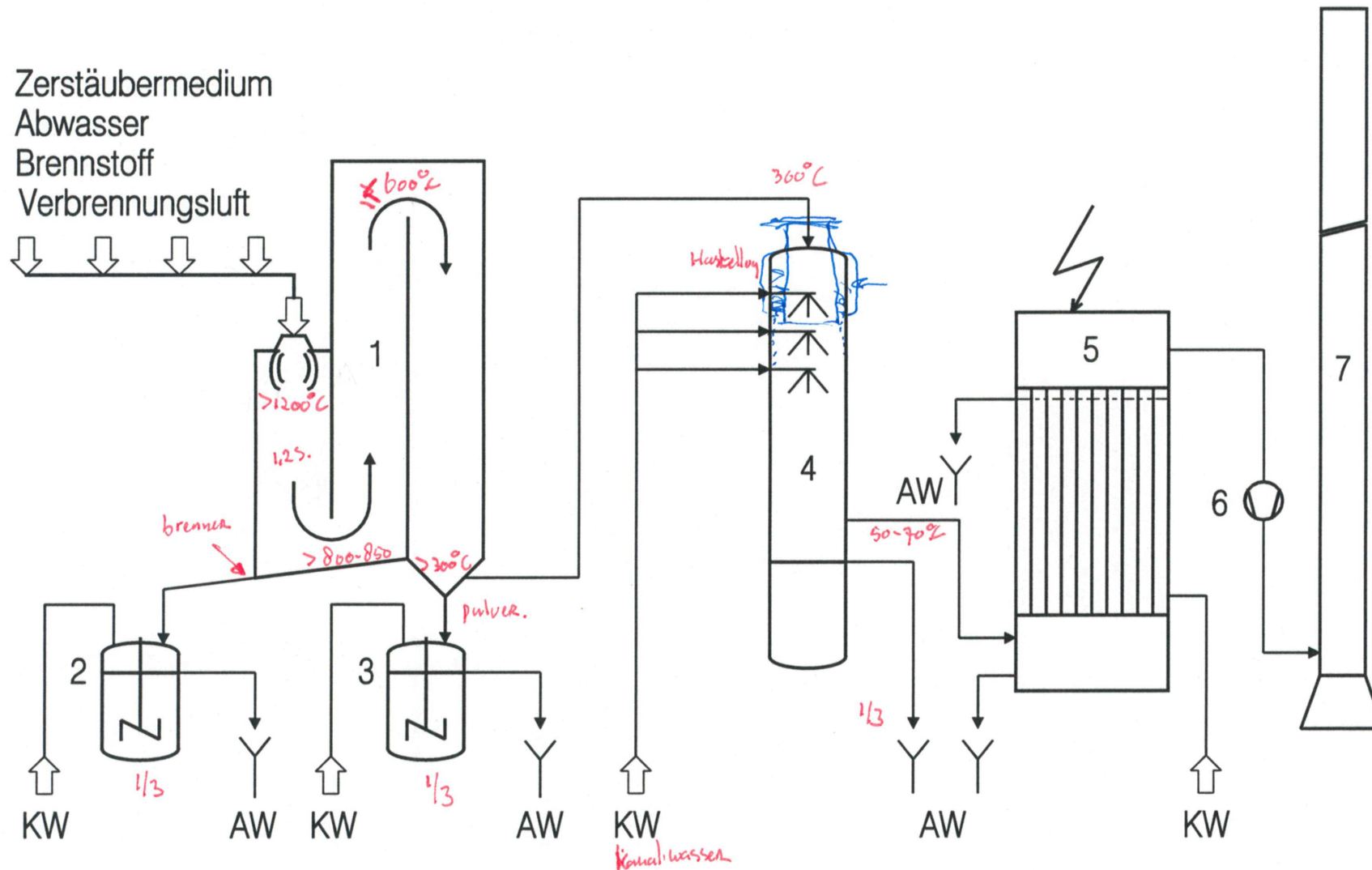


Abb.1 Abwasser-Eindampf-Anlage

1-5 Ausdampfgefäß , 6-10 Heizkörper , 11-15 Umwälzpumpe , 16 Neutralisationsvorlage , 17 Pumpe
 18-23 Vorwärmer , 24 Pumpe , 25 Umwälzpumpe , 26 Heizkörper , 27 Ausdampfgefäß
 28 Brüden-Kompressor , 29 Konzentratvorlage , 30 Pumpe , 31 Oberflächenkühler , 32 Vakuumpumpe

Abwasser – Verbrennungsanlage



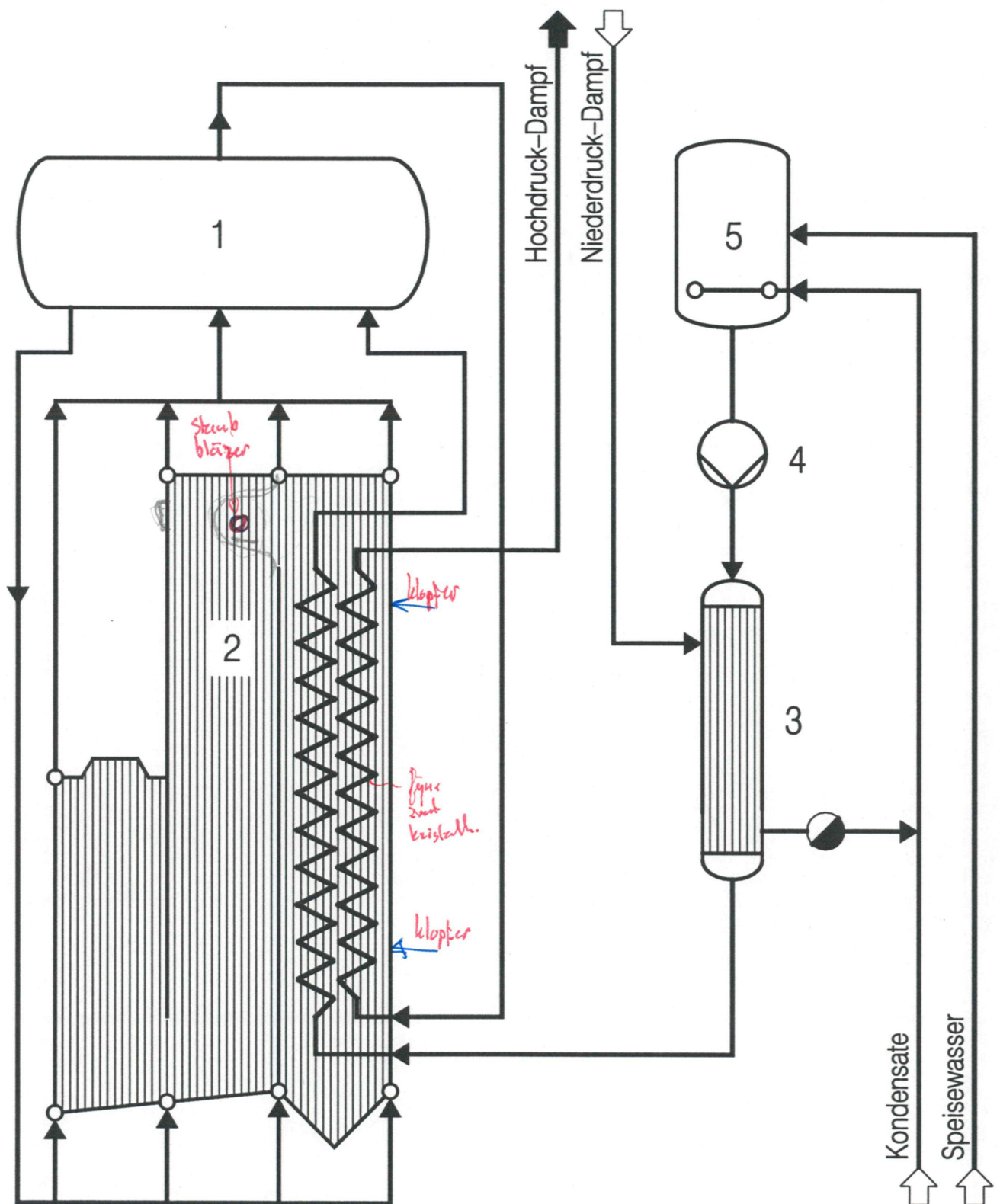
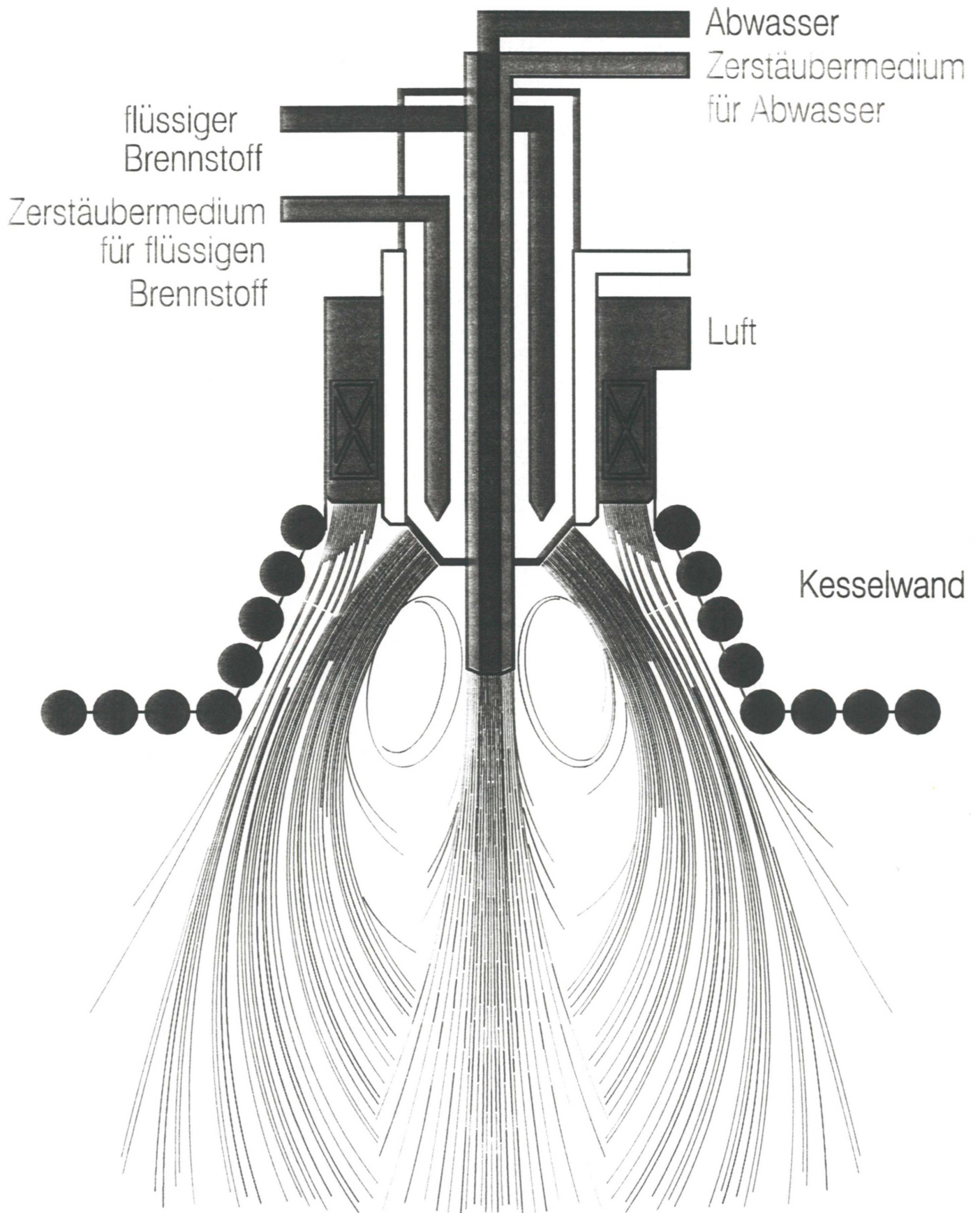


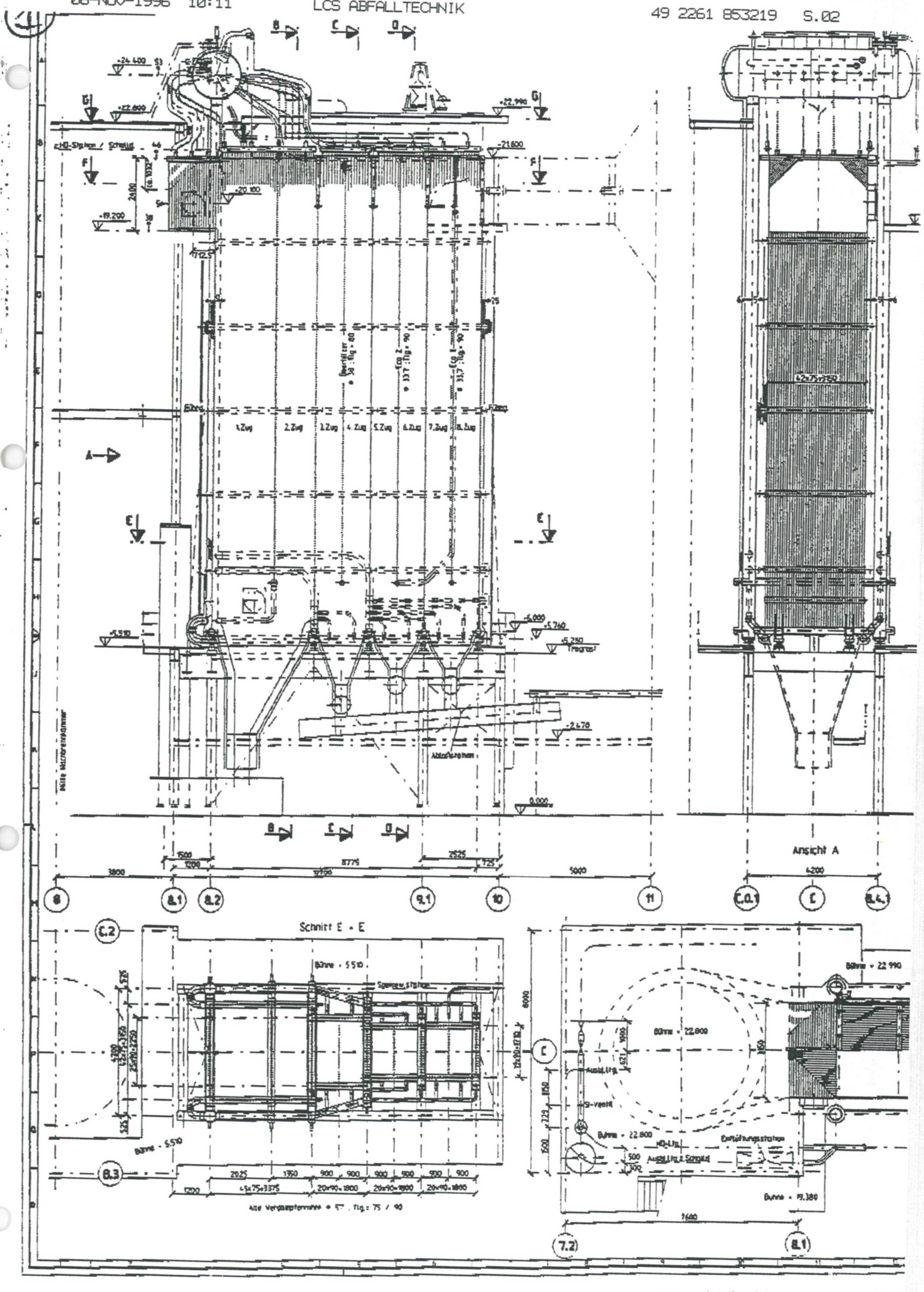
Abb.3 Wärmerückgewinnung:

1 Dampftrommel ,2 Flossenrohrkessel mit Eco und Überhitzer , 3 Speise – wasservorwärmer , 4 Speisewasserpumpe , 5 Speisewasservorlage

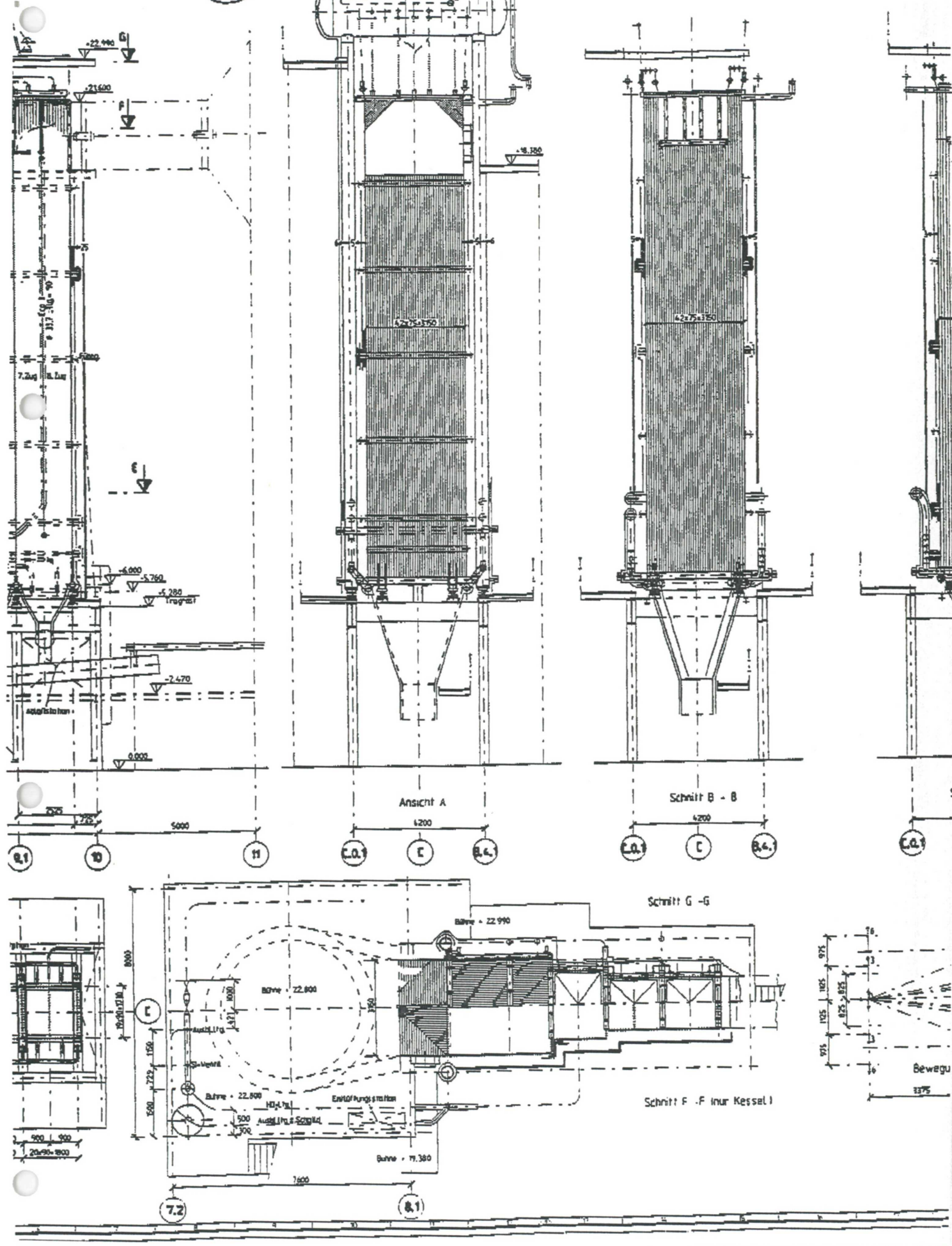
Abwasser – Brenner



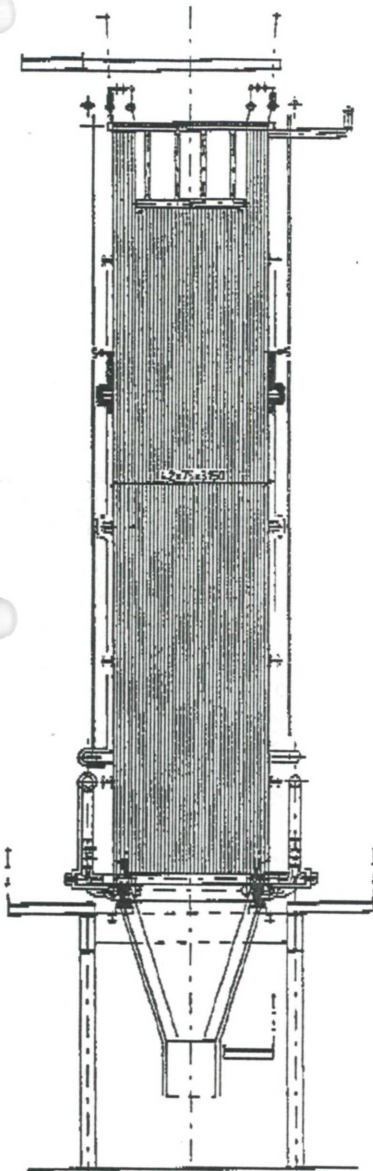
2. *Gassenkessel*



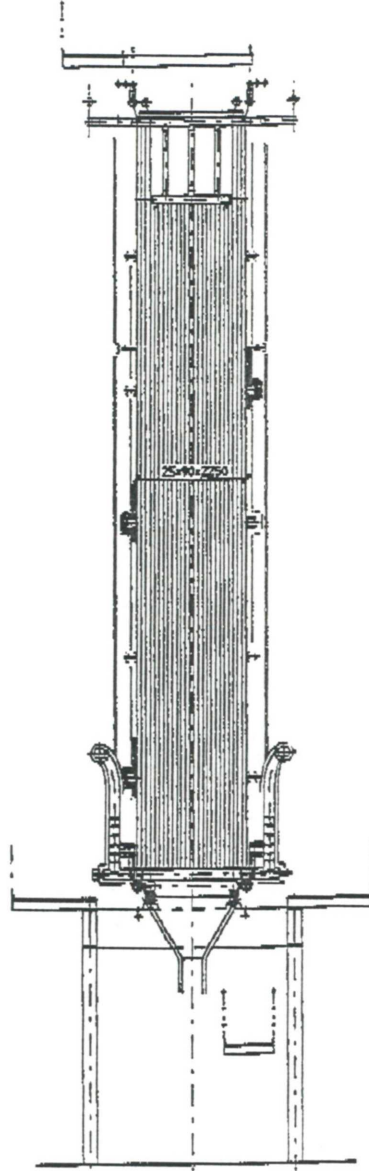
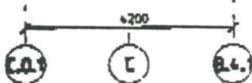
②



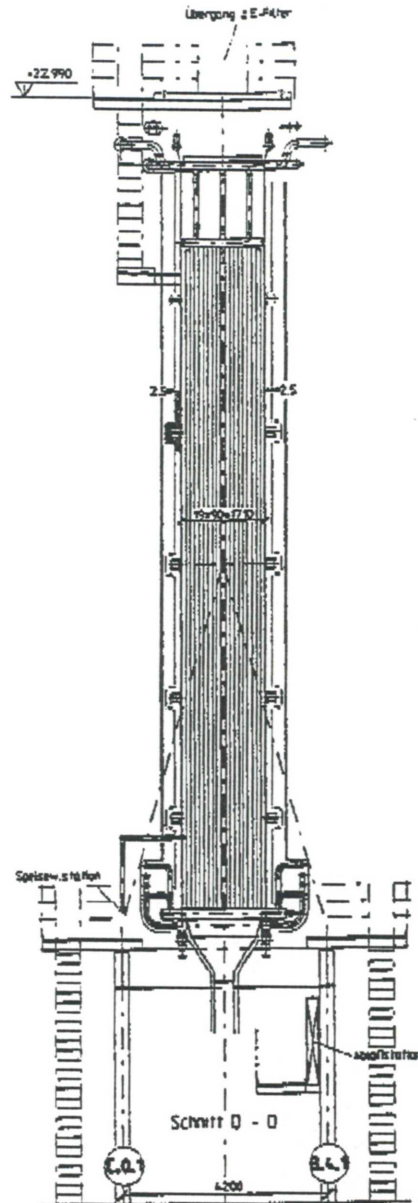
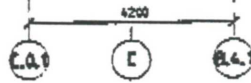
(3)



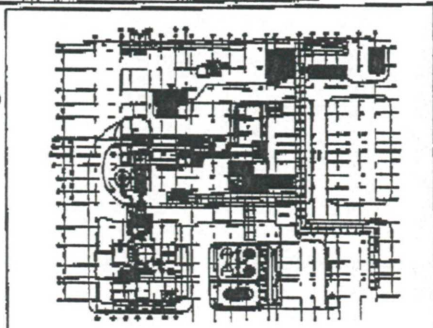
Schnitt B - B



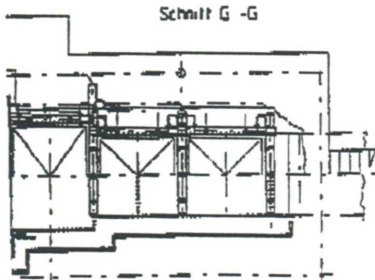
Schnitt C - C



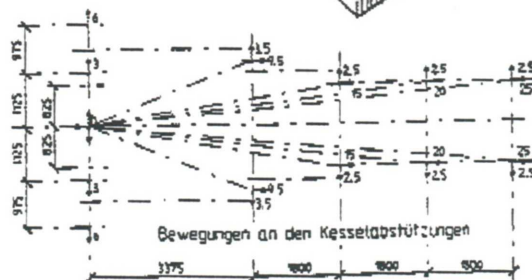
Schnitt D - D



Schnitt E - E



Schnitt F - F nur Kessel I



23. Aug. 1996

Stand: 23.08.1996



Broerius Abfallwirtschaft Sachsen GmbH	
STERNENSTRASSE 475719	
Neckertung RYA Bühl	
Kesselzusammensetzung Druckteil	
07. 3710957001000	
1:50	
101110111	

3. Detailberekeningen energieverbruik indampen

BEREKENINGEN AVR MER (zonder indampen)

Uitgangsgrootheden

aardgas			
HHV	35.1 MJ/Nm ³		
LHV	31.6 MJ/Nm ³		
Indamper			
Stoom			
druk	5 bar		
temp	155 C		
dHbeschikbaar	2.1 MJ/kg		
Ketel			
water		stoom	
temp	200 C	druk	34 bar
Hwater	0.85 MJ/kg	temp	300 C
Htoevoeged	2.17 MJ/kg	Hstoom	3.02 MJ/kg
Afvalwater			
Inkomend		Na indamper	
Stroom in	3.5 ton/hr	3.5 ton/hr constant	
zoutgehalte	5% mass	5% mass	

Indamper

Spec. Stoomverbruik	0.27 ton/ton afgedreven damp
Dampproductie	0 ton/hr
Stoomverbruik	0 ton/hr
	0 ton/ton inkomend water
	0 MJ/ton inkomend water

Ketel

Gastoevoer constant	
Gas brander	950 Nm ³ /hr
Gas zoutafvoer	150 Nm ³ /hr
Gas Totaal	1100 Nm ³ /hr
	10.7 Mwatt (HHV)
	314.3 Nm ³ /ton inkomend water
	11031.4 MJ(HHV)/ton inkomend water
	9931.4 MJ(LHV)/ton inkomend water
Brander stoom	0.325 ton/hr
(verwaarloosbaar)	0.272639 Mwatt
Stoomproductie	10 ton/hr
	6 Mwatt
	6200 MJ/ton inkomend water
Ketel rendement	
HHV	56%
LHV	62%

Energieverbruik

Indamper	0 MJ/ton inkomend water
Ketel	11031 MJ(HHV)/ton inkomend water
Totaal	11031 MJ/ton inkomend water
Nuttig	6200 MJ/ton inkomend water
Rendement	56%
Capaciteit	3.5 ton inkomend water/hr

BEREKENINGEN AVR MER (met indampen zoals voorzien in MER)

Uitgangsgrootheden

aardgas			
HHV	35.1 MJ/Nm ³		
LHV	31.6 MJ/Nm ³		
Indamper			
Stoom			
druk	5 bar		
temp	155 C		
dHbeschikbaar	2.1 MJ/kg		
Ketel			
water		stoom	
temp	200 C	druk	34 bar
Hwater	0.85 MJ/kg	temp	300 C
Htoegevoegd	2.17 MJ/kg	Hstoom	3.02 MJ/kg
Afvalwater			
Inkomend		Na indamper	
Stroom in	8.75 ton/hr	3.5 ton/hr constant	
zoutgehalte	5% mass	13% mass	

Indamper

Spec. Stoomverbruik	0.27 ton/ton afgedreven damp
Dampproductie	5.25 ton/hr
Stoomverbruik	1.4175 ton/hr
	0.162 ton/ton inkomend water
	340.2 MJ/ton inkomend water

Ketel

Gastoevoer constant	
Gas brander	950 Nm ³ /hr
Gas zoutafvoer	150 Nm ³ /hr
Gas Totaal	1100 Nm ³ /hr
	10.7 Mwatt (HHV)
	125.7 Nm ³ /ton inkomend water
	4412.6 MJ(HHV)/ton inkomend water
	3972.6 MJ(LHV)/ton inkomend water
Brander stoom	0.325 ton/hr
(verwaarloosbaar)	0.272639 Mwatt
Stoomproductie	10 ton/hr
	6 Mwatt
	2480 MJ/ton inkomend water
Ketel rendement	
HHV	56%
LHV	62%

Energieverbruik

Indamper	340 MJ/ton inkomend water
Ketel	4413 MJ(HHV)/ton inkomend water
Totaal	4753 MJ/ton inkomend water
Nuttig	2480 MJ/ton inkomend water
Rendement	52%
Capaciteit	8.8 ton inkomend water/hr

BEREKENINGEN AVR MER (met indampen zoals maximaal Brunsbütte

Uitgangsgrootheden

aardgas			
HHV	35.1 MJ/Nm ³		
LHV	31.6 MJ/Nm ³		
Indamper			
Stoom			
druk	5 bar		
temp	155 C		
dHbeschikbaar	2.1 MJ/kg		
Ketel			
water		stoom	
temp	200 C	druk	34 bar
Hwater	0.85 MJ/kg	temp	300 C
Htoegevoegd	2.17 MJ/kg	Hstoom	3.02 MJ/kg
Afvalwater			
Inkomend		Na indamper	
Stroom in	35 ton/hr	3.5 ton/hr constant	
zoutgehalte	5% mass	50% mass	

Indamper

Spec. Stoomverbruik	0.27 ton/ton afgedreven damp
Dampproductie	31.5 ton/hr
Stoomverbruik	8.505 ton/hr
	0.243 ton/ton inkomend water
	510.3 MJ/ton inkomend water

Ketel

Gastoevoer constant	
Gas brander	950 Nm ³ /hr
Gas zoutafvoer	150 Nm ³ /hr
Gas Totaal	1100 Nm ³ /hr
	10.7 Mwatt (HHV)
	31.4 Nm ³ /ton inkomend water
	1103.1 MJ(HHV)/ton inkomend water
	993.1 MJ(LHV)/ton inkomend water
Brander stoom	0.325 ton/hr
(verwaarloosbaar)	0.272639 Mwatt
Stoomproductie	10 ton/hr
	6 Mwatt
	620 MJ/ton inkomend water
Ketel rendement	
HHV	56%
LHV	62%

Energieverbruik

Indamper	510 MJ/ton inkomend water
Ketel	1103 MJ(HHV)/ton inkomend water
Totaal	1613 MJ/ton inkomend water
Nuttig	620 MJ/ton inkomend water
Rendement	38%
Capaciteit	35.0 ton inkomend water/hr

4. Details CYCLE-berekeningen



CYCLE

A program for thermodynamic analysis and optimization of energy systems



If you are involved in designing new systems generating electricity, heat, cold or combinations of these, or operating existing systems of this kind, then CYCLE has a great deal to offer you.

CYCLE was developed jointly by TNO and the Delft University of Technology to assist in the thermodynamic analysis and optimization of energy systems. Such systems often consist of a number of interconnected cycles which in turn are compared of several, sometimes large numbers of apparatuses. These apparatuses are connected to each other by pipes, resulting in a complex network of mass and energy flows.

The main aim of CYCLE is to calculate the size of all relevant mass and energy flows in the system. In addition, features are available to enable more detailed analysis and optimization of the system.

The number and type of apparatuses, and the way in which they are inter-linked, may vary in each individual case.

CYCLE thus leaves it entirely up to you to determine the design of the system (the system configuration). CYCLE contains a large number of models for apparatuses and pipes to enable you to compose the required system model for yourself. This practically unlimited flexibility is a key advantage over a number of existing programs, in which little or no variation of system configuration is possible.

Users

CYCLE is ideal for use by:

- Energy companies.
- Industry (e.g. equipment manufacturers and companies having their own utilities).
- Engineering firms and consultants.
- Research and educational institutes.

The program has already been in use for many years in each target group, both in the Netherlands and abroad.

Possible applications

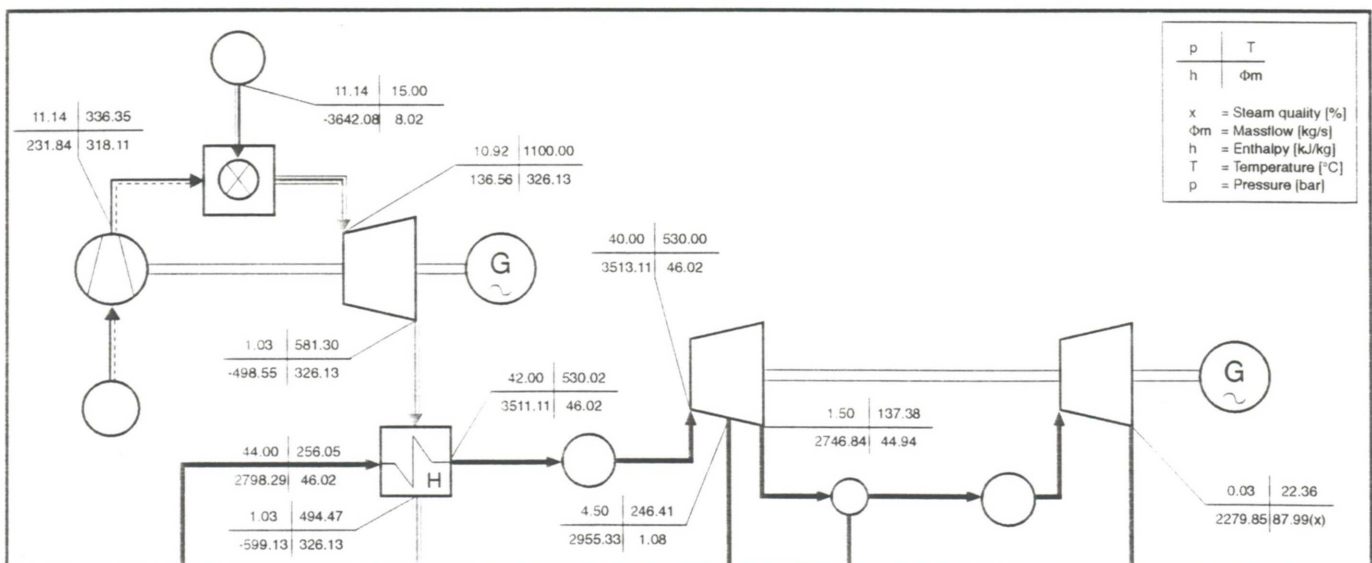
CYCLE was developed for modelling the following:

- Steam turbine cycles.
- STAG (Steam and Gas Turbine) units.
- Gas turbine cycles.
- Combustion and heat transfer systems.
- Coal gasification combined cycles (IGCC).
- Fuel cell systems.
- Organic Rankine Cycles.
- Refrigeration systems.
- Heat pumps.

A user friendly program

Thanks to the program's advanced flexibility, CYCLE can be used for a wide variety of systems, and for solving different types of problems, for example:

- Does the power of the system need to be calculated, or is it actually the starting point?
- Does the mixing temperature need to be calculated, or rather a particular mass flow to reach a desired temperature?



This flexibility evidences the high degree of user-friendliness, which is initially frequently overlooked, and which is not encountered to the same extent in other programs.

CYCLE also has a modern user interface, thereby ensuring optimum user-friendliness.

User interface

The GUIDE user interface (Graphical User Interface for Designing Energy conversion systems) guides you through the CYCLE program. GUIDE is based on MS-Windows, enabling users to become rapidly familiar with its operation. The system is built up quickly and simply by selecting apparatuses from a library and linking them with one another. To do all this, you just use the mouse. Input data for apparatuses and pipes can be specified via input dialogues.

There are various options for viewing the results of the calculation. The conditions in the pipes (pressure, temperature, etc.) can be presented in the process diagram (see Figure 1). The diagram showing these conditions can be rapidly printed out to form a key part of your own report. You can also choose from a variety of tables, e.g.:

- System efficiencies.
- Energy balance of the system.
- Conditions in the pipes (see Figure 2).
- Energy and exergy flows in the pipes.
- Quantities of heat transferred.

You can also compile your own tables from the different calculation results available.

In addition, specific results, such as temperature profiles in heat exchangers, can be presented graphically.

Finally, the output file which CYCLE always creates can be viewed or printed out.

The output file contains not only a complete overview of the calculation results, but also a list of the input data you have specified as starting points for the calculation.

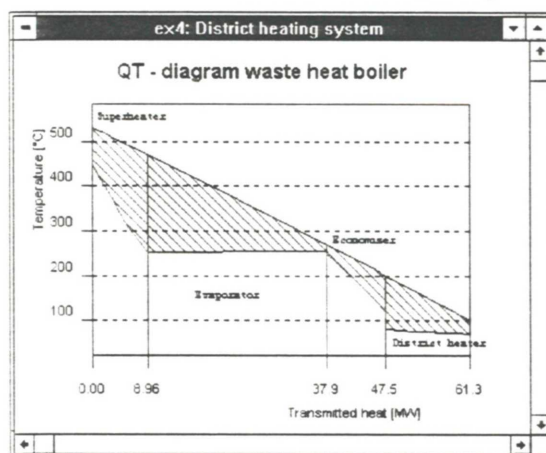


Figure 1. Temperature profiles waste heat boiler

Thermodynamic properties

CYCLE contains sub-programs for calculating the thermodynamic properties of:

- Water and/or steam.
- Mixtures of various types of gases, solid and liquid fuels.
- NIST's well-known REFPROP database, containing 38 refrigerants is available as an integrated sub-program at extra cost.

Standard compositions are available for certain media, such as air, Slochteren natural gas and coal.

Analysis and optimization features

In addition to the detailed output, CYCLE contains features which enable an exergy analysis of the system. Such an analysis provides an insight into the exergy flows and losses in apparatuses and pipes, and is an important tool in searching for the optimum system configuration.

Finally, it is possible at the same time to optimize a number of input parameters, such as the values of the steam pressures at extraction points.

Product information

CYCLE is supplied by TNO on diskettes, accompanied by a detailed instruction manual containing practical examples and explanations. The hardware and software requirements are as follows:

Hardware:

80386 processor or higher with coprocessor 4 MB RAM.

Software:

DOS version 4.01 or higher.

MS-Windows version 3.1 or higher.

Service

Service includes the following:

- Maintenance on the program and associated documentation.
- Providing advice on the use of the program.
- Providing directions for compiling system models.

ex4: Data for all pipes									
Pipe no.	Medium	Massflow [kg/s]	Moleflow [mol/s]	Volumeflow [m ³ /s]	Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy [kJ/kg]	Entropy [kJ/kg.K]	Exergy [kJ/kg]
9	GAS MIX	130.36	4.57	140.05	1.01	100.00	-879.42	7.26	24.03
				140.05	1.01	100.00	-879.42	7.26	24.03
10	WATERSTM	16.84	0.93	1.35	40.00	450.00	3331.22	6.94	1333.40
				1.35	40.00	450.00	3331.22	6.94	1333.40
11	WATERSTM	16.61	0.92	18.13	1.58	113.00	2674.70	7.15	615.83
				18.13	1.58	113.00	2674.70	7.15	615.83

Figure 2. Conditions in the pipes

For further information, please contact:

Energy and Chemical Engineering Division
Department of Refrigeration and Heat Pump
Technology

M.J.E. Verschoor, M.Sc.

P.O. Box 342

NL - 7300 AH Apeldoorn

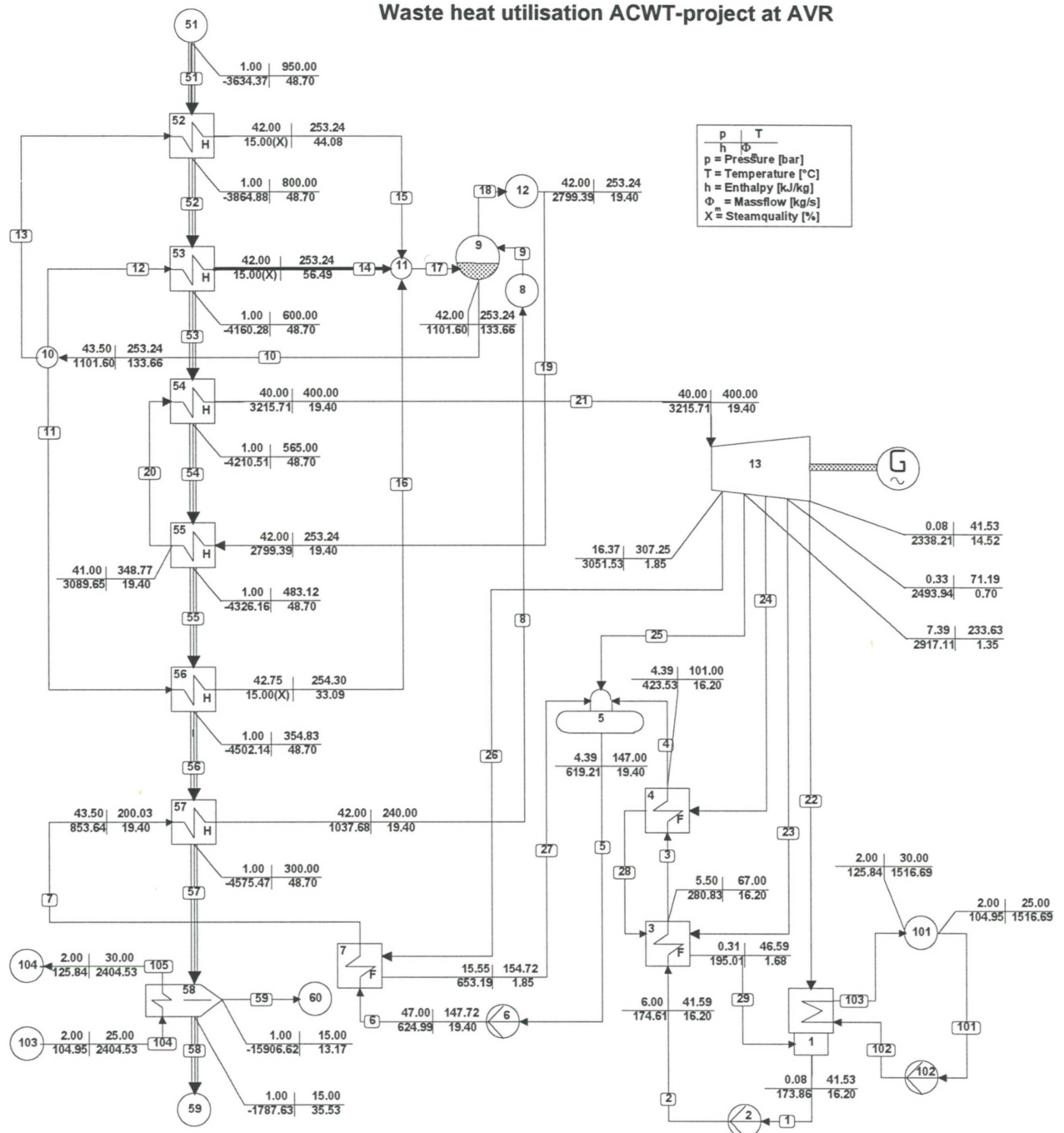
Tel. : +31 55 549 38 00

Fax : +31 55 549 37 40

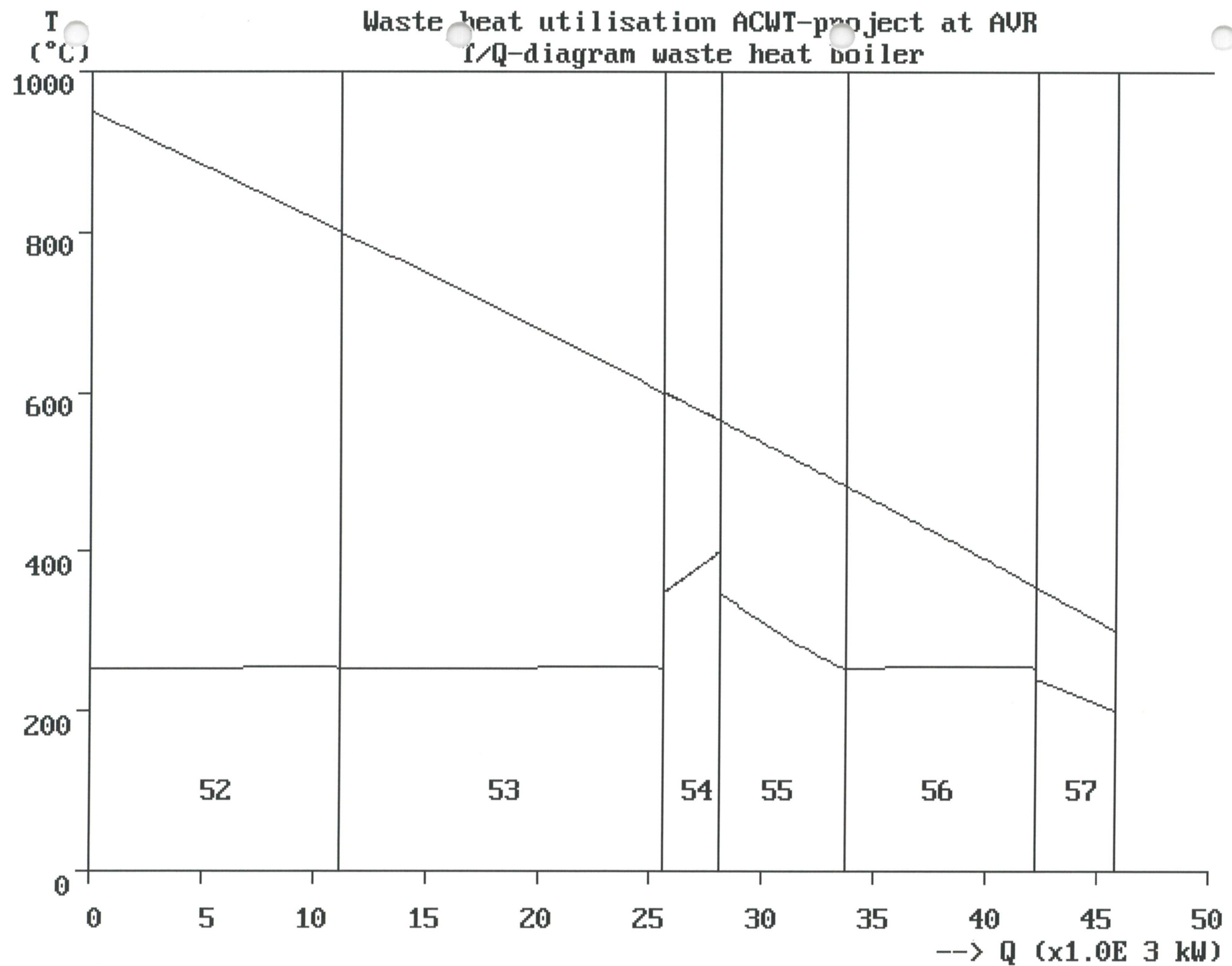
E-mail : M.J.E.Verschoor@mep.tno.nl



Waste heat utilisation ACWT-project at AVR

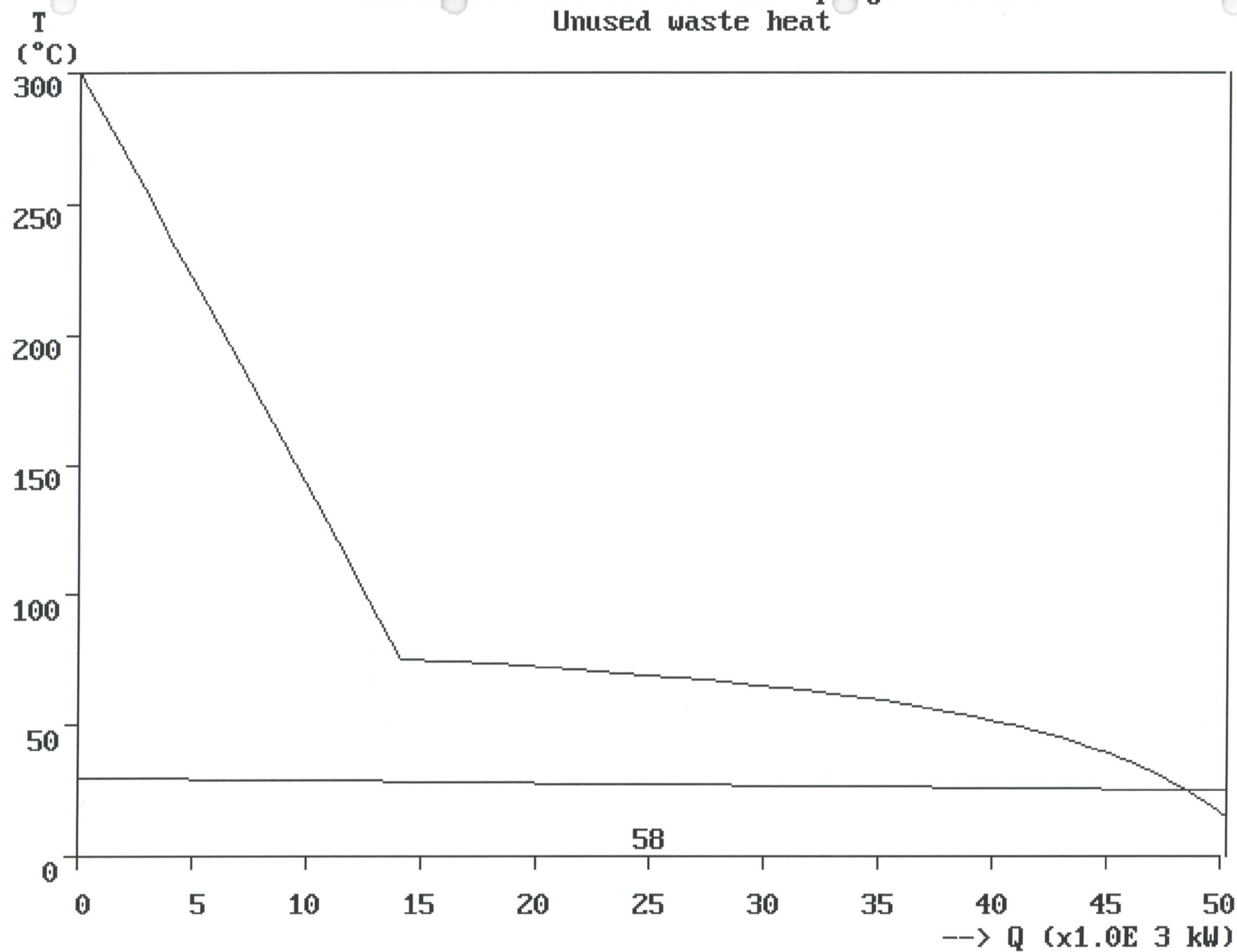


Waste heat utilisation ACWT-project at AVR
T/Q-diagram waste heat boiler



Waste heat utilisation ACWT-project at AVR

Unused waste heat



```
#####
##                                     #                                     ##
## TEMPO: Thermodynamic Energysystems, Massflowcalculation for POverprocesses Rel. 3.21 # Page 6 ##
##                                     #                                     ##
## Waste heat utilisation ACWT-project at AVR                                     # 05/11/96 ##
##                                     #                                     ##
#####
```

SYSTEM EFFICIENCIES, POWER INPUT AND OUTPUT

=====

	NO	APPARATUS	TYPE	ENERGY [kW]	TOTALS [kW]	EXERGY [kW]	TOTALS [kW]
DELIVERED GROSS POWER	1	GENERATOR		13927.50	13927.50	13927.50	13927.50
AUX. POWER CONSUMPTION	2 6 102	Cond.pump FW-pump CW-pump	8 8 8	12.72 118.17 250.80	381.69	12.72 118.17 250.80	381.69
DELIVERED NET POWER					13545.80		13545.80

5. Details Kosten Baten berekening AVR

van: J.O.

Datum: 13-11-96

BEREKENING ENERGIE: KOSTEN-OPBRENGSTEN

UITGANGSPUNTEN

Investeringsen

Turbine, 50 t/h, 1 5Mw	fl.	20000000
Ketel, 50 t/h	fl.	25000000

La 18 ton/h.

Beschikbaarheid

Turbine	0.87
Ketel	0.87

Bediening

Turbine man per ploeg	0.5
Ketel man per ploeg	0.5

Onderhoud

Turbine % van de investering	1.5
Ketel % van de investering	5

Eigen verbruik centrale

HD stoom in kT/a	110
LD stoom in kT/a	250
Electriciteit in MWh/a	32000

Productie gegevens

Totale stoomproductie in kT/a	3289
Omzetverhouding stoom t /MWh	4
Opbrengst per MWh	fl. 75
Turbine doorzet t/h	50
Keteldoorzet t/h	50

Rente	0.07 ✓
looptijd	15 ✓

KOSTEN PER TON STOOM

Investeringsen

turbine	2195892	5.84
ketel	2744866	7.29

Bediening

turbine	350000	0.93
ketel	350000	0.93

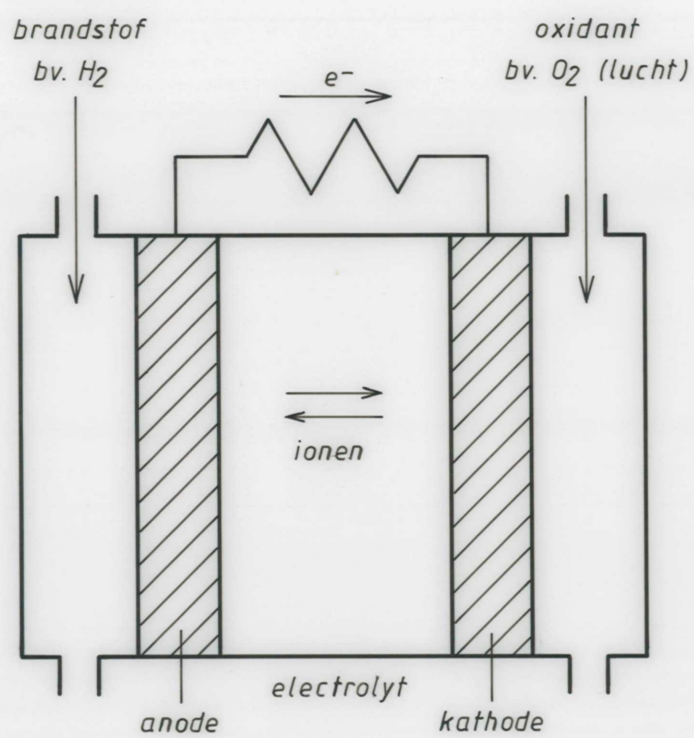
Onderhoud

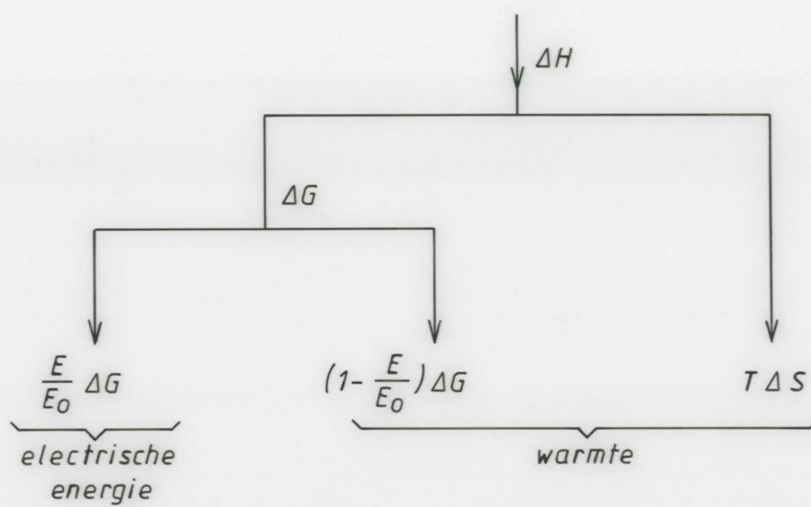
turbine	0.80
ketel	3.32

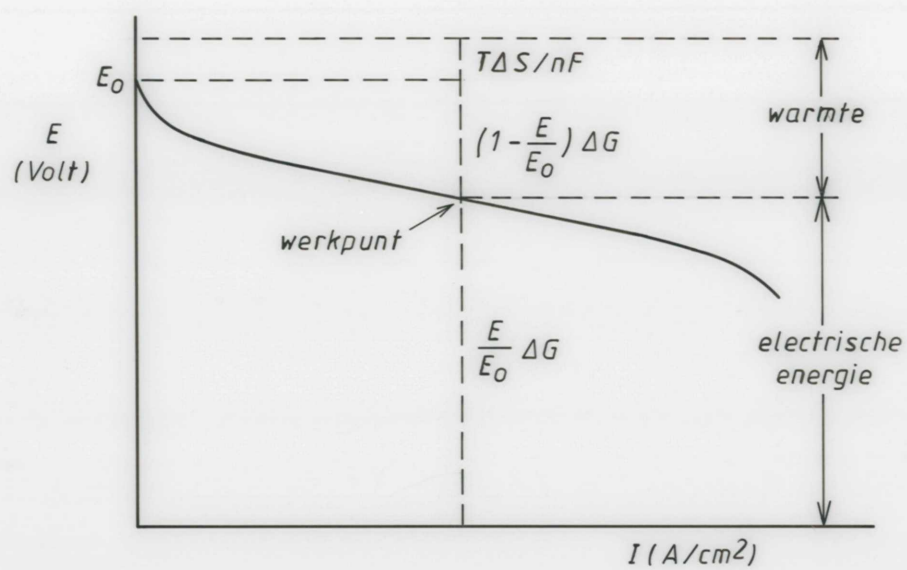
Proceskosten

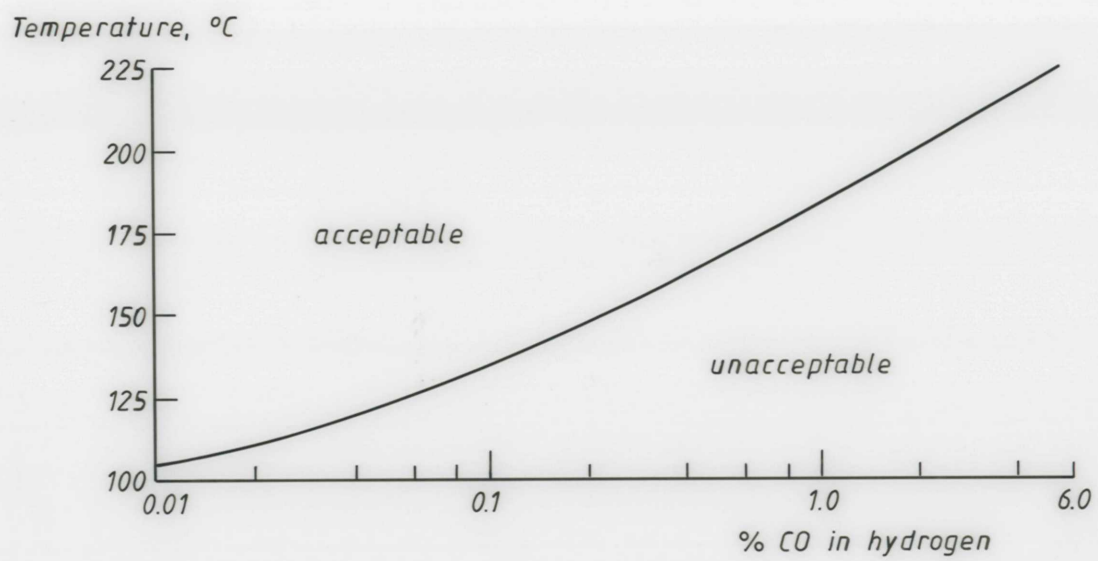
HD stoom (27 bar)	0.63
LD stoom (2.5 bar)	0.71
Electriciteit	0.73

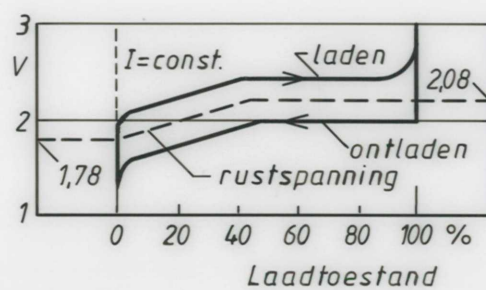
Totaal	21.18
---------------	--------------











70% 8

