

IUTA e. V.
Name der Forschungsstelle(n)

11755 N / III
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.10.1998 bis 30.09.2000
Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum: 01.10.1998 bis 30.09.2000

Forschungsthema: Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter
Gleichstrom- /Gegenstromführung zur thermischen Nutzung von
Biobrennstoffen

Forschungsstelle: Institut für Umwelttechnologie und Umweltanalytik e. V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg Rheinhausen
Dipl.-Ing. Wolfram Senger

Duisburg, 01.02.2001
Ort, Datum


Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse

- | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| | ja | zum Teil | nein | |
| 1. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2. Die Bedeutung der Ergebnisse ist folgendermaßen einzuschätzen : | hoch | mittel | gering | z.Zt. nicht absehbar |
| • wissenschaftlich-technischer Nutzen | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • wirtschaftlicher Nutzen für kmU | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3. Die Ergebnisse liefern einen innovativen Beitrag | | | | |
| • zu einem neuen Produkt | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| • zur Weiterentwicklung eines Produkts | <input type="checkbox"/> | | | |
| • zu einem neuen Verfahren | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| • zur Weiterentwicklung eines Verfahrens | <input type="checkbox"/> | | | |
| 4. Eine industrielle Anwendung der Ergebnisse ist realisiert | ja | demnächst | nein | z.Zt. nicht absehbar |
| | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Eine weiterführende FuE kann in < 3 Jahren zur Innovation (z.B. Pilotanwendung) führen | ja | vielleicht | nein | z.Zt. nicht absehbar |
| | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten gemäß Anlage 1 | | | | |
| 7. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen gemäß Anlage 2 | | | | |
| | ja | demnächst | nein | |
| 8. Die Ergebnisse wurden in einer der entsprechend Abschnitt 3.6 des AiF-Leitfadens zulässigen Formen veröffentlicht | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Duisburg, 08.02.2001
Ort, Datum

Duisburg, 08.02.2001
Ort, Datum

der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)
- Erstzuwendungsempfänger -

oder

Unterschrift mit Stempelabdruck

des Leiters der Forschungsstelle (FSt)
- Letztzuwendungsempfänger -

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten
(Anlage 1 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Fachgebiete	Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Rohstoffe		
Werkstoffe, Materialien		
Chemie		
Verfahrenstechnik	Hauptsächliche Nutzung	
Lebensmitteltechnik, Bio-, Gentechnik		
Mikrobiologie, Hygiene		
Umwelttechnik	Hauptsächliche Nutzung	
Konstruktion		
Produktion		
Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik		
Meß-, Regel-, Automatisierungstechnik		Nutzung auch möglich
Informations- und Kommunikationstechnik		
Betriebswirtschaft, Organisation		

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen
 (Anlage 2 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Wirtschaftszweige	Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Kohlenbergbau und Torfgewinnung		
Ernährungsgewerbe		
Textil- und Bekleidungsindustrie		
Ledergewerbe		
Holzgewerbe	Hauptsächliche Nutzung	
Papier-, Verlags- und Druckgewerbe		Nutzung auch möglich
Kokerei, Mineralölverarbeitung, Spalt- und Brutstoffe		
Chemische Industrie		
Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren		
Glasgewerbe, Keramik, Verar- beitung von Steinen und Erden		
Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen		
Maschinenbau	Hauptsächliche Nutzung	
Büromaschinen, Datenverarbei- tungsgeräte, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik		
Fahrzeugbau		
Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte u.sonstige Erzeugnisse		
Energie- und Wasserversorgung	Hauptsächliche Nutzung	
Baugewerbe		
Landverkehr, Transport		
Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen		

Dokumentationsblatt

IUTA e. V.

AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

11755 N / III

AiF- Vorhaben-Nr. / GAG

Wirtschaftszweig (WZ)

01.10.1998 bis 30.09.2000

Bewilligungszeitraum

Aktenzeichen der MV

586.950,00 DM

Gesamtzufwendung

Forschungsstelle(n) :

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.
Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg

Forschungsthema :

Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom-
/Gegenstromführung zur thermischen Nutzung von Biobrennstoffen

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

Um den Energieinhalt anfallender Biobrennstoffe technisch und wirtschaftlich optimal zu nutzen, werden dezentrale Anlagen benötigt, die eine energetisch optimale und emissionsarme thermische Verwertung garantieren. Für die Realisierung eines solchen Konzeptes stehen die Verbrennungstechnik und die Vergasungstechnik zur Verfügung. Bei der thermischen Verwertung des homogenen Brennstoffes Holz besitzt die Vergasungstechnik gegenüber der Verbrennung prinzipielle Vorteile, da aus dem produzierten Schwachgas mit einem Gasmotor oder einer Gasturbine direkt Strom erzeugt werden kann. Deshalb ist dieses Forschungsvorhaben auf diesen Fall ausgerichtet. Ausgewählt wurde ein Kombi-Vergaser bestehend aus einem Gegen- und einem Gleichstromvergaser.

Für die Auslegung und Konstruktion der Vergasungsanlage und seiner Komponenten wurden in erster Linie die Ergebnisse mathematischer Berechnungen, thermodynamischer Gleichgewichtsbetrachtungen und Stoffbilanzen herangezogen. Auf der Grundlage dieser Berechnungen erfolgte die detaillierte Konstruktion sowie die Auslegung aller benötigten Aggregate.

In einem ersten Schritt wurde der Gegenstromreaktor des Kombi-Vergasers aufgebaut und getestet. Die Erfahrungen aus diesen Versuchen waren in zweierlei Hinsicht wertvoll, einmal weil sich in der realisierten Anlage die Erwartungswerte bezüglich der Schwachgaszusammensetzung einstellen und zum anderen weil das Auslegungsmodell bestätigt wurde. Besonders deutlich zeigte sich während dieser Versuche das Problem des Kondensatanfalls. Deshalb wurde beim Bau der Kombi-Vergaseranlage zusätzlich ein Zyklonabscheider in die Gasreinigungsstrecke integriert.

Die Inbetriebnahme des kombinierten Gleichstrom-/ Gegenstromvergaser verlangt die Abstimmung des Anfahrverhaltens der beiden Reaktorkomponenten. Neben dem Ziel eines stabilen stationären Betriebsverhaltens ist das Erreichen eines optimalen Betriebszustandes eine Herausforderung an die Prozessführung. Das dazu notwendige Expertenwissen konnte während der durchgeführten Versuchsfahrten ständig verbessert und die Anlagentechnik kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Ein wesentliches Ergebnis ist die Realisierung einer exakten Abstimmung der Verweilzeit in den Reaktoren und die Zufuhr des Vergasungsmittels. Die Reproduzierbarkeit dieser Anpassung konnte in den fortlaufenden Versuchen bestätigt werden.

Das Ziel, mit dem Kombi-Vergaser ein Brenngas für die direkte motorische Nutzung zu erzeugen, das nicht aufwendig aufbereitet werden muss, wurde weitgehend erreicht. Allerdings müssen hinsichtlich der Standzeit und der Betriebssicherheit noch weitere Anstrengungen unternommen werden. Daneben besteht noch Potential in der Steigerung des Heizwertes des Schwachgases und der Leistung der Anlage.

Dokumentationsblatt

IUTA e. V.

AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

11755 N / III

AiF- Vorhaben-Nr. / GAG

Wirtschaftszweig (WZ)

01.10.1998 bis 30.09.2000

Bewilligungszeitraum

Aktenzeichen der MV

586.950,00 DM

Gesamtzuwendung

Forschungsstelle(n) :

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.

Bliersheimer Straße 60

47229 Duisburg

Forschungsthema :

Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom-/Gegenstromführung zur thermischen Nutzung von Biobrennstoffen

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

Um den Energieinhalt anfallender Biobrennstoffe technisch und wirtschaftlich optimal zu nutzen, werden dezentrale Anlagen benötigt, die eine energetisch optimale und emissionsarme thermische Verwertung garantieren. Für die Realisierung eines solchen Konzeptes stehen die Verbrennungstechnik und die Vergasungstechnik zur Verfügung. Bei der thermischen Verwertung des homogenen Brennstoffes Holz besitzt die Vergasungstechnik gegenüber der Verbrennung prinzipielle Vorteile, da aus dem produzierten Schwachgas mit einem Gasmotor oder einer Gasturbine direkt Strom erzeugt werden kann. Deshalb ist dieses Forschungsvorhaben auf diesen Fall ausgerichtet. Ausgewählt wurde ein Kombi-Vergaser bestehend aus einem Gegen- und einem Gleichstromvergaser.

Für die Auslegung und Konstruktion der Vergasungsanlage und seiner Komponenten wurden in erster Linie die Ergebnisse mathematischer Berechnungen, thermodynamischer Gleichgewichtsbetrachtungen und Stoffbilanzen herangezogen. Auf der Grundlage dieser Berechnungen erfolgte die detaillierte Konstruktion sowie die Auslegung aller benötigten Aggregate.

In einem ersten Schritt wurde der Gegenstromreaktor des Kombi-Vergasers aufgebaut und getestet. Die Erfahrungen aus diesen Versuchen waren in zweierlei Hinsicht wertvoll, einmal weil sich in der realisierten Anlage die Erwartungswerte bezüglich der Schwachgaszusammensetzung einstellten und zum anderen weil das Auslegungsmodell bestätigt wurde. Besonders deutlich zeigte sich während dieser Versuche das Problem des Kondensatanfalls. Deshalb wurde beim Bau der Kombi-Vergaseranlage zusätzlich ein Zyklonabscheider in die Gasreinigungsstrecke integriert.

Die Inbetriebnahme des kombinierten Gleichstrom-/ Gegenstromvergaser verlangt die Abstimmung des Anfahrverhaltens der beiden Reaktorkomponenten. Neben dem Ziel eines stabilen stationären Betriebsverhaltens ist das Erreichen eines optimalen Betriebszustandes eine Herausforderung an die Prozessführung. Das dazu notwendige Expertenwissen konnte während der durchgeführten Versuchsfahrten ständig verbessert und die Anlagentechnik kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Ein wesentliches Ergebnis ist die Realisierung einer exakten Abstimmung der Verweilzeit in den Reaktoren und die Zufuhr des Vergasungsmittels. Die Reproduzierbarkeit dieser Anpassung konnte in den fortlaufenden Versuchen bestätigt werden.

Das Ziel, mit dem Kombi-Vergaser ein Brenngas für die direkte motorische Nutzung zu erzeugen, das nicht aufwendig aufbereitet werden muss, wurde weitgehend erreicht. Allerdings müssen hinsichtlich der Standzeit und der Betriebssicherheit noch weitere Anstrengungen unternommen werden. Daneben besteht noch Potential in der Steigerung des Heizwertes des Schwachgases und der Leistung der Anlage.

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	3
2	Zusammenfassung.....	3
3	Wissenschaftliche Problemstellung	5
3.1.	Vergaserbauarten	6
3.1.1	Festbettvergaser	6
3.1.1.4	Gegenstromvergaser	6
3.1.1.2	Gleichstromvergaser	7
3.1.1.3	Querstromvergaser.....	7
3.1.2	Wirbelschichtvergasung.....	7
3.1.2.1	Stationäre Wirbelschichtvergasung	7
3.1.2.2	Zirkulierende Wirbelschichtvergasung	8
3.1.3	Flugstromvergasung.....	9
3.2	Anforderungen an das Schwachgas	9
3.3	Einfluss des Vergasungsmittels	10
3.4	Schwachgasnutzung.....	10
3.4.1	Gasmotor.....	10
3.4.2	Gasturbinen.....	11
3.5	Aktuelle Vergasungsprojekte.....	12
4	Forschungsziel	13
4.1	Lösungsweg	14
5	Entwicklung des kombinierten Gleichstrom- / Gegenstromvergasers.....	16
5.1	Konzeption des kombinierten Gleichstrom- / Gegenstromvergasers	16
5.1.1	Die Vorteile des Verfahrens.....	17
5.2	Mathematische Berechnung der Vergasung	18
5.2.1	Chemische Vorgänge bei der Vergasung.....	18
5.2.2	Mathematische Berechnung.....	20
5.2.3	Thermodynamische Betrachtung	21
5.3	Auslegung des Vergasers.....	25
5.3.1	Auslegung der Peripherieaggregate	29
5.4.	Vorversuche in einer Großproben-DTA bei der Vergasung verschiedener Holzfraktionen	32
5.5	Aufbau und Inbetriebnahme des Kombi-Vergasers.....	33

6 Durchgeführte Versuche und Ergebnisse.....	34
6.1 Versuche mit dem Gegenstromvergaser	34
1. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 10.06.1999.....	34
2. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 14.07.1999.....	35
3. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 01.09.1999.....	37
4. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 22.10.1999.....	38
5. Versuchsfahrt Gegenstromvergaser 19.11.1999.....	39
6.1.1 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit dem Gegenstromvergaser	41
6.2 Versuche mit dem Kombi-Vergaser	42
1. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 07.04.2000	42
2. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 17.04.2000	42
3. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 25.04.2000	43
Bild 14: Bestimmung des Schmelzverhaltens nach DIN 51 730.....	44
4. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 19.06.2000	44
5. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 13.08.2000	46
6. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 27.08.2000	46
6.3 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit dem Kombi-Vergaser.....	47
7 Ergebnisse	49
8. Literatur.....	51
9. Anhang.....	54
9.1 MSR-Schema des Kombi-Vergasers	54
9.2 Stückliste und Konstruktionszeichnungen.....	55

1 Forschungsthema

Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- /Gegenstromführung zur thermischen Nutzung von Biobrennstoffen

2 Zusammenfassung

Die verstärkte energetische Nutzung von Biomasse, insbesondere von Holz, ist eine der wesentlichen Säulen, um die Vorgaben und nationalen Verpflichtungen der Klimakonferenz von Kyoto zu erfüllen. Es ist eine der vordringlichen Aufgaben, durch eine Intensivierung der Forschung und Technologie(weiter)entwicklung, die energetische Nutzung des Rohstoffes Holz gegenüber den herkömmlichen, nicht CO₂-neutralen Energieträgern konkurrenzfähig zu gestalten. Dabei sind insbesondere wirtschaftliche Verbesserungen der Anlagentechniken für die Verbrennung und Vergasung von Holz sowie die Verminderungen der Umweltbelastungen beim Einsatz von Gebraucht- und Restholz zu forcieren. Die wesentliche Aufgabe liegt in der Minimierung der Emissionen durch Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßführung und der Rauchgasreinigung. Darüber hinaus sind Fragen zum Verwertungspotential der Rückstände zu klären. In parallelen Schritten sind Verfahren zur Aufbereitung und Behandlung von biogenen Brenn- und Reststoffen zu erproben.

Die energetische Verwertung nachwachsender Rohstoffe nutzt die während des Wachstums durch Photosynthese gebundene Energie, wobei das assimilierte CO₂ wieder freigesetzt wird. Insofern gelten nachwachsende Rohstoffe im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen CO₂-neutral. Beim Einsatz fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung wird das über viele Jahrtausende aus der Atmosphäre entzogene CO₂ spontan freigesetzt. Zusätzlich werden durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe die Ressourcen an fossilen Brennstoffen geschont.

Unter nachwachsenden Rohstoffen wird ein breites Spektrum von Pflanzenarten, aber auch biogenen Reststoffen und Althölzern verstanden. Den mengenmäßig größten Stoffstrom der biogenen Brennstoffe stellen in Deutschland auf absehbare Zeit die Althölzer. In den skandinavischen Ländern und in den osteuropäischen Ländern stellen Holz und Holzabfälle eine für die Zukunft wichtige Energiequelle dar. In verschiedenen Studien und Erhebungen der letzten Jahre wurde das Alt- und Restholzaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland mit 4 bis 11 Millionen Tonnen pro Jahr beziffert.

Werden Alt- und Resthölzer bislang vornehmlich in Müllverbrennungsanlagen und Deponien entsorgt, so steht der Entsorgungsweg der Deponierung aufgrund der Vorgaben der TA Siedlungsabfall in absehbarer Zeit nicht mehr zur Verfügung. Daher ist es notwendig, unverzüglich Entsorgungs- oder besser Verwertungsalternativen zu schaffen. Die stoffliche Verwertung von Alt- und Restholz ist aufgrund der begrenzten Aufnahmekapazität des Marktes und der aus dem wachsenden Verbraucherbewusstsein entstehenden Qualitätsanforderungen an diese Werkstoffe begrenzt. Die Verbrennung in konventionellen Müllverbrennungsanlagen kann nicht als sinnvoll angesehen werden. Der Energieinhalt der Hölzer wird in diesen Anlagen nicht optimal genutzt, da Müllverbrennungsanlagen auf eine möglichst emissionsarme Beseitigung heterogener Abfallstoffe ausgelegt sind. Des weiteren

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

treten beim Einsatz von Holz Probleme durch den vergleichsweise hohen Heizwert, bezogen auf den Heizwert heterogen zusammengesetzter Abfälle, auf.

Um den Energieinhalt des anfallenden Holzes technisch und wirtschaftlich optimal zu nutzen, werden dezentrale Anlagen benötigt, die eine energetisch optimale und emissionsarme thermische Verwertung des homogenen Brennstoffes garantieren. Für die Realisierung eines solchen Konzeptes stehen die Verbrennungstechnik und die Vergasungstechnik zur Verfügung. Bei der thermischen Verwertung von Holz besitzt die Vergasungstechnik gegenüber der Verbrennung prinzipielle Vorteile, da aus dem produzierten Schwachgas mit einem Gasmotor oder einer Gasturbine direkt Strom erzeugt werden kann. Der dabei erreichbare Wirkungsgrad ist wesentlich größer als bei einem Dampfkraftprozess (Kau1994).

Aufgrund des relativ niedrigen Heizwertes von Holz im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen sollten lange Transportwege aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten vermieden werden. Daher bietet sich die direkte Verwertung in kleinen und mittleren Unternehmen der Holzver- und bearbeitenden Industrie an. Dazu sind die Anlagen so zu konzipieren, dass ein kontinuierlicher Betrieb ohne zusätzliches Personal gewährleistet werden kann.

Bei Festbettvergäsern treten bislang allerdings Schwierigkeiten bei der direkten Nutzung des entstehenden Schwachgases auf. Das maßgebliche Problem ist der hohe Gehalt an hochmolekularen organischen Verbindungen im Schwachgas.

Ziel dieses Forschungsvorhaben war die Entwicklung eines Vergasungsverfahrens, in dem die Prinzipien der Gegenstrom- und Gleichstromvergasung kombiniert werden sollten. Die Verschaltung muss so erfolgen, dass die jeweiligen Stärken dieser beiden Verfahren genutzt werden können und ein Produktgas erzeugt wird, das für die direkte motorische Nutzung ohne aufwendige Gasreinigung geeignet ist.

Ausgangspunkt für die Auslegung und Konstruktion des Kombi-Vergasers und seiner Anlagenkomponenten waren in erster Linie die Ergebnisse mathematischer Berechnungen, thermodynamischer Gleichgewichtsbetrachtungen und Stoffbilanzen. Auf der Grundlage dieser Berechnungen erfolgte die detaillierte Konstruktion der Vergasungsanlage sowie die Auslegung aller zusätzlich benötigten Aggregate.

In einem ersten Schritt wurde der Gegenstromreaktor des Kombi-Vergasers aufgebaut und an dieser Anlage Versuche durchgeführt. Die Erfahrungen aus diesen Versuchen waren in zweierlei Hinsicht wertvoll, einmal weil sich in der realisierten Anlage die Erwartungswerte bezüglich der Schwachgaszusammensetzung einstellten und zum anderen weil das Auslegungsmodell bestätigt wurde. Andererseits war aus dem Betrieb des Gegenstromvergasers das Problem des Kondensatanfalls aufgrund der Verfahrensführung besonders deutlich geworden. Beim Kombi-Vergaser sollte dieser aufgrund der dort vorliegenden thermodynamischen Zustände geringer ausfallen, dafür sollte sich aber ein erhöhter Staubgehalt ergeben. Aus diesem Grund wurde in die Gasreinigungsstrecke des Kombi-Vergasers zusätzlich ein Zyklonabscheider integriert.

Die Inbetriebnahme des kombinierten Gleichstrom-/ Gegenstromvergasers verlangt die Abstimmung des Anfahrverhaltens der beiden Reaktorkomponenten. Neben dem Ziel eines stabilen stationären Betriebsverhaltens ist das Erreichen eines optimalen Betriebszustandes eine Herausforderung an die Prozessführung. Das dazu notwendige Expertenwissen konnte während der durchgeführten Versuchsfahrten ständig verbessert und die Anlagentechnik kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Ein wesentliches Ergebnis ist die Realisierung einer exakten Abstimmung der Verweilzeit in den Reaktoren und der Zufuhr des Vergasungsmittels. Die Reproduzierbarkeit dieser Anpassung konnte in den fortlaufenden Versuchen bestätigt werden.

Das Ziel, mit dem Kombi-Vergaser ein Brenngas für die direkte motorische Nutzung zu erzeugen, das nicht aufwendig aufbereitet werden muss, wurde weitgehend erreicht. Allerdings müssen hinsichtlich der Standzeit und der Betriebssicherheit noch weitere Anstrengungen unternommen werden. Daneben besteht noch Potential in der Steigerung des Heizwertes und der Leistung der Anlage.

3 Wissenschaftliche Problemstellung

In verschiedenen Studien und Erhebungen der letzten Jahre wird das Alt- und Restholzaufkommen mit 4 bis 11 Millionen Tonnen pro Jahr beziffert. Die Mengen, die zur Verwertung bzw. zur Entsorgung kommen, werden je nach Untersuchungsgebiet wie folgt dargestellt:

- Müllverbrennungsanlagen und Deponie 43 -82 %,
- stoffliche Verwertung 18 -38 % und
- energetische Verwertung bis 19 %

Alt- und Resthölzer werden bislang vornehmlich in Müllverbrennungsanlagen und Deponien entsorgt. Der Entsorgungsweg der Deponierung steht aber aufgrund der Vorgaben der TA Siedlungsabfall in absehbarer Zeit nicht mehr zur Verfügung. Daher ist es dringend notwendig, Entsorgungs- und Verwertungsalternativen zu schaffen. Die stoffliche Verwertung von Alt- und Restholz ist aufgrund der begrenzten Aufnahmekapazität des Marktes und der aus dem wachsenden Verbraucherbewusstsein entstehenden Qualitätsanforderungen an diese Werkstoffe begrenzt. Die Verbrennung in konventionellen Müllverbrennungsanlagen kann nicht als sinnvoll angesehen werden. Der Energieinhalt der Hölzer wird in diesen Anlagen nur wenig genutzt, da sie auf eine möglichst emissionsarme Beseitigung heterogener Abfallstoffe und nicht auf optimale Nutzung des Energieinhaltes homogener Brennstoffe ausgelegt sind. Holz hat wegen seiner Ressourcen-, Energie- und CO₂-Einspareffekte Vorteile gegenüber fossilen Energieträgern (Weg1994,Weg1995). In der umweltpolitischen Diskussion wird daher der Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Energieerzeugung ein immer wichtigeres Thema.

Bei der thermischen Verwertung von Alt- und Resthölzern besitzt die Vergasungstechnik gegenüber der Verbrennung prinzipielle Vorteile, da aus dem produzierten Schwachgas mit einem Gasmotor oder einer Gasturbine direkt Strom erzeugt werden kann. Der dabei erreichbare Wirkungsgrad ist wesentlich größer als bei einem Dampfkraftprozeß (Kau1994). Bei Festbettvergasern treten bislang allerdings Schwierigkeiten bei der direkten Nutzung des entstehenden Schwachgases auf. Das maßgebliche Problem ist der hohe Gehalt an kondensierbaren Komponenten im Schwachgas.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Verfahren vorgeschlagen und entwickelt, das die Prinzipien der Gegenstrom- und Gleichstromvergasung verbindet. Die Verschaltung erfolgte so, dass die jeweiligen Stärken der einzelnen Vergasungsverfahren genutzt werden und ein von kondensierbaren Bestandteilen freies Produktgas erzeugt wird.

3.1. Vergaserbauarten

Die verschiedenen Vergaserbauarten können in die Hauptgruppen Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser eingeteilt werden. Das Kennzeichen der Vergasung ist die unterstöchiometrische Verbrennung bei einem Luftverhältnis von $\lambda \approx 0,3$, wodurch ein Produktgas mit einem hohen Brennwert entsteht. Je nach eingesetztem Vergasungsmittel, z. B. Luft, Wasserdampf oder Sauerstoff, kann der Heizwert des Gases entsprechend beeinflusst werden.

3.1.1 Festbettvergaser

Die Festbettvergaser werden nach der Brennstoff- und Vergasungsmittelführung eingeteilt. Im wesentlichen kann zwischen Gegenstrom-, Gleichstrom- und Querstromvergäsern unterschieden werden. Praktische Bedeutung für die thermische Verwertung fester Brennstoffe haben bislang jedoch nur die Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung und die Gegenstromvergaser mit aufsteigender Vergasung erlangt (SSE1998).

3.1.1.4 Gegenstromvergaser

Beim Gegenstromvergaser (Bild 1) mit aufsteigender Vergasung wandert der Brennstoff dem Vergasungsmittel entgegen. Anlagen dieser Bauart können ein bezüglich der Stückigkeit breites Brennstoffspektrum verarbeiten, insbesondere auch feinkörniges Material. Das Brennstoffbett wirkt aufgrund der Strömungsrichtung des Gases als Filter, wodurch der Austrag von kleinen Feststoffpartikeln, die sich vor allem durch die Volumenreduzierung im unteren Bereich des Vergasers bilden, verhindert wird. Das Scale-up bereitet normalerweise keine Probleme, da das Vergasungsmittel unter dem Rost in den Reaktor geführt wird und somit die gesamte Durchtrittsfläche als Oxidationszone dient. Da das Schwachgas am Kopf des Vergasers abgezogen wird, werden langkettige Kohlenwasserstoffe (Teer), die in der Pyrolysezone entstehen, mit dem Gasstrom aus dem Reaktor abgezogen. Bei diesem Vergasertyp entsteht somit ein Schwachgas mit hohem Teer- und geringem Partikelgehalt.

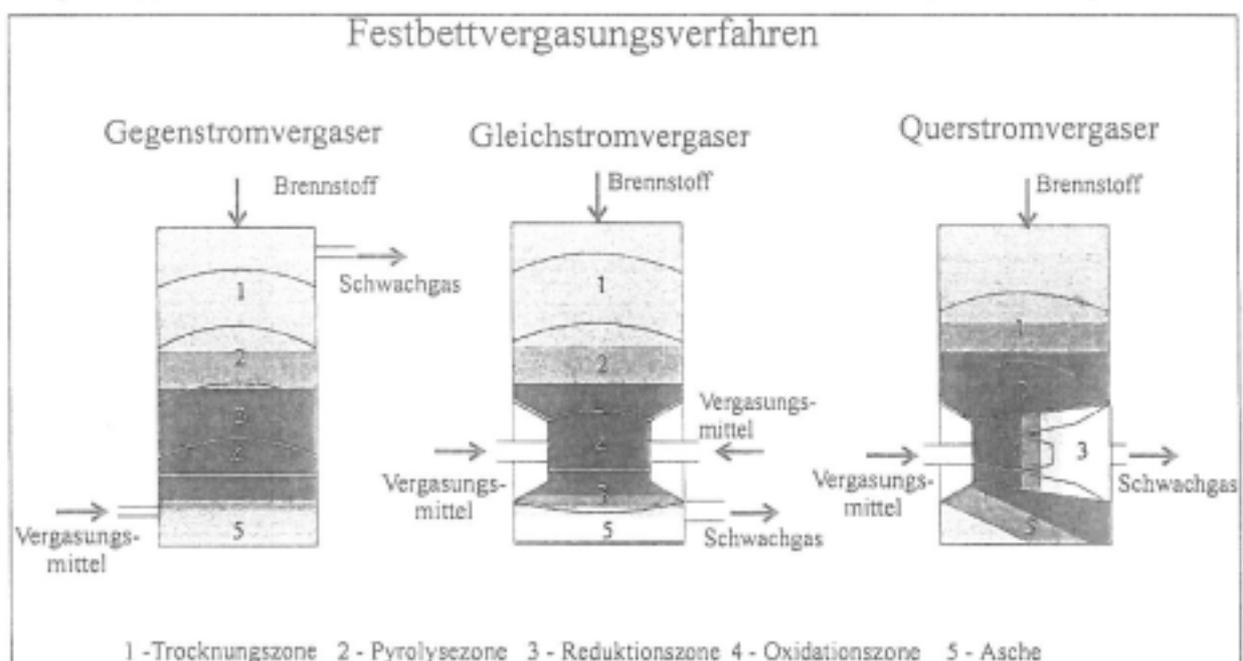


Bild 1 Schematische Darstellung verschiedener Vergassungsverfahren.

3.1.1.2 Gleichstromvergaser

Beim Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung fließen der Brennstoff und das Vergasungsmittel von oben nach unten. Im Bereich der Vergasungsmittelzuführung, zumeist im unteren Teil des Reaktors oberhalb der Einschnürung, bildet sich die Oxidationszone aus (Bild 1). Das in der Trocknungs- und Pyrolysezone gebildete Gas aus Wasserdampf und Pyrolyseprodukten strömt durch die heiße Zone im Koksbed, wodurch z. T. schwerflüchtige Verbindungen in kleinere Moleküle zerlegt werden. Dadurch wird der Heizwert des Gases erhöht und die Gasaufbereitung erleichtert. Anlagen dieser Bauart sind im wesentlichen nur für stückige Materialien geeignet. Die Gefahr der Brücken- und Kanalbildung im Brennstoffschacht wird durch schlechte Fließeigenschaften von Brennstoffen mit einem breiten Stückigkeitsspektrum und durch kalte Stellen hervorgerufen. Beim Scale-up dieser Vergaser treten zumeist Probleme aufgrund der unzureichenden Verteilung der Vergasungsluft auf. Das Schwachgas dieses Vergasertyps ist durch einen hohen Partikelgehalt und einem relativ niedrigen Gehalt an langkettigen Kohlenwasserstoffen gekennzeichnet.

3.1.1.3 Querstromvergaser

Querstromvergaser wurden speziell für den Antrieb von Fahrzeugen entwickelt und zeichnen sich durch schnelle Betriebsbereitschaft sowie rasche Anpassung an Lastwechsel aus. Durch die kurze Verweilzeit der Gase im Reaktor kommt es jedoch zu einer unvollständigen Gleichgewichtseinstellung der Boudouard-Reaktion und somit zu einer geringen Ausbeute an Kohlenmonoxid. Da außerdem die Schwelprodukte die heiße Oxidationszone nicht mehr passieren, erfolgt auch die Spaltung langkettiger Kohlenwasserstoffe nur in geringem Maße (Tid1994). Zu erwarten ist schließlich ein hoher Kohlenstoffgehalt der Asche und ein Schwachgas mit hohem Teer- und Partikelgehalt.

3.1.2 Wirbelschichtvergasung

Die Wirbelschichtvergasung nutzt die Vorteile der guten Mischungseigenschaften und der hohen Reaktionsgeschwindigkeiten bei der Gas-Feststoffvermischung. Als Trägermaterial für die Fluidisierung des Brennstoffes und als Wärmeträger wird Sand oder Dolomit eingesetzt, wobei letzterer die Teercrackung im Wirbelbett unterstützt. Die Wirbelschichtvergasung eignet sich sowohl für den Einsatz von Hackschnitzeln bzw. Spänen als auch staubförmigen Materialien.

Das wichtigste Element der Wirbelschichtfeuerung ist der Düsenboden. Oberhalb des Düsenbodens befindet sich die Schüttung, welche ein Gemisch aus dem Bettmaterial, dem Brennstoff und der Asche darstellt. In der Schüttung wird in unmittelbarer Nähe des Düsenbodens der Brennstoff zugeführt, welcher sich intensiv mit dem Bettmaterial vermischt, erwärmt, trocknet und durch den abrasiven Effekt des Trägermaterials weiter zerkleinert wird. Durch das mit hoher Geschwindigkeit durch den Düsenboden zugeführte Vergasungsmittel werden die Feststoffpartikel der Schüttung mitgerissen.

Bei der Wirbelschichtvergasung wird im wesentlichen zwischen der stationären und der zirkulierenden Wirbelschichtvergasung unterschieden.

3.1.2.1 Stationäre Wirbelschichtvergasung

Die stationäre Wirbelschicht (Bild 2) zeigt eine ortsfeste Lage und eine konstante Dicke des Bettes. Bleibt die Vergasungsmittelgeschwindigkeit innerhalb der Grenzen einer stationären Wirbelschicht, d. h. zwischen dem Lockerungspunkt und der Austragsgrenzgeschwindigkeit, dehnt sich die Schüttung einer Wirbelschicht bis zur Betriebsdicke aus und kann dann stationär betrieben werden. Es werden kaum grobe Feststoffpartikel mit dem Schwachgas

ausgetragen. Stationäre Wirbelschichtvergaser weisen im Vergleich zu zirkulierenden Wirbelschichtvergasern niedrigere Investitions- und Betriebskosten auf. Sie eignen sich vor allem für Brennstoffe mit begrenztem Wassergehalt, niedrigem Aschegehalt und hohem Ascheschmelzpunkt. Biobrennstoffe weisen jedoch gerade gegensätzliche Eigenschaften auf. Ein immer wieder auftretendes Problem ist deshalb die Verschlackung des Düsenbodens, was zu einer drastischen Verschlechterung der Vergasung und zu Problemen bei der automatischen Ascheaustragung führt. Der Teergehalt im Schwachgas einer stationären Wirbelschichtvergasung liegt in der Regel zwischen dem einer Gleichstrom- und einer Gegenstromvergasung (Hasl994).

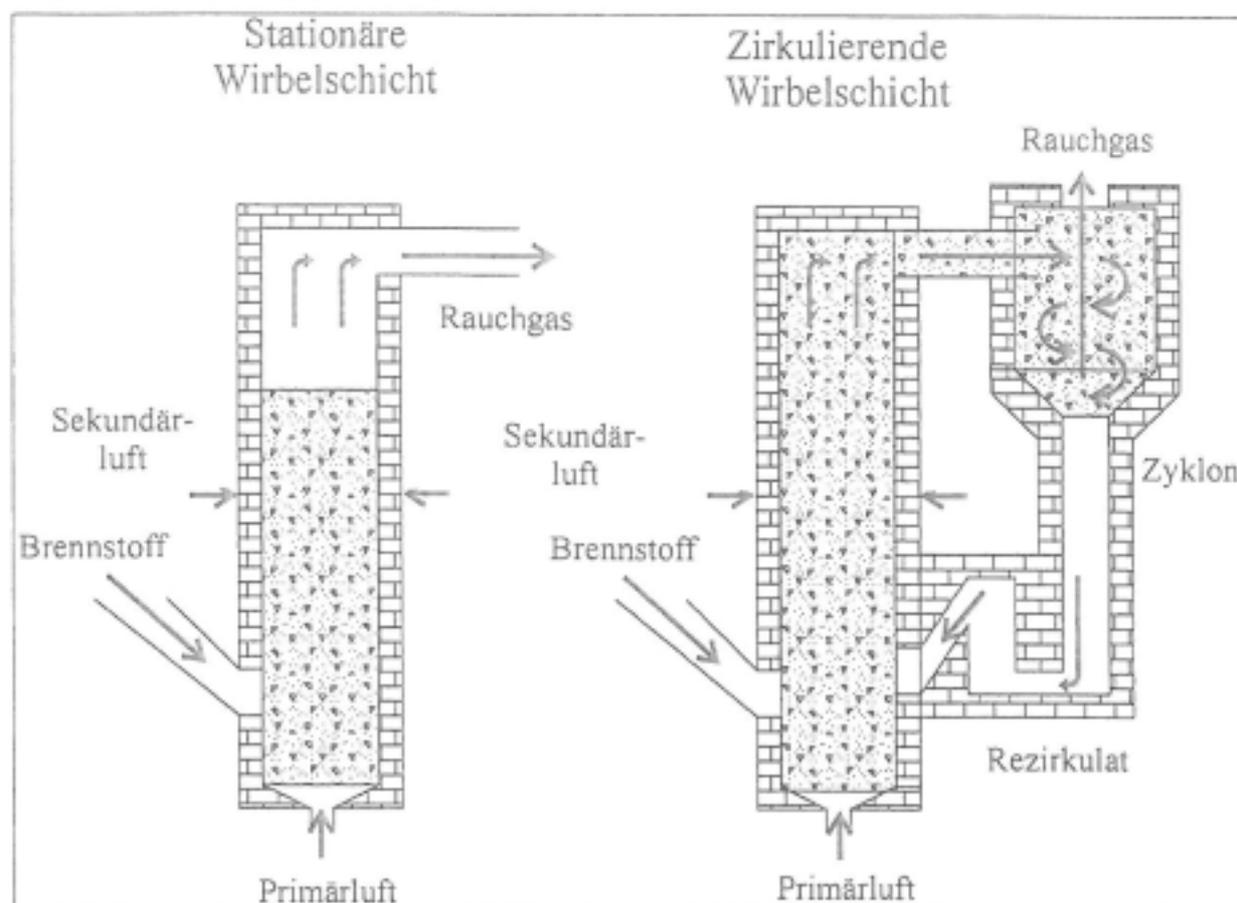


Bild 2 Schematische Darstellung der stationären und zirkulierenden Wirbelschicht

3.1.2.2 Zirkulierende Wirbelschichtvergasung

Bei der zirkulierende Wirbelschicht (ZWS) tritt demgegenüber eine Verschlackung des Düsenbodens sowie der übrigen Reaktorteile zumeist nicht auf. Bei der ZWS-Vergasung wird die Austragsgrenzgeschwindigkeit überschritten und somit das gesamte Reaktorvolumen genutzt (Bild 2). Durch die hohen Geschwindigkeiten im Reaktor werden Teile des Bettmaterials und der Reststoffe mit dem Schwachgas aus dem Reaktor ausgetragen, über einen Zyklon abgeschieden, aufbereitet und dem Reaktor erneut reststofffrei zugeführt. Der Staubanteil im Schwachgas ist wesentlich höher als bei der stationären Wirbelschicht. Die Stäube sind extrem fein und lassen sich nicht mit einem Zyklon abscheiden, so dass der Aufwand für die Gasreinigung steigt. Der Teergehalt im Schwachgas ist aufgrund der höheren Vergasungsrate niedriger als bei einer stationären Wirbelschichtvergasung (Hasl994).

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

3.1.3 Flugstromvergasung

Die Flugstromvergasung setzt staubförmiges Einsatzmaterial, Brennstoffpartikelgröße < 0,1 mm voraus. Dieses wird mittels eines Inertgases fluidisiert. Durch den Druck des Inertgases wird der Anlagendruck, der zwischen 2 und 35 bar liegen kann, aufgebaut.

Das Inertgas-Brennstoff-Gemisch wird einem speziellen Dosierbehälter zugeführt. Aus diesem wird das Brennmaterial in den Brenner des Vergasungsreaktors gegeben. Der Anlagendruck ist vom Einsatzzweck des erzeugten Gases abhängig.

Der eigentliche Vergasungsprozess findet innerhalb eines zylindrischen Reaktionsraumes statt, dessen Mantel durch eine wassergekühlte Rohrwand gebildet wird. Als Vergasungsmittel wird technisch reiner Sauerstoff eingesetzt. Über den am Kopf des Reaktors sitzenden Vergasungsbrenner wird das Einsatzmaterial und der Sauerstoff sowie zusätzliches Brenngas für die Pilotflamme zugeführt. Die organischen Substanzen setzen sich in einer Flammenreaktion um, wobei ein CO- und H₂-reiches Synthesegas entsteht, das frei von langkettigen Kohlenwasserstoffen ist.

Die Reaktionstemperatur wird so eingestellt, dass die mineralischen Bestandteile des Einsatzmaterials aufgeschmolzen werden. Die Schmelze fließt als Schlackefilm an der wassergekühlten Wand des Reaktorraumes nach unten. Flüssige Schlacke und heiße Rohsynthesegase verlassen gemeinsam den Reaktionsraum durch eine zentrale Öffnung im Boden. Dieses Verfahren bietet ein sehr gutes Scale-up-Potential und einen hohen Durchsatz (Lor1994, Tid1994).

3.2 Anforderungen an das Schwachgas

Das bei der Vergasung von Biobrennstoffen (am Beispiel Holz) erzeugte Gas besteht im wesentlichen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf, Methan und Stickstoff. Die typische Zusammensetzung eines Primärgases bei der Holzvergasung ist in Tabelle 1 dargestellt. Als Folge unvollständiger Vergasung enthält das Schwachgas Anteile an langkettigen Kohlenwasserstoffen (Teer) (Büh1994/1).

Gasförmige Komponenten	Konzentration Vol.-%
CO	10-15
H ₂	15-20
CH ₄	3-5
CO ₂	15
N ₂	50

Tabelle 1: Typische Zusammensetzung des Primärgases aus der Holzvergasung (Büh1994/1)

In Tabelle 2 sind die Anforderungen an das Reingas zur motorischen Nutzung und in Tabelle 3 beispielhaft die Rohgaswerte verschiedener Festbettvergaser bzgl. der Partikel- und Teergehalte dargestellt.

	Partikelgehalt mg/Nm ³	Partikelgröße µm	Teergehalt mg/Nm ³	Alkaligehalt mg/Nm ³
Verbrennungsmotor	< 50	< 10	< 100	
Gasturbine	< 30	< 5	< 8	0,24
Methanolsynthese Brennstoffzelle	0,01		100	

Tabelle 2: Verwendungsspezifische Minimalanforderungen an Produktgas (Gra1993, BTG1995)

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Rohgasdaten verschiedener Festbettvergaser			
Hersteller	Bauart	Teergehalt g/m ³	Staubgehalt mg/m ³
Ahlstrom-Vergaser	Gegenstrom	50-100	25-100
Ensofar-Vergaser	Gleichstrom	1	ca. 100
Wamsler-Vergaser	Gleichstrom	ca. 0,8	ca. 500
Umsicht-Vergaser	Zirk. Wirbelschicht	1,5	10.000 – 20.000

Tabelle 3 Rohgasdaten verschiedener Vergaser (Nus1990/1, Bru1994, Büh1994/1, Isi2000)

Zur Spaltung der kondensierbaren Teerverbindungen sind hohe Temperaturen erforderlich, die durch die Zugabe einer größeren Vergasungsmittelmenge, z.B. Luft, in den Vergaser erreicht wird. Zugleich nimmt aber der Stickstoffanteil im Schwachgas zu. Dadurch sinkt bei gleichzeitig höherem Ausbrand der Heizwert des Gases. Um eine optimale Ausbeute an hochwertigem Gas bei zugleich geringen Teermengen zu erhalten, werden Vergaser nach dem Stand der Technik mit einem Luftverhältnis von $\lambda \approx 0,3$ betrieben.

Damit die geforderten Rohgaswerte der Gasmotoren erreicht werden, ist der Einsatz einer zusätzlichen Gasreinigungsanlage notwendig. Die effektivste Gasreinigung erfolgt zur Zeit mit Wäschern, wodurch jedoch die Teerprobleme in das Abwasser verlagert werden.

3.3 Einfluss des Vergasungsmittels

Zur Erzeugung des Schwachgases bei der Vergasung wird dem Brennstoff unterstöchiometrisch ein Vergasungsmittel zugegeben. Dieses Vergasungsmittel kann

- Luft,
- Sauerstoff
- oder Wasserdampf

sein.

In den meisten Fällen wird Luft als Vergasungsmittel eingesetzt, da sie ohne weitere Kosten in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Die Verwendung von reinem Sauerstoff hat den Vorteil, dass kein Stickstoff zusätzlich in den Prozess eingebracht wird. Die Kosten für Sauerstoff als Vergasungsmittel sind allerdings so hoch, dass kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Bei der Verwendung von Wasserdampf als Vergasungsmittel wird ebenfalls der Stickstoffgehalt im Schwachgas auf unter 1 % gesenkt, es ist jedoch die Energie zur Verdampfung zu berücksichtigen.

3.4 Schwachgasnutzung

Das Produktgas wird i. d. R. verbrannt und zur Erzeugung von Heißwasser oder Prozessdampf genutzt. Durch die direkte gasmotorische Nutzung des erzeugten Schwachgases kann im Vergleich zur Verbrennungstechnik bei der Vergasungstechnik ein um 10 % höherer elektrischer Wirkungsgrad erzielt werden (Nus1990/2).

3.4.1 Gasmotor

Zur direkten Nutzung des Produktgases in einem Gasmotor muss das Schwachgas abgekühlt werden, um im Zylinder des Motors eine möglichst große Gasmasse zu erreichen. Der Wirkungsgrad der Motoren liegt im Bereich von 24 – 32 % (Bül1998/2). In der Praxis haben sich dabei Temperaturen von 40 - 60 °C bewährt. Eine Abkühlung des Schwachgases auf Temperaturen um 40 °C ist mit vertretbarem technischen Aufwand zur Zeit wirtschaftlich

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

nicht zu realisieren. Bei einer weniger starken Abkühlung auf z.B. 100 °C lassen sich bereits pro Zylinderfüllung Arbeitsverluste von 9 - 14 % gegenüber der praxisüblichen Fahrweise bei 60 °C abschätzen. Bei einer Abkühlung auf nur 300 °C betragen diese Verluste bereits 34 - 40 %. So hohe Verluste sind auch mit einer Heizwertsteigerung des Schwachgases, durch Erhöhung der nutzbaren Anteile langkettiger Kohlenwasserstoffe, nicht zu kompensieren.

Die bei der Gaskühlung und -reinigung anfallenden Kondensate bestehen zum einen aus wasserunlöslichen Teerbestandteilen sowie Feststoffen und zum anderen aus Wasser, das mit einer Vielzahl löslicher, organischer Substanzen verunreinigt ist. Während der Gasreinigung fallen ca. 200 bis 250 g Kondensat pro kg Brennstoff-Trockenmasse an. Das wässrige Kondensat enthält ca. 2 g Phenol/l mit einem CSB von 100 g/l und überschreitet damit die Grenzwerte für die Einleitung in das kommunale Abwassernetz (KlÖ1986). Trotz einer Vielzahl von Versuchen zur Aufbereitung von Vergaserkondensaten ist eine wirtschaftlich tragbare Lösung noch nicht in Sicht (Kau1994).

Für den Einsatz der Produktgase in einem Gasmotor müssen die Anforderungen bezüglich des Teer- und Staubgehalts aus Tabelle 2 erfüllt sein. Weitere Anforderungen an die Gasqualität für den Motorbetrieb werden durch

- den Heizwert,
- den Luftbedarf und
- die Klopfestigkeit (Methanzahl)

charakterisiert.

Der Heizwert der mit den verschiedenen Verfahren erzeugten Gase liegt zwischen 4000 und 6000 kJ/Nm³ und der stöchiometrische Luftbedarf bei der Verbrennung im Gasmotor zwischen 0,8 - 1,2 m³ Luft/ m³ Gas.

Die in der Methanzahl ausgedrückte Klopfestigkeit des Gases wird überwiegend von der klopfreudigen Gaskomponente H₂ (Methanzahl =0), durch CO (Methanzahl= 73) und durch das klopfhemmende CO₂ bestimmt. Gase aus der Holzvergasung haben i. d. R. eine Methanzahl im Bereich von 60 bis 70 (Nus1990/1).

3.4.2 Gasturbinen

Der Einsatz eines in der Vergasung erzeugten Schwachgases in Gasturbinen ist möglich. Im Gegensatz zur Nutzung in einem Gasmotor sollte in diesem Fall das Gas möglichst nicht abgekühlt werden. Dadurch wird allerdings eine Heißgasreinigung erforderlich. Vorteilhaft im Vergleich zur gasmotorischen Nutzung ist, dass das Problem der Entsorgung der Kondensate entfällt.

Zum Einsatz in einer Gasturbine sollte das Gas wie bei der motorischen Nutzung einen möglichst niedrigen Teer- und Staubgehalt aufweisen. Der zulässige Partikelgehalt beträgt je nach Korngrößenverteilung, Turbinenkonstruktion und Betriebsbedingungen 0,1 bis 120 mg/Nm³ (S-L1985). Über den zulässigen Teergehalt liegen keine belastbaren Angaben vor.

Die kritische Größe für den Einsatz in Gasturbinen ist der Gehalt gasförmiger Alkalimetall-Verbindungen, die bei der Abkühlung in der Turbine kondensieren und die Schaufeln beschädigen. Für die Abscheidung in einer Gasreinigung muss das Rohgas unter 600 °C abgekühlt werden (Büh1994/2). Für die kommerzielle Anwendung von Schwachgasen zur Stromerzeugung ist entscheidend, ob es gelingt, die Heißgasreinigung kostengünstig zu gestalten (Kau1994).

3.5 Aktuelle Vergasungsprojekte

Bei den aktuellen Projekten zum Aufbau und Betrieb von Vergasungsanlagen werden Festbettvergaser, kombinierte Vergasungsverfahren und zirkulierende Wirbelschichtvergaser eingesetzt.

HTV-Vergaser

Konstruktionsprinzip: Gleichstromvergaser

Ursprünglich war der Hochtemperatur-Juch-Vergaser (HTV) als Gleichstromvergaser mit verstell- und regelbarem Gegenkegel ausgerüstet. Gemäß Herstellerangaben eignet sich dieser Vergaser für Holz und Altholz in Form von Hackschnitzeln bis zu groben Stücken mit einer Kantenlänge von ca. 10 cm. Der Wassergehalt sollte maximal bei 30 % liegen, um die Kondensatmenge zu limitieren.

In den Jahren 1989 bis 1992 wurden Versuche an einem umgebauten Imbert-Vergaser durchgeführt. Seit Anfang 1994 ist in Kestenholz ein Vergaser zu Versuchszwecken in Betrieb. Der neue Vergaser war bis Ende 1994 ca. 300 Betriebsstunden und mit einer geänderten Kernzone ca. 150 Betriebsstunden im Einsatz. Eine Gasreinigung und ein Motor sind installiert. Bis 1996 wurden umfangreiche Versuche mit der Anlage durchgeführt. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde in Espenhain eine Anlage mit 3 Linien geplant. Jede Linie sollte aus einem Juch-Vergaser mit 4 MW Leistung, einer Gasaufbereitung und einem BHKW bestehen. Die Inbetriebnahme der ersten Linie erfolgte Mitte 1997.

In Siebenlehn ist der Aufbau einer Anlage mit einer Leistung von 10 MW_{th} abgeschlossen, und eine Anlage in Elsterwerda mit 2*10 MW_{th} ist in der Planung.

AHT-Vergaser

Konstruktionsprinzip: Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung (modifiziertes Doppelfeuerverfahren, ursprünglich KHD-Entwicklung, kombiniertes Gleichstrom-/Gegenstrom-Verfahren)

Bei KHD konnten mit dem Vergasertyp und mit einem Gasmotor jahrelang Erfahrungen gesammelt werden. Eine Versuchsanlage mit 50 kW_{el} Waukesha-Motor ist in Bergisch-Gladbach in Betrieb. Außerdem laufen zwei Anlagen mit Gasmotor in den USA und eine Anlage seit 1995 mit Gasmotor (135 kW_{el}) in Neumarkt.

In Eckernförde wurde eine Anlage mit 360 kW_{th} installiert, eine Anlage in Halle-Lochau mit einer Leistung von 1,5 MW_{th} ist in der Planung.

Wamsler-Thermo-Prozessor mit nachgeschalteter Wirbelschichtvergasung

Konstruktionsprinzip: Gleichstromvergaser mit Kipprost und Nachvergasung in einer Wirbelschicht

Der Brennstoff sollte eine Stückigkeit von ca. 60 mm mit einem Feinkornanteil (<1 mm) von höchstens 20 Gew.-% und einem maximalen Wassergehalt von 50 Gew.-% aufweisen.

Beim Hersteller in München ist eine Testanlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW installiert. Diese Anlage ist seit mehr als 6000 Betriebsstunden im Einsatz. In einer kommerziellen Anlage bei Rosenheim, die mehr als 1000 Betriebsstunden aufweist, wird das entstehende Schwachgas zu Heizzwecken verbrannt. Diese Anlage hat eine Leistung von 1,5 MW_{FWL} und ist seit Anfang 1994 in Betrieb. Am Versuchsreaktor in München sind eine Gasreinigung und ein Gasmotor installiert, die jedoch keine befriedigenden Ergebnisse lieferten (Bru1994).

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Die Firma GekaKonus baut in Grünberg eine Vergasungsanlage mit einer Leistung von $1,5 \text{ MW}_{\text{th}}$. Weitere Entwicklungen an diesem Verfahren werden vom Energieressourcen-Institut (ERI) in Cottbus mit dem Münchener Reaktor durchgeführt (San2000).

Carbo-V Verfahren

Konstruktionsprinzip: Dreistufiger Prozess mit örtlich getrennten Reaktoren zur Trocknung, Pyrolyse und Flugstromvergasung von biogenen Reststoffen

Das Verfahren wird von der Firma UET Freiberg seit 1994 entwickelt und an einer Versuchsanlage mit einer Leistung von 1 MW_{th} erprobt. Der zerkleinerte Brennstoff liegt in einer Stückgröße unter 20 mm vor und wird mit Niedertemperaturwärme vorgetrocknet. Bei der Vergasung von Holz mit Luft als Vergasungsmittel kann mit diesem Verfahren ein Produktgas mit einem Heizwert von 4500 kJ/kg erzeugt werden. Der Restkoks wird in der Flugstromvergasung nachbehandelt und dabei vollständig verbrannt (Schu2000, M-S1999).

Zur Zeit wird in Espenhain eine Anlage mit einer Leistung von $16 \text{ MW}_{\text{th}}$ geplant.

ZWS-Vergasung, Umsicht

Konstruktionsprinzip: Zirkulierende Wirbelschichtvergasung mit katalytischer Gasreinigung

Eine Versuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 400 bis 500 kW wurde 1996 in Oberhausen errichtet. Der Brennstoff sollte eine Körnung von $< 40 \text{ mm}$ aufweisen. Der optimale Wassergehalt beträgt 15% . Mit diesem Anlagenkonzept kann ein Produktgas mit einem Heizwert von ca. 5000 kJ/Nm^3 erzeugt werden. Im Frühjahr 2000 konnte ein 150 h -Versuch mit einem Motor erfolgreich durchgeführt werden. Mehrere Anlagen mit einer Leistung von ca. $5 \text{ MW}_{\text{FWL}}$ sind in der Planung (Isi2000).

Gestufte Reformierung

Konstruktionsprinzip: Zweistufiger Prozess mit örtlich getrennter Pyrolyse- und Reformierungsstufe

Das Verfahren wird zur Zeit bei der Dr. Mühlen GmbH & Co. KG entwickelt. Als Brennstoff kann Holz mit einer Stückigkeit von ca. 40 mm und einem Wassergehalt bis zu 50% eingesetzt werden. Als Vergasungsmittel wird Wasserdampf eingesetzt, wodurch ein Produktgasheizwert von 9 bis 10 MJ/Nm^3 erzielt werden soll. Als Wärmeträger wird ein Inertmaterial (z.B. Kies, Splitt u.a.) eingesetzt. Eine Versuchsanlage mit einer Leistung von 1 MW_{th} soll im Jahr 2001 in Betrieb gehen (Müh2000).

4 Forschungsziel

Die momentan auf dem Markt erhältlichen Vergaser arbeiten vorwiegend entweder nach dem Gleichstrom- oder dem Gegenstromprinzip, wobei jede Vergaserart spezifische Vor- und Nachteile hat. In diesem Forschungsvorhaben sollte ein Vergaser entwickelt werden, der die Vorteile der Gegenstrom- und Gleichstromvergasung verbindet und die Nachteile dieser Verfahren ausschließt. Ziel ist die Bereitstellung eines Produktgases für die direkte motorische Nutzung.

Der neue Vergaser besteht aus zwei Teilreaktoren, die über die Schwachgasleitung und ein Doppelschiebersystem zum Kokstransport miteinander verbunden sind. Die Gegenstromstufe ist als zylindrischer Reaktor gefertigt, an dessen oberem Ende eine Rohrleitung zum Absaugen des entstehenden Produktgases angeflanscht ist. Am unteren Ende des Reaktors ist ein grobmaschiger Rost mit einem Düsenboden installiert. Auf diesem Rost wird der Brennstoff aufgeschichtet. Das Vergasungsmittel durchströmt den Brennstoff von unten nach oben. Als

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Produkt entsteht ein Schwachgas mit hohem Teer- und niedrigem Staubgehalt, das durch das Absaugrohr zum Reaktor der 2. Stufe geführt wird. Die kohlenstoffhaltige „Schlacke“, die durch den Rost fällt, wird in einem Schleusensystem aufgefangen und der zweiten Reaktionszone mit einem weiteren, feinmaschigen Rost zugeleitet. Das Schleusensystem verhindert die Verschleppung des Vergasungsmittels aus dem Gegenstromreaktor.

Der zweite Reaktor ist als Gleichstromreaktor ausgelegt. Um Temperaturen von 800-900 °C und einen vollständigen Ausbrand zu erreichen, wird dem Koks auf dem Feinrost nochmals Vergasungsmittel zugeführt. Das Produktgas aus dem Gegenstromreaktor wird durch die heiße Zone geleitet. Hier werden die kondensierbaren Kohlenwasserstoffe gecrackt und der Restkohlenstoff in der „Schlacke“ vergast. Die durch den zweiten Rost fallende Asche wird am Boden des Reaktors abgezogen und gegebenenfalls, je nach Ausbrand und Korngröße, dem Feinrost wieder zugeleitet.

Vor der Nutzung des Gases in einer Gasturbine oder einem Gasmotor ist der Staub abzuscheiden. Dazu bietet sich z.B. ein Zyklon zur Abscheidung von Grobstaub mit Rückführung auf den Feinrost und eine Heißgasreinigung über Keramikkerzenfilter an. Sollte der abgeschiedene Staub ein zu feines Korngrößenspektrum aufweisen, müsste vor der Rückführung auf den Feinrost eine Kompaktierung vorgesehen werden. Man erhält einen trockenen Reststoff. Eine Abwasseraufbereitung entfällt.

Da für die motorische Nutzung das Schwachgas gekühlt werden muss, kann nach dem Zyklon auch ein Wärmetauscher mit nachgeschaltetem Gewebefilter installiert werden. Die Wärme aus dem Wärmetauscher kann zur Produktion von Wasserdampf genutzt werden, welcher z.B. als Vergasungsmittel eingesetzt werden kann. Die Zusammensetzung der hier anfallenden Schadstoffe muss noch genau untersucht werden. Im weiteren ist noch zu prüfen, ob das Gasrohr zwischen dem Gegen- und dem Gleichströmer von außen beheizt werden muss, um Kondensationseffekte zu verhindern.

Die zweistufige Verfahrensauslegung erlaubt eine variable Temperaturführung an den Rosten und lässt die Art und Menge des Vergasungsmittels frei wählbar. So ist es z.B. möglich, im Gegenströmer die erste Vergasungsstufe mit Luft zu betreiben und in der zweiten Vergasungsstufe, dem Gleichströmer, Sauerstoff einzusetzen. Da in der zweiten Stufe aufgrund der kleineren Dimensionen ein niedrigerer Volumenstrom an Vergasungsmittel erforderlich ist, kann mit geringfügig höheren Kosten eine wesentlich höhere Temperatur erreicht werden. Eine weitere Variationsmöglichkeit besteht beim Verhältnis der Volumenströme an Vergasungsmittel im Gleichströmer und im Gegenströmer. Hierdurch kann die Reststoffqualität verschiedener Einsatzmaterialien optimiert werden.

4.1 Lösungsweg

Das Arbeitsprogramm unterteilte sich in folgende Teilschritte:

1. Dimensionierung/Auslegung

Die Auslegung der Gesamtanlage umfasste die Dimensionierung des Vergasers und die Auslegung der Peripherieaggregate.

2. Abschätzung der entstehenden Schwachgaszusammensetzung

Aus der mittleren Brennstoffzusammensetzung ergab sich die für die Vergasung notwendige Luftmenge und daraus ließ sich die entstehende Schwachgaszusammensetzung berechnen.

3. Vorversuche zur Bestimmung der entstehenden Vergasungsprodukte

Aus Experimenten mit dem Gegenstromreaktor ergaben sich die notwendigen Aussagen zur Schwachgaszusammensetzung bzw. Menge und zum Koksanfall, die die Grundlage der Auslegung des Gleichstromvergasers bilden.

Versuche mit der vorhandenen Großproben-DTA brachten nicht die erwarteten Ergebnisse.

4. Konstruktion des Vergasungsreaktors

Anhand der Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 1. bis 3. wurden der Vergaser und die Peripherieaggregate konzipiert und ausgelegt, die Teilelisten erstellt und Angebote eingeholt.

5. Aufbau und Inbetriebnahme

Die Anlage wurde am IUTA aufgebaut und darauf geachtet, den Aufbau variabel zu halten, um eventuelle Modifikationen ohne großen Aufwand durchführen zu können.

6. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm lieferte genaue Daten zum Temperaturverlauf, zur Gaszusammensetzung, zum Brennstoffdurchsatz, zur Feuerungswärmeleistung und zum Betriebsverhalten der einzelnen Reaktorelemente. Anhand dieser Versuchsergebnisse erfolgte die Bewertung des Vergasers.

7. Modifikation entsprechend der Versuchsergebnisse

Anhand der Versuchsergebnisse aus 6. wird der Vergaser optimiert.

5 Entwicklung des kombinierten Gleichstrom- / Gegenstromvergasers

5.1 Konzeption des kombinierten Gleichstrom- / Gegenstromvergasers

Das erarbeitete Konzept zur kombinierten Gleichstrom- / Gegenstromführung ist im Bild 3 sowie im R+I Schema im Anhang dargestellt.

Der Brennstoff wird über ein Förderband dem Aufgabesystem zugeführt. Als Aufgabesystem wird eine Doppelpendelklappe eingesetzt, die das unkontrollierte Eindringen von Luft verhindern soll. Die Schleusensysteme werden mit Druckluft betätigt.

Der Gegenstromreaktor (Durchmesser 600 mm, Höhe 900 mm) ist aus einem hochwarmfesten Stahl gefertigt, an dessen unteren Ende ein Rost (Rostfläche 0,125 m²) mit einer Rüttleinheit eingebaut wurde. Das Vergasungsmittel wird mittels Druckgebläse über eine Ringleitung und/oder durch die Rüttleinheit dem Reaktor zugeführt. Der Reaktor wird bei einer Temperatur von ca. 750 °C in der Oxidationszone betrieben. Das Produktgas wird am Kopf des Reaktors mit einer Temperatur von ca. 250 °C abgezogen.

Der Gegenstromreaktor ist durch ein Doppelpendelklappensystem vom Gleichstromreaktor getrennt. Durch dieses Doppelpendelklappensystem wird der im Gegenstromreaktor entstehende Koks dem Gleichstromreaktor zugeführt.

Das am Kopf des Gegenstromreaktors abgezogene Produktgas gelangt als Zyklonströmung in den Gleichstromreaktor (Durchmesser 216 mm, Höhe 400 mm), der auch aus hochwarmfestem Stahl gefertigt ist.

Der Gleichstromreaktor ist ebenfalls mit Rost und Rüttler ausgerüstet. Dem „Koks“ wird im Gleichstromreaktor nochmals Vergasungsmittel zugegeben, so dass Temperaturen von 800-900 °C am Feinrost entstehen. Das Produktgas aus dem Gegenströmer wird durch diese heiße Zone geleitet, wobei die kondensierbaren Anteile gecrackt und der Restkohlenstoff im „Koks“ vergast werden.

Nach der Crackzone wird das Schwachgas durch die Schwachgasleitung aus dem Reaktor abgezogen und später einem Gasmotor zugeführt. Während der Versuchsphase war statt des Gasmotors ein Gasbrenner installiert. Die durch den zweiten Rost fallende Asche verlässt durch ein Ascheschleusensystem, welches das Eindringen von Falschluff verhindert, den Reaktor am Boden.

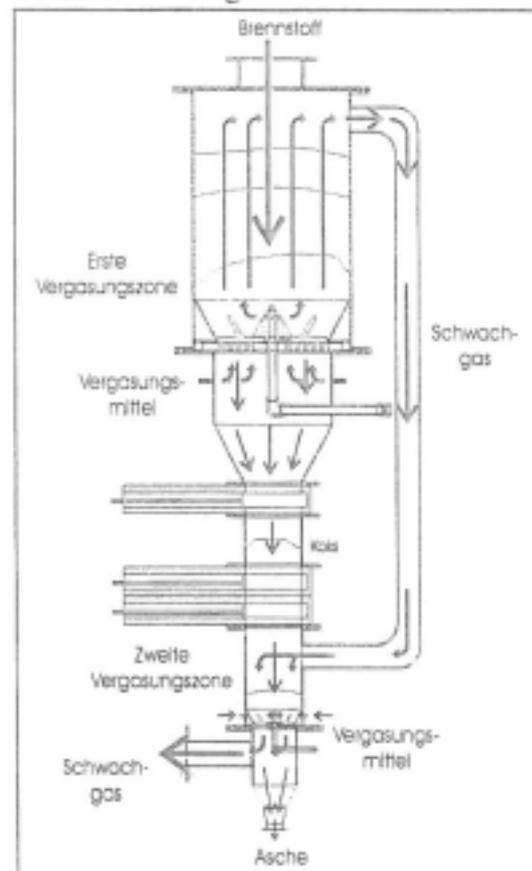


Bild 3: Schema des Kombi-Vergasers

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Um die notwendige Kühlung auf eine Temperatur zwischen 40 - 60 °C für einen Gasmotorbetrieb darstellen zu können, wird das Schwachgas auf ca. 40 °C in einem Wärmeübertrager abgekühlt.

Hinter dem Saugzuggebläse befindet sich der Gasbrenner, der eine emissionsarme Verbrennung der Gase sicherstellt. Dem Gasbrenner ist ein weiterer Wärmeübertrager nachgeschaltet, in dem die Energie aus dem Abgas in Heizwärme umgewandelt werden kann.

Die Anlage wird zentral über eine SPS gesteuert. Zur Erfassung der Meßdaten wurden am Gegen- und Gleichstromreaktor im Inneren mehrere Thermoelemente und Druckaufnehmer und auf den Reaktormänteln zusätzliche Thermoelemente angebracht. Die erforderliche online - Analytik des Schwachgases auf CO, H₂, CH₄, CO₂, O₂ und N₂ erfolgt mit einem Prozess-Gaschromatographen.

Die Sicherheitstechnik der Anlage ist so ausgeführt, dass beim Überschreiten einer Temperatur von 800 °C am Reaktormantel zunächst eine Warnung auf dem Bildschirm des Prozessleitrechners erfolgt. Bei Reaktormanteltemperaturen von > 1000 °C wird die Anlage automatisch abgeschaltet. Zudem besteht die Möglichkeit, die Anlage in diesem Fall mit CO₂ zu fluten. Im weiteren sind diverse Notausschalter installiert, die bei Betätigung zur direkten Abschaltung der Anlage führen.

Der Kombi-Vergaser mit einer Feuerungswärmeleistung von 100 kW wurde Anfang 2000 in Betrieb genommen (SSE1998, Sen1998).

5.1.1 Die Vorteile des Verfahrens

Die zweistufige Verfahrensauslegung erlaubt eine variable Temperaturführung an den Rosten und ist in der Wahl des Vergasungsmittels flexibel. So ist es z.B. möglich, den Gegenströmer (erste Vergasungsstufe) mit Luft zu betreiben und in der zweiten Vergasungsstufe, dem Gleichströmer Sauerstoff einzusetzen, um einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen. Eine weitere Variationsmöglichkeit besteht beim Verhältnis der Volumenströme an Vergasungsmittel im Gleichströmer und im Gegenströmer, wodurch die Reststoffqualität verschiedener Einsatzmaterialien optimiert werden kann.

Der Kombi-Vergaser erlaubt durch seine einfache Konstruktion einen wirtschaftlichen Betrieb. Die Konzeption der Verschaltung eines Gegenstromreaktors mit einem Gleichstromreaktor ermöglicht die Nutzung der Vorteile der jeweiligen Verfahren:

1. Das Scale-up des Gegenstromreaktors auf höhere Leistungen ist einfacher.
2. Stückiger Brennstoff mit einem breiten Körnungsspektrum ist im Gegenstromvergasen einsetzbar.
3. Der Teergehaltes des Schwachgases durch thermisches Cracken im Gleichstromvergasen vermindert und die zusätzliche Nachvergasung des festen, kohlenstoffhaltigen Rückstandes im zweiten Reaktor führt zur Erhöhung des Heizwertes.

Der Input des zweiten Reaktors besteht bereits aus zwei homogenisierten Stoffströmen, dem Schwachgasstrom und der festen organische Substanz, die schon teilweise zersetzt ist. Im Vergleich zu einem einstufigen Prozess ist der Reaktorbetrieb gleichmäßiger und der Wirkungsgrad der thermischen Zersetzung höher.

4. Möglichkeit der Zugabe eines anderen Vergasungsmittels in jeder Zone entsprechend der Produkthanforderungen.

5.2 Mathematische Berechnung der Vergasung

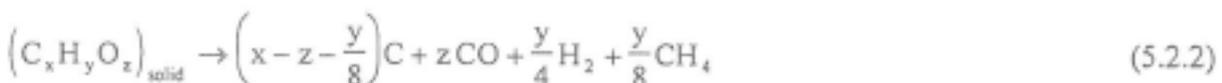
5.2.1 Chemische Vorgänge bei der Vergasung

Während der Vergasung wird die im Brennstoff gespeicherte Energie in chemisch gebundene Energie im Produktgas, im Kondensat und im festen Rückstand (Asche) umgewandelt. Der Anteil im Kondensat und Rückstand ist dabei so gering wie möglich zu halten, da er als Verlust angesetzt werden muss. Daraus ergibt sich die Forderung, geringe Gehalte an Restkohlenstoff in der Asche und von Kohlenwasserstoffen im Kondensat zu erreichen. Das Schwachgas enthält in Form von H_2 , CO und CH_4 gespeicherte Energie, die für eine motorische Nutzung zur Verfügung steht (Nus1990/2, S-L1985).

Die komplexen Reaktionen während der Vergasung lassen sich in heterogene Reaktionen zwischen Feststoff und Gasphase und homogene Gasphasenreaktionen einteilen. Je nach Konstruktionsprinzip bildet sich eine mehr oder weniger ausgeprägte örtliche Trennung der einzelnen Reaktionstypen aus, die bei einem kontinuierlich betriebenen Reaktor jedoch gleichzeitig ablaufen. Diese Reaktionen bestimmen die Zusammensetzung des erzeugten Schwachgases (Tid1994, Nus1990/2).

Im folgenden werden die Vergasungsreaktionen vereinfacht, ohne Berücksichtigung des Brennstoffstickstoffes, beschrieben. Dies ist zulässig, da dieser einen geringen Mengenanteil ($n = 0,0036$) besitzt (Nus1990/2).

Die heterogenen Pyrolyse-Reaktionen Gl. (5.2.1 – 5.2.2) beschreiben die Zersetzung der Biomasse, nur dargestellt als $(C_xH_yO_z)$ in Kohlenstoff und gasförmige Bestandteile unter Zufuhr von Wärme.



Der gebildete Kohlenstoff reagiert mit Sauerstoff (Oxidation), Wasserstoff (Methanreaktion), Wassergas oder CO_2 (Boudouard Reaktion) zu verschiedenen gasförmigen Komponenten (Gl. 5.2.3 – 5.2.7).



Methanreaktion



heterogene Wassergasreaktion



Boudouard Reaktion

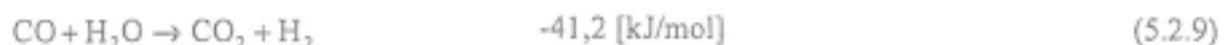


Die verschiedenen Reaktionen in der Gasphase (homogene Reaktionen) laufen parallel zu den heterogenen Reaktionen ab und sind in den Gleichungen (5.2.8 – 5.2.14) dargestellt.

Oxidation von Kohlenmonoxid



homogene Wassergasreaktion (Knallgasreaktion)



Oxidation von Wasserstoff



Methanisierung



Methanspaltung



Spaltung von Kohlenwasserstoffen mit Wasserdampf



Oxidation von Methan



Im Bereich des Luftertritts bildet sich die Oxidationszone aus. Dort laufen die heterogenen exothermen Reaktionen zwischen Feststoff- und Gasphase ab. Diese Reaktionen stellen die benötigte Prozesswärme zur Verfügung. Ein Teil des im Brennstoff gebundenen Wasserstoffes wird zu H_2O und der Kohlenstoff zu CO und CO_2 oxidiert. Anzustreben sind hohe Reaktionstemperaturen (bis $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), da dort das Reaktionsgleichgewicht deutlich bei Kohlenmonoxid liegt (Abbildung 2). Eine schnelle Oxidation des Kohlenstoffes ist aber nicht erwünscht, denn das heiße Kohlenstoffbett wird zunächst zur Reduktion der Verbrennungsprodukte H_2O und CO_2 zu H_2 (heterogene Wassergasreaktion) und CO (Boudouard-Reaktion) benötigt. Außerdem trägt es zum Cracken der langkettigen Bruchstücke aus der Pyrolyse bei.

In Abbildung 4 wird deutlich, daß eine hohe CO -Ausbeute aus den endothermen Boudouard- und Wassergasreaktionen bei Temperaturen über $800 \text{ }^\circ\text{C}$ erzielt wird. Des weiteren liegt das Reaktionsgleichgewicht der Methanreaktion bei hohen Temperaturen deutlich auf der Seite des Wasserstoffes. Der Methananteil (CH_4) im Produktgas ist dadurch deutlich geringer als die Anteile an CO und H_2 .

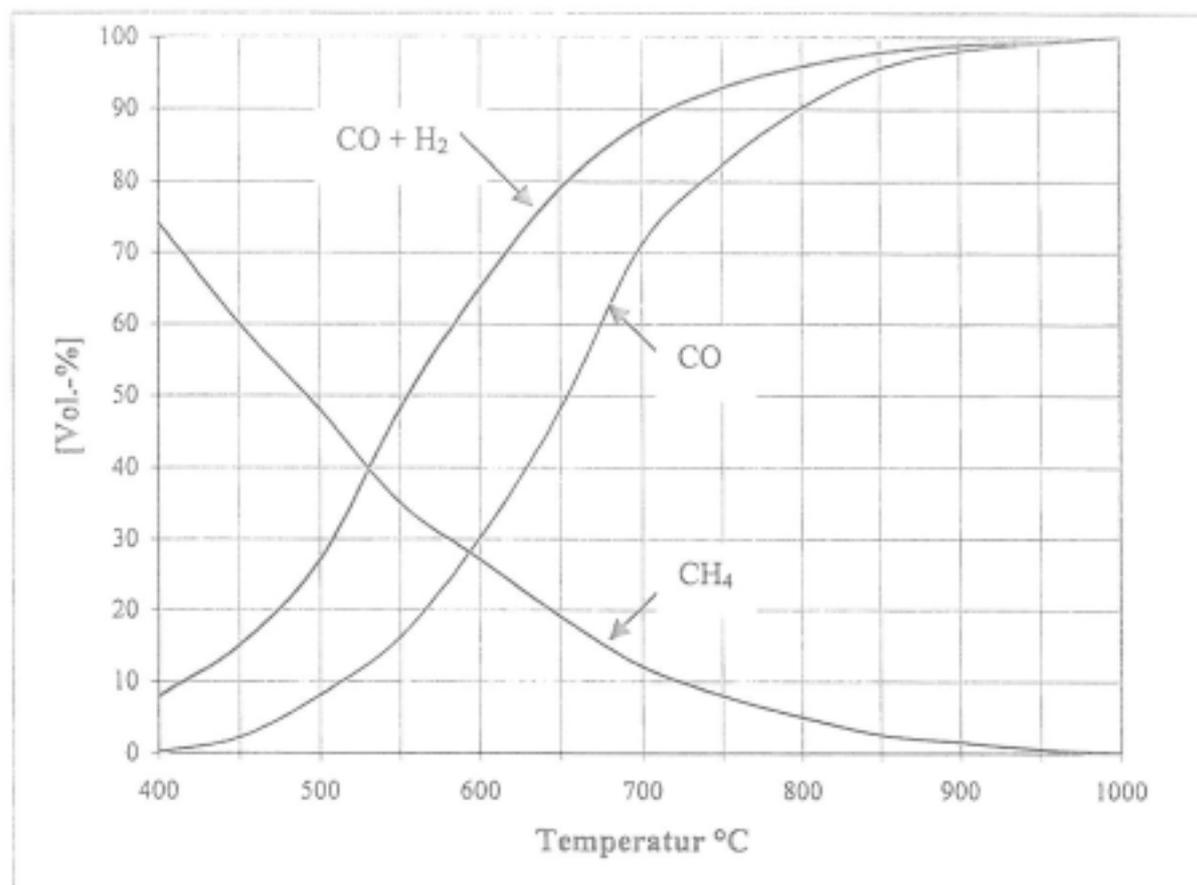


Bild 4: Wassergas-, Boudouard-, Methanreaktion als Funktion der Temperatur (Nus1990/2)

Der Vergaserwirkungsgrad wird schlechter durch die stark exothermen homogenen Reaktionen 5.2.8 – 5.2.10 und 5.2.14. Da Methan eine hohe Klopfestigkeit aufweist, ist die Spaltung von Methan (5.2.12) nicht oder nur bedingt erwünscht. Um Verschmutzungen in der Anlage zu vermeiden, ist die oxidative Spaltung höherwertiger Kohlenwasserstoffe erforderlich. Dies verläuft u.a. analog zu den Reaktionen 5.2.13.

5.2.2 Mathematische Berechnung

Die Berechnungen zur Vergasung und die thermodynamische Betrachtung der Reaktionsvorgänge wurden auf der Grundlage der Ausführungen von F. Bosnjakovic erstellt. Mit maßstäblichen Diagrammen, welche die komplexen Vorgänge bei der Vergasung beschreiben, ist es möglich, bei bekannten Eingangsdaten die Eigenschaften des erzeugten Gases vorherzusagen und vor allem die Auswirkungen verschiedener Betriebsbedingungen zu berechnen. Diese Methode stellt eine vereinfachte Betrachtungsweise im Vergleich zu anderen Berechnungsverfahren dar, bei denen aufwendige iterative Näherungsrechnungen durchgeführt werden müssen. Der Vorteil der Methode von Bosnjakovic ist, dass sich einfach und schnell Änderungen im Vergasungsprozess mathematisch abbilden lassen.

Die Gaserzeugung im Vergasungsreaktor wird in Entgasung (Pyrolyse) und Vergasung (eigentlicher Generatorprozeß) unterteilt. Obwohl beide Prozesse miteinander gekoppelt sind, kann man sie rechnerisch getrennt betrachten. Das ist erforderlich, da beide verschiedenen Gesetzmäßigkeiten gehorchen. Eine Vernachlässigung der Entgasung als abhängige Größe der Vergasung ist gerechtfertigt. Somit wird weiter nur der eigentliche Vergasungsvorgang betrachtet. Dieser beeinflusst entscheidend die Qualität und Quantität des erzeugten Schwachgases, die Reaktionstemperatur und damit den Entgasungsprozeß.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Es werden weiter folgende Annahmen getroffen, die eine übersichtliche Berechnung und die Anwendung der Diagramme von Bosnjakovic ermöglichen:

- überall herrscht das örtliche thermodynamische Gleichgewicht
- gleichmäßige Durchmischung des Brennstoffes im gesamten Reaktor
- vollständige Umsetzung des Sauerstoffes
- sehr geringer Methananteil im Generatorgas bei erwarteten Temperaturen unter 1000°C
- Vernachlässigung höherer Kohlenwasserstoffe, da die auftretenden Mengen im üblichen Vergasungstemperaturbereich sehr klein sind und somit keinen merklichen Einfluss auf die Gleichgewichtsgesetze ausüben

5.2.3 Thermodynamische Betrachtung

Das bei der Vergasung entstandene Schwachgas setzt sich aus den Komponenten CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O und N₂ zusammen. Die Art des zum Einsatz kommenden Brennstoffes kann durch die dimensionslose Kenngröße (σ) für die Brennstoffcharakteristik nach Mollier berücksichtigt werden. Die beiden dimensionslosen Kenngrößen ζ und ψ geben den Kohlenstoffbedarf und die rechnerische Feuchte des Vergasungsmittels wieder, mit denen dann aus den Diagrammen von Bosnjakovic die Gleichgewichtsvergasungstemperatur bestimmt wird. Diese Temperatur ist entscheidend für die Qualität und Quantität des Produktgases, da z.B. die Reduktion von CO₂ zu CO im wesentlichen von ihr abhängt. In einem weiteren Schritt wird dann über die Aufstellung von Stoffbilanzen im thermodynamischen Gleichgewicht bei gegebener Vergasungstemperatur die Gaszusammensetzung bestimmt.

Den Ausgangspunkt für die Berechnungen bildet die Brennstoffzusammensetzung gemäß der Elementaranalyse. Sie ist in folgender Form gegeben:

$$c + h + o + n + s + w + a = 1 \quad (5.2.15)$$

Bestandteil	Bezeichnung	Gewichtsanteil [kg/kg]	Molmenge n_i [mol/kg]	Molmasse M_i [kg/kmol]
Kohlenstoff	c	0,4017	33,476	12
Wasserstoff	h	0,0483	24,126	2 (H ₂)
Sauerstoff	o	0,3466	10,832	32 (O ₂)
Stickstoff	n	0,0037	0,131	28 (N ₂)
Schwefel	s	0	0	32
Wasser	w	0,1997	11,096	18
Asche	a	0	0	-
Σ der Anteile	-	1	79,661	-

Tabelle 4: Gewichts-, Molanteile und Molmassen der Brennstoffbestandteile

In Tabelle 4 sind die Gewichtsanteile, die Molmassen und die Molmengen der einzelnen Brennstoffanteile angegeben. Man kann erkennen, dass der Brennstoff neben Kohlenstoff noch in den Poren gebundene Feuchte besitzt. Der Ascheanteil wird aufgrund seines geringen Mengenanteils im folgenden vernachlässigt. Bei der Vergasungsrechnung dürfen nur Brennstoffanteile berücksichtigt werden, die an den Vergasungsreaktionen beteiligt sind. Die flüchtigen Bestandteile und die im Brennstoff gebundene Feuchte bleiben bei der Gleichstromvergasung bei erwarteten Temperaturen unter 1000 °C im Brennstoff und nehmen somit an der Vergasung teil.

Zur Charakterisierung des Brennstoffes nach Mollier ist folgende dimensionslose Kenngröße gegeben:

$$\sigma = \left[\frac{O_{2min}}{(C)} \right] \quad (5.2.16)$$

σ = Brennstoffcharakteristik nach Mollier

O_{2min} = Mindestsauerstoffgehalt für vollständige Verbrennung in [kg/kg Br]

(C) = Kohlenstoffmenge im Brennstoff in [kg/kg Br]

Diese Kenngröße ist nur vom eingesetzten Brennstoff abhängig, d. h. sie ist für Brennstoffe gleicher Herkunft gleich groß, ohne Rücksicht auf den zufälligen Wassergehalt w oder Aschegehalt a . Für feste Brennstoffe liegt σ zwischen 1,0 (reiner Kohlenstoff) und 1,15 (Steinkohle). In Verbindung mit Gl. (5.2.15) ergibt sich nun folgende Brennstoffcharakteristik für die eingesetzten Holzhackschnitzel:

$$\sigma = 1 + 3 * \frac{h - \frac{O - S}{8}}{c} = 1,037 \quad (5.2.17)$$

Zunächst wird die Bestimmung der rechnerischen Menge des Vergasungsmittels n' vorgenommen, da alle wichtigen Kenngrößen für die Charakterisierung des Vergasungsvorganges auf diese Kenngröße bezogen werden. Die rechnerische Vergasungsmittelmenge setzt sich aus der zugeführten Menge Luft n'_L , dem mit der Luft zugeführten Wasser $n'_{H_2O,L}$ und dem Wasser- bzw. Wasserstoffgehalt des Brennstoffes $n'_{H_2O,Br}$ zusammen.

Mit einem Luftbedarf von $L_1 = 1,0965 \text{ m}^3 \text{ Luft/kg Br}$, einer Luftdichte $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ bei 25 °C und einer Luftzusammensetzung von 23,3 Gew.-% O_2 und 76,7 Gew.-% N_2 berechnet sich die eingeblasene Menge Luft zu $n'_L = n'_{O_2} + n'_{N_2} = 49,052 \text{ mol}$. Wird die Luftfeuchtigkeit vernachlässigt, ist die mit der Luft zusätzlich zugeführte Menge Wasser $n'_{H_2O,L} = 0$ zu setzen.

Die rechnerische Menge Wasser im Brennstoff $n'_{H_2O,Br}$ stammt aus dem Wasserstoffgehalt h und dem Wassergehalt w im Brennstoff. Der Wasserstoffgehalt h läßt sich zweckmäßigerweise in den gebundenen Wasserstoff h_{geb} und in den freien Wasserstoff h_f unterteilen. Diese beiden Größen werden folgendermaßen berechnet:

$$h_f = h - \frac{O - S}{8} = 4,922 \text{ [mol / kg]} \quad (5.2.18)$$

$$h_{geb} = \frac{O - S}{8} = 43,330 \text{ [mol / kg]}$$

Somit berechnet sich die auf $m_{Br} = 1 \text{ kg}$ Brennstoffmasse bezogene rechnerische Brennstoffwassermenge zu:

$$n'_{H_2O,Br} = m_{Br} * \left(\frac{w}{18} + \frac{h_{geb}}{2} \right) = 32,761 \text{ [mol]} \quad (5.2.19)$$

Die rechnerische Menge Vergasungsmittel erhalten wir nun zu:

$$n' = n'_L + n'_{H_2O,L} + n'_{H_2O,Br} = 81,813 \text{ [mol]} \quad (5.2.20)$$

Als weitere wichtige Kenngröße ist der Kohlenstoffbedarf ζ zu bestimmen. Er gibt das Verhältnis von zugeführtem Kohlenstoff zu rechnerischem Vergasungsmittel an. Dem Vergaser wird $n'_C = 33,476$ mol Kohlenstoff pro kg Brennstoff zugeführt. Damit berechnet sich der Kohlenstoffbedarf ζ zu:

$$\zeta = \frac{n'_C}{n'} = 0,41 \text{ [mol}_C\text{/mol}_n\text{]} \quad (5.2.21)$$

Die rechnerische Feuchte ψ für Vergasungsreaktion zur Bestimmung der Gaszusammensetzung ergibt sich aus der Feuchte des Vergasungsmittels und des Brennstoffes, wobei die Feuchte des Vergasungsmittels in erster Näherung zu null gesetzt werden kann.

$$\psi = \frac{n'_{H_2O}}{n'} = \frac{n'_{H_2O,L} + n'_{H_2O,Br}}{n'_L + n'_{H_2O,L} + n'_{H_2O,Br}} = 0,40 \text{ [mol}_{H_2O}\text{/mol}_n\text{]} \quad (5.2.22)$$

Der Kohlenstoffbedarf ζ und die rechnerische Feuchte ψ werden nun zur Ermittlung der adiabaten Vergasungstemperatur herangezogen. Aus den bei Bosnjakovic dargestellten ζ - ψ -Diagrammen werden die Vergasungstemperatur für $\sigma = 1,0$ bzw. $\sigma = 1,1$ zeichnerisch ermittelt. Für den eingesetzten Brennstoff ($\sigma = 1,037$) ergibt sich durch lineare Interpolation eine adiabate Vergasungstemperatur von $t = 642$ °C.

Für die Berechnung der Schwachgaszusammensetzung gibt Bosnjakovic nun eine Reihe von Gleichungen an, die rechnerisch oder zeichnerisch ausgewertet werden können. Diese Gleichungen berücksichtigen die Gleichungen der Gaszusammensetzung, die Bilanzen für die einzelnen Elemente und das chemische Gleichgewicht. Zur besseren Übersicht und zur Vereinfachung hat Bosnjakovic die Modellkalkulation durchgeführt und in Diagrammen zusammen gefasst. Mit Hilfe der Kennwerte χ (Bildungsgrad des Wasserstoffes), ω (Verteilungsgrad des Sauerstoffes) und μ (Wasserstoffanteil im Methan) können die einzelnen Volumenanteile der Gaskomponenten und die produzierte Menge Schwachgas aus den Diagrammen bestimmt werden. Der Bildungsgrad des Wasserstoffes χ , der Wasserstoffanteil im Methan μ und der Verteilungsgrad des Sauerstoffes ω sind in Abhängigkeit der Vergasungstemperatur t bei $\sigma = 1,0$ bzw. $\sigma = 1,1$ bei Bosnjakovic dargestellt.

Durch Interpolation mit $\sigma = 1,037$ für den eingesetzten Brennstoff ergeben sich die benötigten Werte für χ , ω und μ :

Bildungsgrad des Wasserstoffes χ

$$\chi(\sigma = 1,0) = 0,688 \quad \chi(\sigma = 1,1) = 0,685 \quad \chi(\sigma = 1,037) = 0,687$$

Wasserstoffanteil im Methan μ

$$\mu(\sigma = 1,0) = 0,082 \quad \mu(\sigma = 1,1) = 0,095 \quad \mu(\sigma = 1,037) = 0,087$$

Verteilungsgrad des Sauerstoffes ω

$$\omega(\sigma = 1,0) = 0,578 \quad \omega(\sigma = 1,1) = 0,564 \quad \omega(\sigma = 1,037) = 0,573$$

Zur Berechnung des erzeugten Volumens an feuchtem Schwachgas gibt Bosnjakovic die anschließende Formel in Abhängigkeit von σ , ζ , ψ , χ , μ und ω an:

$$V_r = 0,79 \cdot (1 - \psi) + (1 - 0,5 \cdot \mu) \cdot \psi + (2 - \omega) \cdot [0,21 \cdot (1 - \psi) + 0,5 \cdot (\chi + \mu) \cdot \psi] + \zeta \cdot (\sigma - 1) \cdot [2 - \mu - (2 - \omega) \cdot (1 - \chi - \mu)] \quad [\text{mol}_g / \text{mol}_n] \quad (5.2.23)$$

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Daraus errechnet sich V_f zu 1,2814 mol_n/mol_n. Zur Berechnung der einzelnen Gasanteile müssen folgende Gleichungen gelöst werden, die in Abhängigkeit von σ , ζ , ψ , χ , μ und ω gegeben sind:

Wasser

$$[H_2O] = \frac{(1 - \chi - \mu) * [\mu + 2 * \zeta * (\sigma - 1)]}{V_f} = 0,076 \quad (5.2.24)$$

Wasserstoff

$$[H_2] = \frac{\chi * [\psi + 2 * \zeta * (\sigma - 1)]}{V_f} = 0,2308 \quad (5.2.25)$$

Methan

$$[CH_4] = \frac{0,5 * \mu * [\psi + 2 * \zeta * (\sigma - 1)]}{V_f} = 0,0146 \quad (5.2.26)$$

Kohlenmonoxid

$$[CO] = \frac{2 * (1 - \omega) * [0,21 * (1 - \psi) + 0,5 * (\chi + \mu) * \psi - \zeta * (\sigma - 1) * (1 - \chi - \mu)]}{V_f} = 0,1853 \quad (5.2.27)$$

Kohlendioxid

$$[CO_2] = \frac{\omega * [0,21 * (1 - \psi) + 0,5 * (\chi + \mu) * \psi - \zeta * (\sigma - 1) * (1 - \chi - \mu)]}{V_f} = 0,124 \quad (5.2.28)$$

Stickstoff

$$[N_2] = \frac{0,79 * (1 - \psi)}{V_f} = 0,3696 \quad (5.2.29)$$

Unter Annahme eines idealen Gasgemisches kann der Heizwert des Schwachgases aus den Heizwertanteilen der einzelnen Komponenten berechnet werden. Dabei ist der Volumenanteil der Einzelkomponenten ψ_i gleich $[X_i]$.

$$H_{u,G} = \sum \psi_i * H_{u,i} [kJ/m^3] = 5351 kJ/m^3 \quad (5.2.30)$$

ψ_i = Volumenanteil der Komponente i im Gas

$H_{u,i}$ = Heizwert der Komponente i in $[kJ/m^3]$

Die einzelnen Heizwerte sind angegeben zu:

$$H_{u,CH_4} = 35900 kJ/m^3$$

$$H_{u,CO} = 12600 kJ/m^3$$

$$H_{u,H_2} = 10800 kJ/m^3$$

Der Vergaserwirkungsgrad η_v beschreibt die im Brennstoff gebundene Energie zur enthaltenen Energie im Schwachgas. Er gibt die Qualität der Energieumwandlung des

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Vergasers wieder. Die für verschiedenen Anlagen berechneten Wirkungsgrade liegen zwischen 50 und 85 %.

$$\eta_v = \frac{H_{u,G} \cdot \dot{V}_G}{H_{u,Br} \cdot \dot{m}_{Br}} = 0,75 \quad (5.2.31)$$

$H_{u,G}$ = Heizwert des Schwachgases [kJ/m³]

\dot{V}_G = Volumenstrom des Gases in [m³/s]

$H_{u,Br}$ = Heizwert des Holzes in [kJ/kg]

\dot{m}_{Br} = Massenstrom des Holzes in [kg/s]

Zum besseren Vergleich mit Daten aus der Literatur oder mit Herstellerangaben ist im folgenden die Zusammensetzung des trockenen Schwachgases in Volumen-% angegeben, d.h. der Wasseranteil wurde herausgerechnet.

Wasserstoff: $\psi_{H_2} = 24,97 \%$

Methan: $\psi_{CH_4} = 1,58 \%$

Kohlenmonoxid: $\psi_{CO} = 20,05 \%$

Kohlendioxid: $\psi_{CO_2} = 13,42 \%$

Stickstoff: $\psi_{N_2} = 39,99 \%$

Dadurch ändert sich der Heizwert des Schwachgases auf $H_{u,G} = 5789 \text{ kJ/m}^3$ und der Wirkungsgrad errechnet sich zu $\eta_v = 0,811$.

Diese Berechnungen zeigen, dass ein maximaler Heizwert von 5798 kJ/m³ im Brenngas, abhängig vom eingesetzten Brennstoff, erreicht werden bzw. der optimale Vergaserwirkungsgrad 81 % betragen kann. Die berechneten Werte werden zur Beurteilung des Vergasungsprozesses sowie zur Auslegung der Aggregate verwendet.

5.3 Auslegung des Vergasers

Zunächst wurde der Gegenstromreaktor ausgelegt, mit dem Grundlagen der Verfahrensführung und Reaktionsvorgänge bei der Vergasung ermittelt werden können. Der Vergaser soll bei atmosphärischem Druck mit Luft als Oxidationsmittel arbeiten. Dabei ist die Brennstoffzuführung ins Reaktorinnere über eine am oberen Ende des zylindrischen Vergasers angeflanschte gasdichte Doppelpendelklappe zu realisieren. Am unteren Ende des Vergasers wird der Ascheaustrag mit integriertem Düsenboden angeflanscht. Die Asche wird über eine zweite gasdichte Doppelpendelklappe, die unter dem Düsenboden angebracht ist, aus dem Vergaser abgezogen. Die Baugröße des Gegenstromvergasers richtet sich nach der Feuerungswärmeleistung (FWL), die mit 100 kW anzusetzen wurde.

Als Brennstoff sollen zunächst Holzhackschnitzel mit einer Kantenlänge von 50 - 100 mm und einer Schüttdichte von 250 kg/m³ eingesetzt werden. Die chemische Zusammensetzung der Hackschnitzel kann je nach Holzart variieren. Aus diesem Grunde wurden aus drei heimischen Holzsorten (Fichte, Buche und Pappel) die Mittelwerte der chemischen Bestandteile, die die Grundlage für die Auslegung des Vergasers bilden, errechnet. In Tabelle 5 sind für lufttrockenes Holz die gemittelten Gewichtsanteile der drei Holzsorten dargestellt.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Bestandteil	Bezeichnung	Fichte (kg/kg)	Buche (kg/kg)	Pappel (kg/kg)	Mittelwerte (kg/kg)
Kohlenstoff	c	0,4030	0,3777	0,4140	0,3982
Wasserstoff	h	0,0468	0,0475	0,0492	0,0478
Sauerstoff	o	0,3362	0,3405	0,3542	0,3436
Stickstoff	n	0,0038	0,0035	0,0036	0,0036
Schwefel	s	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Wasser	w	0,2040	0,2230	0,1670	0,1980
Asche	a	0,0062	0,0078	0,0012	0,0087
Summe der Anteile:	-	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabelle 5: Brennstoffanalyse Holzhackschnitzel

Die Kennwerte aus der chemischen Analyse dienen zur Berechnung des unteren Heizwertes $H_{u,Br}$ des Brennstoffes. Für Biobrennstoffe, insbesondere Holzbrennstoffe, die wegen ihres schwankenden Kohlenstoff- und Wasserstoffgehaltes unterschiedliche Vergasungs- und Verbrennungsreaktionen zeigen, ist die theoretische Ermittlung des Heizwertes und der benötigten Menge Vergasungsmittel der Ausgangspunkt für die weiteren Berechnungen. Aus der Näherungsformel (5.3.1) und der gemittelten chemischen Zusammensetzung ergibt sich der untere Heizwert des Brennstoffes.

$$H_{u,Br} = 35 \cdot c + 94,3 \cdot h + 10,4 \cdot s + 63 \cdot n - 10,8 \cdot o - 2,5 \cdot w = 14,3 \left[\text{MJ} / \text{kg} \right] \quad (5.3.1).$$

Der für den kontinuierlichen Betrieb des Vergasers benötigte Brennstoffmassenstrom (\dot{m}_{Br}) berechnet sich aus dem Quotienten der Feuerungswärmeleistung (100 kW) und dem unteren Heizwert zu:

$$\dot{m}_{Br} = \frac{FWL}{H_{u,Br}} = 0,007 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 25,2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (5.3.2).$$

Mit der Rostbelastung von $R_b = 0,8 \text{ MW/m}^2$ für Gitterroste (Dub1990) ergibt sich mit der einzuhaltenden Feuerungswärmeleistung (100 kW) eine effektive Rostfläche von $0,125 \text{ m}^2$. Über dem Rost ist im Reaktor integriert eine trichterförmige Querschnittsverengung bis auf einen Durchmesser von $0,426 \text{ m}$, die der Volumenreduzierung während des Vergasungsprozesses Rechnung trägt. Die Herdeinschnürung hat eine Höhe von $0,150 \text{ m}$. Zur Verbesserung des Brennstoffflusses reguliert ein beweglicher Schürhaken, der durch einen Kegel mit einem Durchmesser von $0,150 \text{ m}$ geschützt ist, den Ascheaustrag auf dem Rost. Der Innendurchmesser des Versuchsreaktors ergibt sich aus der Rostfläche, dem Flächenbedarf des Kegels und der Querschnittsverengung zu $0,6 \text{ m}$. Die Füllhöhe des Vergasers wurde mit $0,6 \text{ m}$ angesetzt. Aus dem Reaktorvolumen abzüglich der Volumina des Kegels und der Herdeinschnürung berechnet sich die Brennstoffmasse m_{Br} bei gegebener Schüttdichte des Brennstoffes ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$) im Reaktor zu $39,4 \text{ kg}$.

Die für die Aufrechterhaltung des Prozesses notwendige Wärme wird durch partielle Oxidation des Brennstoffes in der Feuerungszone bereitgestellt. Dabei verbinden sich die Restkohlenstoffanteile mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Mit Hilfe der Kennwerte der Elementaranalyse des Brennstoffes und der Berechnungsformeln

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

aus der Verbrennungsrechnung kann die theoretische Luftmenge ermittelt werden. Der theoretische Luftbedarf L_{\min} läßt sich wie folgt ermitteln (Net1982):

$$L_{\min} = 8,877 * c + 26,443 * h - 3,332 * o + 3,332 * s = 4,6 \left[m^3 \text{ Luft} / \text{kg Br} \right] \quad (5.3.3).$$

Zur Schwachgaserzeugung wird eine Luftzahl (λ) von 0,3 eingestellt. Damit erhält man den tatsächlichen Luftbedarf zu:

$$L_t = \lambda * L_{\min} = 1,4 \left[m^3 \text{ Luft} / \text{kg Br} \right] \quad (5.3.4).$$

Die Höhe der Oxidationszone ist bei vorgegebener Stückigkeit des Brennstoffes mit 0,15 m anzunehmen. Über das Verhältnis der Gesamtmasse des Brennstoffes im Reaktor zur Brennstoffmasse in der Oxidationszone ergibt sich eine Luftmenge ($L_{t,o}$) von $5,7 \text{ m}^3$ Luft pro kg Brennstoff in der Verbrennungszone. Das Luftverhältnis λ_o berechnet sich zu:

$$\lambda_o = L_{t,o} / L_{\min} = 1,24 \quad (5.3.5).$$

Mit Hilfe des Luftverhältnisses kann die adiabate Verbrennungstemperatur in der Oxidationszone ermittelt werden. Aus den gegebenen Daten beläuft sich die adiabate Verbrennungstemperatur auf $1370 \text{ }^\circ\text{C}$.

Das Vergasungsmittel wird über 12 Düsen mit einem Durchmesser von 0,01 m, die in dem Kegel und dem Düsenboden integriert sind, in den Reaktor eingeblasen. Die Schwachgasausbeute liegt bei ca. $2 \text{ m}^3 \text{ SG/kg Br}$. Der erzeugte Schwachgasvolumenstrom von $50,4 \text{ m}^3/\text{h}$ wird durch eine 0,08 m dicke Rohrleitung aus dem Vergaser abgesaugt und dem Gleichstromreaktor zugeführt.

Da der Brennstoff in der ersten Stufe nicht vollständig umgesetzt wird, entsteht ein Holzkoks mit einer Dichte von ca. 400 kg/m^3 und einem Heizwert von 30.000 kJ/kg . Der Massenstrom an Koks kann mit ca. 10 % des eingesetzten Brennstoffmassenstroms angenommen werden. Mit dem angesetzten Koksmassenstrom von $2,52 \text{ kg/h}$ ergibt sich ein Leistung von $20,55 \text{ kW}$. Bei einem gewählten Reaktordurchmesser der 2. Stufe von 200 mm und einer Rostbelastung von $0,8 \text{ MW/m}^2$ ergibt sich eine Reaktorleistung in der 2. Stufe von $25,12 \text{ kW}$.

Aufgrund der nicht vollständigen Umsetzung des Brennstoffes wird im Gegenstromreaktor nicht das gesamte Vergasungsmittel benötigt, so dass der Schwachgasvolumenstrom bei ca. $45 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt. Um eine Verweilzeit des Gases in Gleichstromreaktor von 1 Sekunde zu realisieren, ist eine Reaktorhöhe von 300 mm notwendig. In Tabelle 6 sind die Daten und Abmessungen des Vergasers aufgelistet.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Benennung	Abkürzung	Zahlenwert	Einheit
Feuerungswärmeleistung	FWL	100,000	kW
Heizwert Holz	H_{ub}	14,277	MJ/kg
Brennstoffmassenstrom	\dot{m}_{Br}	25,215	kg/h
Rostbelastung	R_b	0,800	MW/m ²
Gegenstromreaktor			
effektive Rostfläche	A_R	0,125	m ²
Gesamtfläche Rost	A_A	0,147	m ²
Gesamtdurchmesser Rost	d	0,500	m
Höhe des Kegels	h_K	0,137	m
Kegeldurchmesser	d_k	0,150	m
Höhe der Herdeinschnürung	h_E	0,150	m
Innendurchmesser Herdeinschnürung	d_A	0,426	m
Füllhöhe des Reaktors	h	0,600	m
Reaktorinnendurchmesser	d_I	0,600	m
Schüttdichte der Holzhackschnitzel	r	250,000	kg/m ³
Brennstoffmasse im Reaktor	m_{Br}	39,416	kg
theoretischer Luftbedarf	L_{min}	4,607	m ³ Luft/kg Br
Luftverhältnis	λ	0,300	-
tatsächlicher Luftbedarf	L_t	1,382	m ³ Luft/kg Br
Luftvolumenstrom	\dot{V}_{Luft}	34,850	m ³ Luft/h
Luftmenge (Oxidationszone)	L_{Lo}	5,171	m ³ Luft/kg Br
Luftverhältnis (Oxidationszone)	λ_o	1,239	-
adiabate Verbrennungstemperatur	T_{ad}	1370	°C
Schwachgasausbeute	V_{SG}	2,000	m ³ SG/kg Br
Schwachgasvolumenstrom	\dot{V}_{SG}	50,429	m ³ /h
Querschnitt Auslaßrohr	A_R	0,080	m
Querschnitt der Düsen	d_D	0,010	m
Heizwert Koks	H_{ub}	29,3398	MJ/kg
Koksmassenstrom	\dot{m}_k	2,5215	kg/h
Gleichstromreaktor			
effektive Rostfläche 2	A_{R2}	0,0314	m ²
Reaktordurchmesser 2	D_{R2}	0,200	m
Füllhöhe des Reaktors	h	0,300	m
Schüttdichte Koks	r	400,000	kg/m ³
Brennstoffmasse im Reaktor 2	m_K	3,768	kg

Tabelle 6: Daten des Vergasers

5.3.1 Auslegung der Peripherieaggregate

Doppelschleusensysteme

Für den Betrieb des Vergasers werden drei Doppelschleusensysteme (DK) benötigt. Diese dienen zum Eintrag des Brennstoffes (DK 1), zum Transport des Kokes aus dem Gegenstromreaktor in den Gleichstromreaktor sowie der Trennung der beiden Reaktoren (DK 2) und zum Ausschleusen der Asche (DK 3). Weiterhin müssen die Schleusensysteme (DK 1) und (DK 3) einen dichten Abschluss gegen die Umgebung gewährleisten, da sonst Luft unkontrolliert in den Prozess eingetragen wird. Dies kann vor allen bei einer Undichtigkeit von DK 3 problematisch werden, da mit der eingetragenen Luft und dem vorhandenen Schwachgas ein zündfähiges Gemisch entstehen kann. DK 3 soll neben der Transportaufgabe noch einen dichten Abschluss zwischen den Reaktoren gewährleisten. Die Gewährleistung der Dichtigkeit bei den hohen Temperaturen von 300 – 400 °C wird jedoch von den Herstellern nicht bzw. sehr zurückhaltend übernommen.

Für den Versuchsreaktor wurden Doppelpendelklappen mit einem 250 mm Rechteckquerschnitt ausgewählt. Die Pendelklappen werden mit Druckluft bei 6 bar betrieben. Über Riedkontakte wird die Position (Auf / Zu) der Pendelklappen an das Prozessleitsystem übermittelt.

Vergasungsmittelversorgung

Zur Versorgung der beiden Reaktoren mit Vergasungsmittel (Luft) wurde ein Kompressor eingesetzt. Die Installation eines Kompressors ist notwendig, um die entstehenden Druckverluste über die Rohrleitungen und Regelarmaturen auszugleichen. Die Messung des Volumenstroms erfolgt über Schwebekörper-Durchflussmesser. Der Kompressor ist so ausgelegt, dass der notwendige hohe Luftvolumenstrom für den Anfahrprozess von ca. 80 m³/h und der Betriebsvolumenstrom von 34,85 m³/h gefördert werden kann. Die Luftmenge wird über einen Frequenzumrichter, der mit der SPS verbunden ist, gesteuert. Die Messung des Gesamtvolumenstroms erfolgt über einen Durchflussmesser, der ein direktes on-line Signal an die SPS überträgt.

Gaskühlung

Um die Anforderungen an einen Motor für die spätere energetische Nutzung genau spezifizieren zu können, wurde das Schwachgas nach dem Austritt aus dem Gleichstromreaktor von ca. 800 °C auf 40 °C abgekühlt. Die Abkühlung ist notwendig, um im Motor eine ausreichende Zylinderfüllung zu gewährleisten. Durch eine trockene Gasreinigung wird das Gas vor dem Saugzug von Staub befreit.

Die abzuführende Leistung zur Kühlung des Schwachgases errechnet sich aus dem Schwachgasvolumenstrom von 0,014 m³/s mit $c_{p,Gas} = 1,366 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ und $\Delta T = 760 \text{ K}$ aus

$$\dot{Q} = \dot{V} * c_{p,Gas} * \Delta T \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] \quad (5.3.6)$$

zu 14,53 kW. Diese Leistung wird in einem Rohrwärmeübertrager an das Kühlmedium Wasser übertragen. Die Rückkühlung des Wassers erfolgt mit einem Kryostaten. Die Abscheidung der Feststoffpartikel wird mit einem Zyklon realisiert. Da zumindest zu Versuchsbeginn mit dem Ausfall von Kondensat zu rechnen ist, sind alle Gasreinigungsaggregate mit Kondensatablässen ausgerüstet. Diese Ablässe sind manuell zu betätigen.

Saugzuggebläse

Um die in den Reaktoren entstehenden Gase abzusaugen und dem Gasbrenner zuzuführen, wurde ein Saugzug eingesetzt. Der Saugzug wurde so ausgelegt, dass der Gasvolumenstrom im Anfahrbetrieb von ca. 120 m³/h und der Schwachgasvolumenstrom im stationären Betrieb bei einem Druckverlust von bis zu 300 mbar und einem Brennervordruck von 80 mbar gewährleistet ist.

Für diese Aufgabe wird ein Seitenkanalverdichter mit Frequenzumrichter eingesetzt. Die Steuerung des Saugzuges erfolgt mittels der SPS über einen Differenzdruckmesser, der an der Austrittsleitung des Gegenstromreaktors installiert ist. Über diese Steuerung wird ein permanenter Unterdruck von 5 bis 10 mbar am Kopf des Gegenstromreaktors eingehalten.

Gasbrenner

Das entstehende Schwachgas wird über einen Schwachgasbrenner mit Wärmeübertrager einer thermischen Nutzung zugeführt werden. Die Installation ist so gewählt, dass die entstehende Wärme im Winter zur Heizung der Technikumshalle genutzt werden kann, im Sommer die Wärme an die Umgebung abgeführt wird.

Aufgrund des Heizwertes des Gases mit $H_u = 5351 \text{ kJ/m}^3$ und einem Schwachgasvolumenstrom von 50,4 m³/h kann der Brenner ohne Stützfeuerung betreiben werden. Die Leistung des Brenners ist auf 75 kW ausgelegt. Das entstehende Abgas wird über einen Kamin an die Umgebung abgegeben.

Messtechnik

Um definierte Aussagen über die Prozessabläufe in der Anlage zu erhalten, wurde eine umfangreiche und funktionell angemessene Messtechnik installiert. Alle Messdaten werden über 4 – 20 mA Signale an die SPS übertragen, so dass eine on-line Überwachung der Messdaten am PC möglich ist. Ein Übersicht der installierten Messinstrumente ist im MSR-Schema (Anhang 1) dargestellt.

Die Ermittlung der Gesamtvergasungsmittelzufuhr wird über einen Differenztemperatur-Durchflussmesser direkt an die SPS übergeben. Die Vergasungsluft für die einzelnen Reaktoren wird mit Schwebekörperdurchflussmessern ermittelt und kann über Nadelventile reguliert werden.

Zur Temperaturmessung wurden am Gegenstromreaktor 9 Thermoelemente in drei Ebenen auf dem Reaktormantel und 3 Thermoelemente im Reaktor in verschiedenen Höhen installiert. Die Füllstandsmessung erfolgt mittels eines kapazitiven Aufnehmers, der bei Änderung des Dielektrikums durch die Schüttung des Brennstoffes eine der Füllhöhe proportionale Änderung der Stromstärke angibt. Im Auslass am Kopf des Reaktors ist eine Druck- und Temperaturmessung installiert. Über die Druckmessung wird der Saugzug gesteuert, wodurch ein konstanter Unterdruck im Reaktor eingehalten wird.

Unterhalb des Gegenstromreaktors und oberhalb des Schleusensystems DK 2 sind zusätzliche Druck- und Temperaturfühler sowie eine weitere Füllstandsmessung installiert. Die Füllstandsmessung soll ein Überfüllen des Schleusensystems verhindern. Sobald der Füllstand eine voreingestellte Höhe überschreitet, wird ein Warnsignal an die SPS gegeben, die Bewegung des Rüttlers gestoppt und somit kein zusätzliches Material mehr gefördert.

Die Temperaturüberwachung am Gleichstromreaktor erfolgt durch drei auf dem Mantel angebrachte Thermoelemente. Zur Füllstandskontrolle ist in diesem Reaktor ein weiterer kapazitiver Füllstandsmelder installiert.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Die Gastemperatur und der Differenzdruck in der Rohrleitung vom Vergaser zum Kühler und somit die Kühleintrittstemperatur wird mittels eines Thermoelementes und der Druckverlust über den Reaktor mit einem Differenzdruckaufnehmer überwacht. Am Wärmeübertrager werden weiterhin die Gasaustrittstemperatur sowie die Kühlwassertemperatur und die Temperaturen der Luftvorwärmung am Ein- und Austritt gemessen. Die Einspeisung der vorgewärmten Luft ist in der zweiten Reaktorstufe installiert.

Vor dem Saugzug erfolgt die Gasdurchflussmessung sowie eine weitere Druck- und Temperaturmessung. Durch die Druckmessung kann der Druckverlust über die gesamte Anlage überwacht werden, wodurch Probleme aufgrund von Verstopfungen in der Anlage frühzeitig zu erkennen sind. Die Temperaturmessung dient zum einen der Überwachung der erforderlichen Abkühlung des Gases, zum anderen können Probleme am Wärmeübertrager (z. B. durch Anbackungen) oder mit dem Kryostaten erkannt werden.

Gasanalyse

Die Analyse der Hauptbestandteile des Gases CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂ und N₂ erfolgt mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor / Gaschromatographen (WLD / GC). Der WLD / GC ist mit zwei Trennsäulen und zwei Detektoren ausgerüstet. Über eine Pumpe wird das Gas in die beiden Säulen gefördert. In den Trennsäulen werden die Gasbestandteile entsprechend ihrer Mobilität getrennt, in den Detektoren quantitativ bestimmt und in einem Chromatogramm dargestellt. Entsprechend der Flächen der Peaks im Chromatogramm kann die entsprechende Konzentration der Gaskomponenten mit Hilfe von komponentenspezifischen Faktoren errechnet werden.

Die errechneten Konzentrationen werden im WLD-Rechner gespeichert und direkt auf dem SPS-Rechner angezeigt. Durch die kurze Analysedauer steht alle 90 Sekunden ein neuer Messwert zur Verfügung.

Prozessleitsystem

Mit der SPS werden alle durch die Messinstrumente ermittelten Daten an den PC übertragen, auf dem Bildschirm visualisiert und gespeichert. Die Steuerung der Anlage wie Vergasungsmittelzufuhr, Saugzugsteuerung und die Befüllung des Vergasers wird on-line über den PC realisiert. Die Anlage kann im Service-, Hand- oder Automatikbetrieb gefahren werden. Im Servicebetrieb können alle Anlagenkomponenten von Hand gesteuert werden, wobei die Option besteht, einzelne Komponenten automatisch zu steuern.

Die Gebläse können während aller Betriebszustände auch automatisch nach dem eingestellten Volumenstrom (Kompressor) sowie dem erwünschten Unterdruck (Saugzug) gefahren werden. Auch die Schiebersteuerung für die Schleusen DK 2 und DK 3 und die Rüttlersteuerung lässt sich einzeln über die Taktzeit betätigen. Über angeschlossene Riedkontakte werden die Stellungen der Pneumatikzylinder angezeigt.

Die Anzeige von Störungen, z.B. beim Ausfall von Aggregaten sowie beim Überschreiten von separat eingestellten Sicherheitstemperaturen, erfolgt direkt auf dem PC-Monitor. Beim Ausfall von Aggregaten ist die Sicherheitstechnik in zwei Stufen unterteilt. In der ersten Stufe erfolgt eine Warnmeldung, in der alle Komponenten zusammengefasst sind, z.B. das Förderband, bei deren Ausfall kein Sicherheitsrisiko auftritt. In der zweiten Stufe sind alle sicherheitsrelevanten Aggregate eingebunden, z.B. der Kryostat, bei dessen Ausfall eine Überhitzung des Saugzuges auftreten könnte. Beim Ausfall eines sicherheitsrelevanten Aggregates erfolgt eine Notabschaltung.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Sollte beim Überschreiten der Sicherheitstemperaturen eine Abschaltung der Anlage keinen Erfolg zeigen, das heißt nicht zu einer Temperatursenkung führen, kann die Anlage mit CO₂ geflutet werden. Der Bildschirmaufbau des Prozessleitsystems ist in Bild 5 dargestellt.

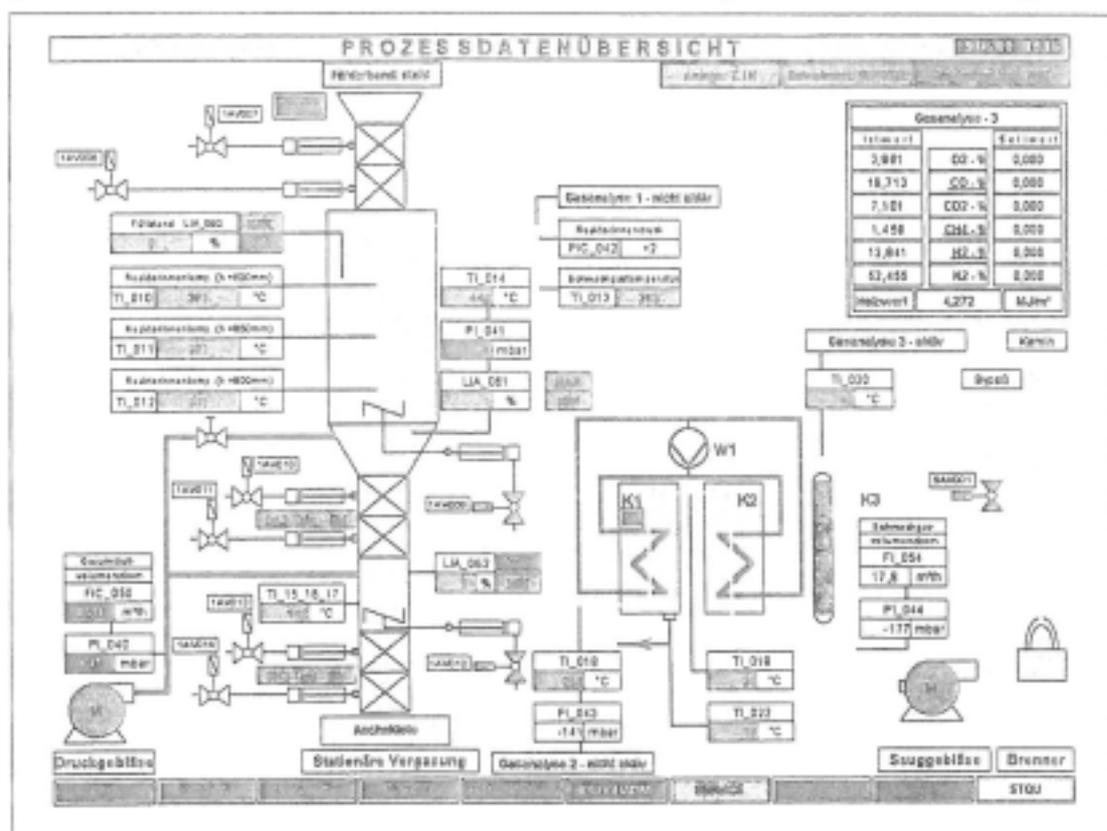


Bild 5: Bildschirm des Prozessleitsystems

5.4. Vorversuche in einer Großproben-DTA bei der Vergasung verschiedener Holzfraktionen

Die Versuche mit der Großproben-DTA sollten unter Vergasungsbedingungen durchgeführt und die Gewichtsabnahme bei verschiedenen Temperaturen aufgezeichnet sowie der entstehende Schwachgasstrom analysiert werden. Es zeigte sich jedoch, dass die bestehende Messeinrichtung die Freisetzung nur geringer Gasmengen vertragen kann. Aufgrund der hohen Ausgasung aus dem Holz und dem damit verbundenen Druckanstieg in der DTA mussten die Versuche abgebrochen werden, da eine erhebliche Schädigung des Gerätes drohte.

Die mit der DTA erwarteten Ergebnisse können aber zum Teil auch durch Versuche am Gegenstromvergaser erarbeitet werden. Hierzu wurde zunächst nur der Gegenstromvergaser, d.h. die erste Stufe des Kombi-Vergasers, aufgebaut und für entsprechende Versuche ausgerüstet und betrieben.

Durch die Versuche mit der Gegenstromstufe konnten der optimale Betriebspunkt des Anlagenteils und die Stoffströme sowie deren Zusammensetzung ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Versuchsfahrten sind im Abschnitt 6 dargestellt. Aufgrund der Versuche konnten wertvolle Erfahrungen für die Inbetriebnahme sowie den Betrieb des Kombi-Vergasers gesammelt werden.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

5.5 Aufbau und Inbetriebnahme des Kombi-Vergasers

Die im Rahmen des Projektes aufgebaute kombinierte Vergasungsanlage ist in Bild 6 dargestellt. Der Aufbau der Gesamtanlage wurde durch die für die Vorversuche aufgebaute erste Stufe erheblich vereinfacht. Es musste nur noch die zweite Stufe installiert und die Gasreinigung sowie die Steuerung angepasst werden.

Nach Abschluss des Aufbaus folgte die Kalt-Inbetriebnahme, die in verschiedene Abschnitte eingeteilt wurde.

1. Funktionstest aller mechanischen Baugruppen
2. Überprüfung aller elektrischen und elektronischen Elemente sowie der Anzeige auf dem Prozessrechner in der Leitwarte.
3. Funktionstest der SPS.
4. Überprüfung der Steuerung des Kompressors, des Saugzuges, der Schleusensysteme, der Rüttler und des Förderbandes.
5. Dichtigkeitsprüfung der Anlage.

Um die Dichtigkeit der Anlage zu testen, wird mit dem Kompressor ein Überdruck von 60 mbar erzeugt. Um den Kompressor nicht zu überlasten, wird dieser Überdruck am offenen System erzeugt, d. h. die Luft wird durch die Anlage gedrückt. Bei anstehendem Druck wird dann die Anlage auf Undichtigkeiten überprüft.

6. Kalibrierung des WLD / GC.

Zur Kalibration des WLD / GC wurde ein Prüfgas hergestellt, das der Gaszusammensetzung des Schwachgases entspricht. Das Prüfgas besteht aus 15 % H₂, 10 % CO₂, 20 % CO, 5 % CH₄ und 50 % N₂. Mit diesem Gas wurden dann Chromatogramme aufgenommen und den

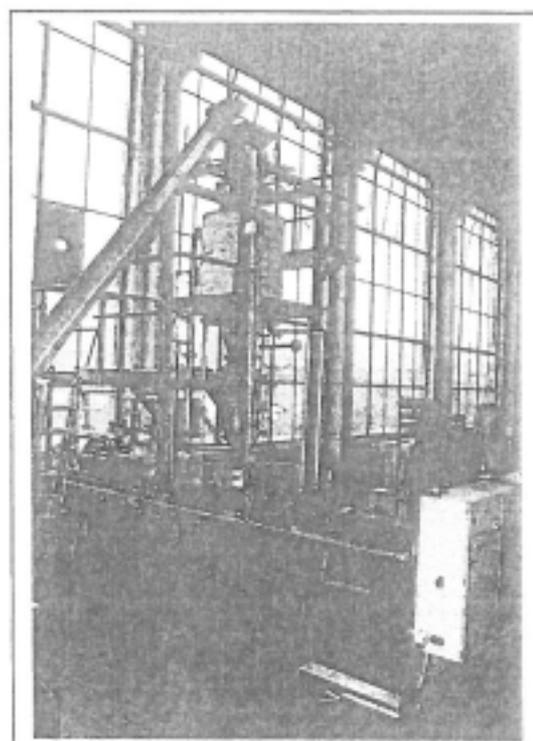


Bild 6: Der Kombi-Vergaser

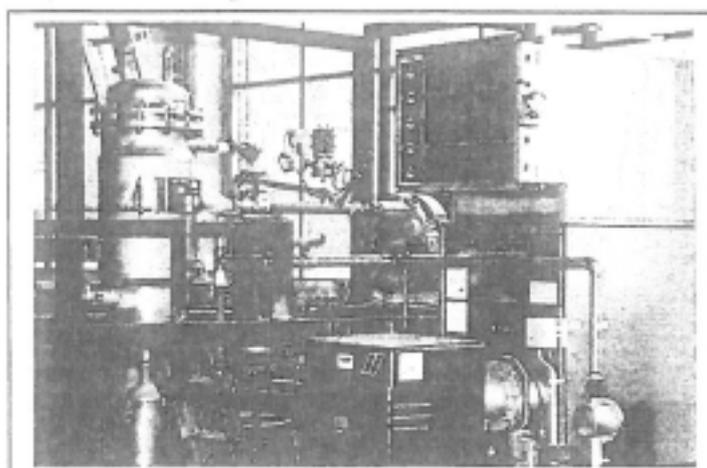


Bild 7: Gasreinigung und Brenner

Flächen unter den Peaks eine Konzentration zugeordnet.

Eine Überprüfung der Gasbrennerfunktionen konnte nicht durchgeführt werden, da der Brenner ohne Stützfeuerung arbeitet und nur mit Schwachgas betrieben werden kann.

Nach der Kalt-Inbetriebnahme wurde abschließend die Anlage isoliert.

6 Durchgeführte Versuche und Ergebnisse

Zur Substitution der Versuche mit der DTA wurden Versuchsfahrten mit der ersten Stufe des Kombi-Vergasers (Gegenstromvergaser) durchgeführt. Diese Anlage wurde so aufgebaut, dass die Gleichstromstufe nach Abschluss der Versuche nur noch einzubauen und die Steuerung sowie die Gasreinigung anzupassen waren.

Die Versuche wurden mit unbelastetem Holz durchgeführt. Als Brennstoff für die ersten Versuche ist Buchenholz eingesetzt worden. Die Stückigkeit des Holzes lag bei einer Kantenlänge zwischen 1 und 80 mm. Die Analyse des Holzes ergab folgende Zusammensetzung:

Kohlenstoff	48 %
Wasserstoff	6,2 %
Stickstoff	< 0,1 %
Sauerstoff	45 %
Schwefel	0,006 %
Asche	0,6 %
Feuchte	9,7 %
Heizwert	16.020 kJ/kg

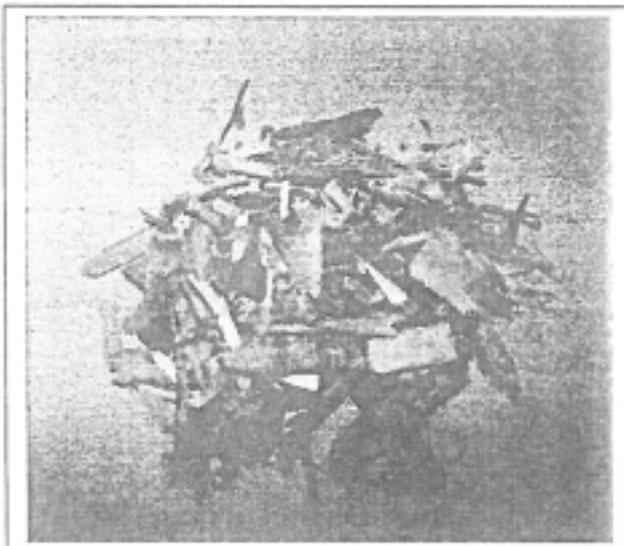


Bild 8: Darstellung der Stückigkeit des Holzes

Zum Anfahren der Vergasungsanlagen wird Holzkohle zum Glühen gebracht und in die Reaktoren gefüllt. Anschließend wird die Brennstoffschleuse (DK 1) geschlossen, Unterluft in den Reaktor gegeben und der Saugzug auf den gewünschten Unterdruck im Reaktor gefahren. Ab einer Temperatur von ca. 200 °C in der Schwachgasleitung erfolgt die Befüllung des Vergasers mit Holz.

6.1 Versuche mit dem Gegenstromvergaser

1. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 10.06.1999

Für die erste Versuchsfahrt wurde der Reaktor, wie oben beschrieben, in Betrieb genommen. Die erwartete schnelle Temperaturerhöhung wurde nicht beobachtet, weshalb mit der Befüllung des Vergasers begonnen wurde, obwohl die Temperatur in der Schwachgasleitung noch unterhalb von 200 °C war. Trotz der relativ niedrigen Reaktortemperaturen von ca. 350 °C erreichte die Zusammensetzung des Schwachgases sehr schnell die angestrebten Werte. So konnte schon nach 1,5 Stunden ein Heizwert von 4,3 kJ/m³ bestimmt werden.

In der Gaskühlung (Stahl- und Glaswärmeübertrager) wurde ein deutlicher Anfall von Kondensat festgestellt. Die Entleerung erfolgte jeweils nach optischer Kontrolle der Füllstände. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass das Kondensat an den Wänden der Glasleitungen in den Saugzug gezogen wurde.

Das Gas für die Analyse der Gaszusammensetzung wurde aus der Schwachgasleitung vor der Gaskühlungseinheit entnommen. Aufgrund des hohen Kondensatanfalls musste die Gasaufbereitung der Analyseeinheit ca. alle 2 Stunden gereinigt werden.

Nach 4,5 Stunden Versuchsdauer kam der Reaktor in Rotglut, obwohl die maximalen Temperaturen auf dem Bildschirm des Leitrechners nur 400 °C anzeigten. Hierauf wurde die Anlage sofort abgeschaltet.

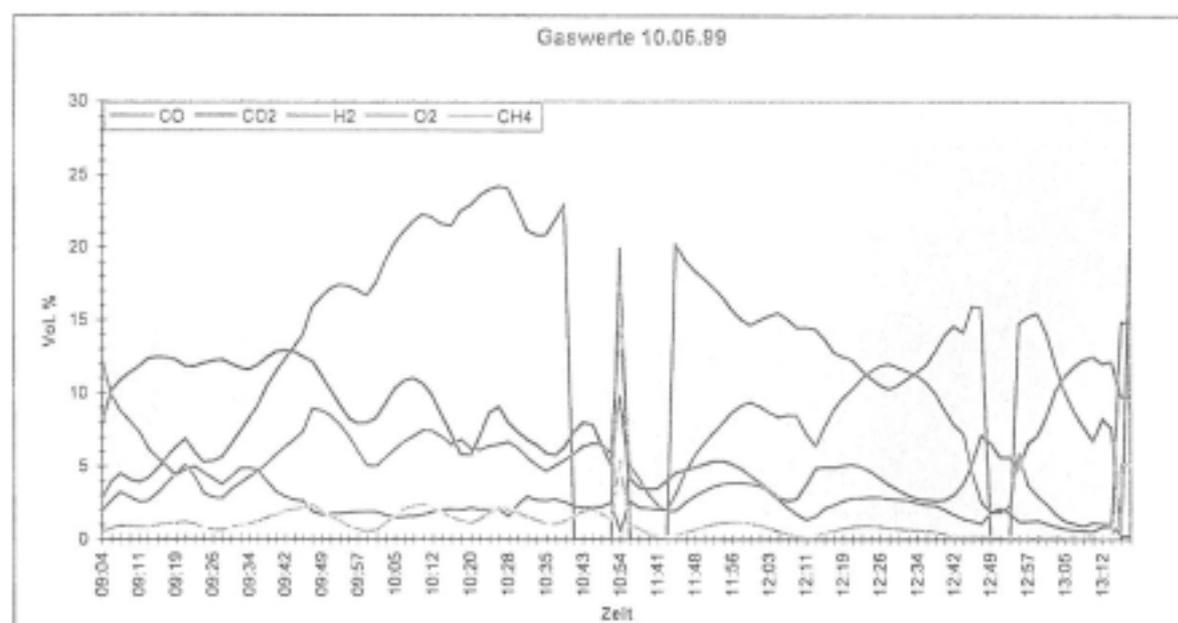


Bild 8: Verlauf der Gaswerte über die Versuchsdauer

Der Fehler bei der Temperaturmessung lag in der Programmierung der Kennlinie der Thermoelemente, der sich bei der Kalt-Inbetriebnahme noch nicht bemerkbar gemacht hatte.

Nachdem die Reaktortemperaturen auf Raumtemperatur gefallen waren, wurde der Reaktor entleert und einer Kontrolle unterzogen. Es wurden keine Beschädigungen und Ablagerungen im Reaktor, in der Schwachgasleitung oder im Stahlwärmeübertrager festgestellt. Bei der Überprüfung des Ascheauffangbehälters war nur wenig Rückstand (Asche) vorhanden. Durch das in den Saugzug gezogene, teerhaltige Kondensat war das Laufrad verklebt und konnte nicht mehr anlaufen. Der Saugzug wurde komplett zerlegt und mit Lösungsmittel gereinigt.

Verbesserung der Anlage auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem Versuch am 10.06.1999

Zusätzlich zur Gaskühleinheit wurde ein Abscheider installiert, der mit Holzhackschnitzeln gefüllt wurde. In dieser Festkörperschüttung sollte das Kondensat weitgehend an der Oberfläche des Holzes abgeschieden werden. Als weitere Maßnahme wurden die Rohrquerschnitte der Leitungen zum Saugzug erhöht.

Die Gasentnahmestelle für die on-line-Analyse wurde aus der Schwachgasleitung vor der Gaskühleinheit in die Rohrleitung vor den Saugzug verlegt, da an dieser Stelle schon der größte Teil an Kondensaten abgeschieden ist.

2. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 14.07.1999

Der Vergaser wurde ab 8:15 Uhr mit Holzkohle befüllt. Ab einer Temperatur von ca. 200 °C in der Schwachgasleitung wurde bis ca. 10:30 Uhr 19,2 kg Holz kontinuierlich in den Vergaser eingebracht.

Während des Betriebes wurde der Rüttler periodisch mit einer Zykluszeit von 1 und 2 min betrieben. Bei der erstmaligen Betätigung des Rüttlers stellten sich große Druckschwankungen (+ 65 mbar) ein, die sich aber im Verlauf des Versuches stetig verringerten.

Die Analyse mit dem GS/WLD funktionierte für die Dauer des Versuches zuverlässig. Nach 4 Stunden Betrieb war lediglich ein Filter zu wechseln, was deutlich in der Änderung der

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Gaswerte Bild 9 zu erkennen ist. Es konnte anfänglich ein Heizwert von $4,2 \text{ MJ / m}^3$ ermittelt werden, der sich im weiteren Verlauf des Versuches auf etwa $4,6 \text{ MJ / m}^3$ einpendelte.

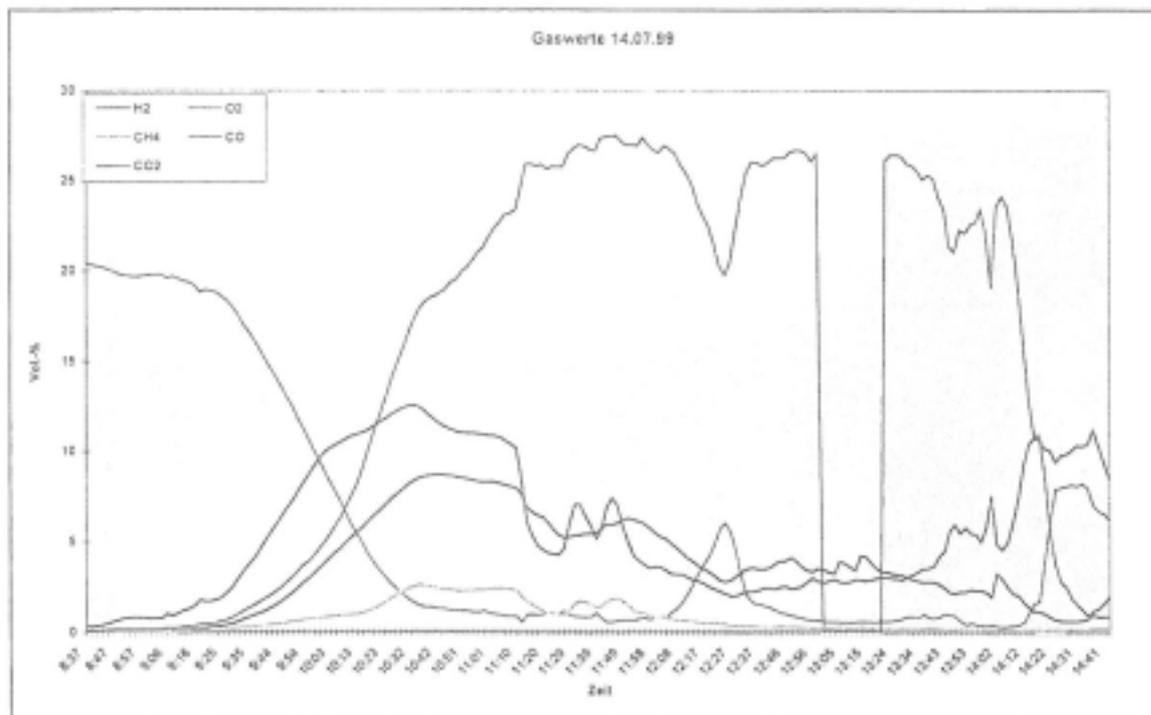


Bild 9: Verlauf der Gaswerte über die Versuchsdauer

Die letzte Befüllung des Vergasers erfolgte um 13:42 Uhr. Danach wurde die Versuchsanlage abgefahren. Der Abfahrtrieb musste eingeleitet werden, da das flüssige Kondensat die 77 cm hohe Holzschüttung im Kondensatscheider erreicht hatte und durch die nachgeschalteten Anlagenteile durchzubrechen drohte.

Das Kondensat in der Holzschüttung hatte einen höheren Wasseranteil als bei dem vorangegangenen Versuch.

Beim Abfahren wurde dem Vergaser weiterhin Luft zugeführt, was das weitgehende vollständige Abbrennen des Brennstoffbettes bewirkte. Dabei entstanden im gesamten Reaktorinnenraum Temperaturen von über 800°C . Durch den Abbrand erhöhte sich die Gastemperatur in der Schwachgasleitung kurzzeitig auf 585°C . Durch das heiße Gas wurden die Ablagerungen in den Rohrleitungen und der Gaskühler mobilisiert und damit gereinigt.

Mengenbilanz :

Input:		Output:	
Holzkohle	15,0 kg	Produktgas	$51,6 \text{ m}^3/\text{h}$
Holzchnitzel	54,6 kg	wässriges Kondensat nach Kühler 1	24,4 kg (35%)
Vergasungsluft	$23,1 \text{ m}^3/\text{h}$	Kondensat nach Kühler 2	9,2 kg (13,2%)
		davon aus Holzschüttung	1,0 kg (1,43%)
		Asche / Ausbrand	5,8 kg (8,3%)

Tabelle 7: Gegenüberstellung Input / Output

Nach Erkalten der Anlage wurde der Rost ausgebaut. Es wurde festgestellt, dass die installierte Auflage des Rüttlers auf dem Rost zu großen Reibungskräften mit hoher

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Haftreibung führte. Aufgrund des zusätzlichen Gewichtes durch die Bettschüttung verkantete und blockierte der Rüttler.

Die Inspektion des Saugzuges ergab, dass weiterhin teerhaltiges Kondensat in diesen eingedrungen war, jedoch deutlich weniger und von niedrigerer Viskosität als beim ersten Versuchslauf.

Verbesserung der Anlage auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem Versuch am 10.06.1999

Die Auflagefläche des Rüttlers auf dem Rost wurde durch Einsetzen eines Distanzringes minimiert, wodurch die Reibungskräfte deutlich reduziert wurden. Weiterhin wurde vor dem Holzfilter ein Zyklon installiert, um zusätzlich Staub und Kondensat abzuscheiden.

3. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 01.09.1999

Ziel dieses Versuches war der Test der Kondensatabscheidung und die Inbetriebnahme des Schwachgasbrenners.

Die Erwartungen bezüglich der Kondensatabscheidung konnten nicht bestätigt werden. Am Ende der Holzsäule war Schaumstoff mit einem darüberliegenden groben und einem sehr feinen Sieb gegen mögliches Verrutschen montiert. Schon zu Versuchsbeginn entstanden an dem feinen Sieb Kondensattröpfchen, die in den nachfolgenden Saugzug hineingezogen wurden. Ein Durchbruch des flüssigen Kondensates durch die Holzschüttung war nicht festzustellen.

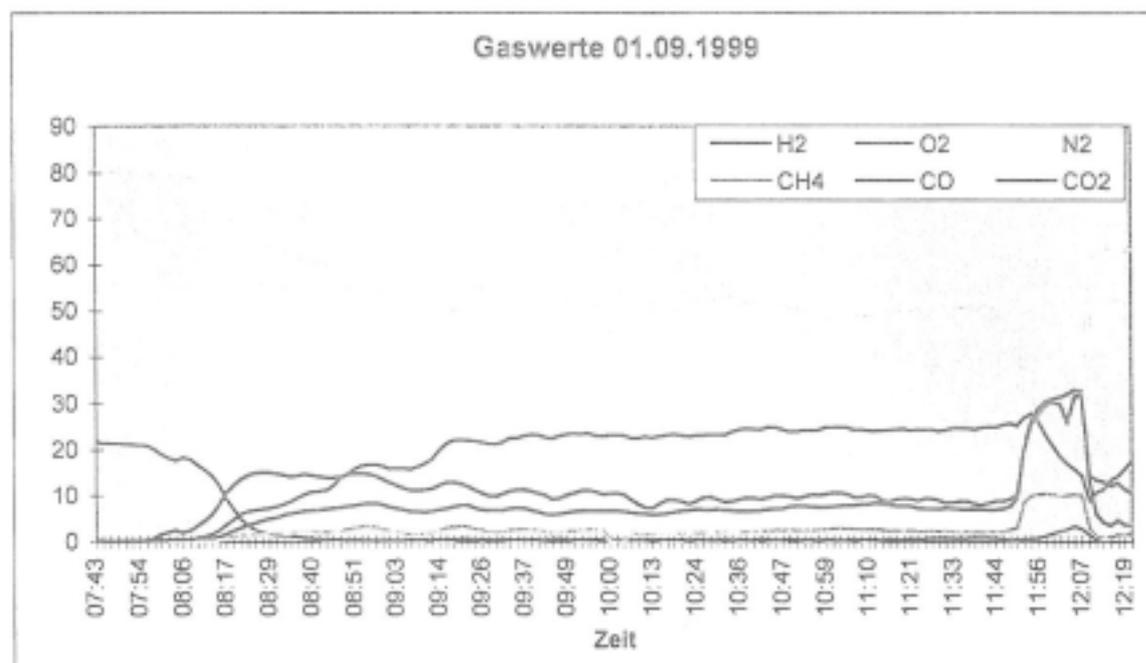


Bild 10: Verlauf der Gaswerte über die Versuchsdauer

Es wurden Gaswerte im Bereich von 4 - 4,7 MJ / m³ ermittelt. In Bild 10 ist der sehr konstante Verlauf der Gaskonzentrationen über einen Zeitraum von fast 3 Stunden zu erkennen. Während dieser Betriebszeit wurde ein Schwachgasvolumenstrom von ca. 50 m³/h gefahren.

Gegen 11.46 Uhr wurde festgestellt, dass der Saugzug ausgefallen und dadurch im Reaktor ein Überdruck von ca. 24 mbar entstanden war. Daraufhin musste der Versuchsbetrieb eingestellt werden. Weiterhin war zu diesem Zeitpunkt das flüssige Kondensat von unten her durch die Holzfüllung durchgebrochen.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Zum Abfahren der Anlage wurde der Kompressor auf eine geringere Luftmenge eingestellt und die gesamte Anlage auf Gasdurchgang geschaltet. Damit sollte ein möglichst hoher Abbrand des Brennstoffes im Vergaser erreicht werden.

Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurde der Reaktor geöffnet und inspiziert. An den Reaktorwänden war deutlich ein höherer Füllstand als in der Mitte zu erkennen. Der Reaktor war zu 75 % gefüllt. Durch stetige Betätigung des Rüttlers wurde ein gleichmäßiger Füllstand erreicht. Es waren keine Anbackungen im Reaktor zu erkennen.

Mengenbilanz :

Input:		Output:	
Holzkohle	9,0 kg	Produktgas	50 m ³ /h
Holzschnitzel	117,8 kg	wässriges Kondensat nach Kühler 1	45,4 kg
Vergasungsluft	23 m ³ /h	Kondensat nach Kühler 2	23,1 kg
		davon aus Holzschüttung	-
		Asche / Ausbrand	12,3 kg (9,7%)

Tabelle 8: Gegenüberstellung Input / Output

Zur weiteren Optimierung der Gasreinigung wurde vor dem nächsten Versuch ein zusätzlicher Kondensatabscheider direkt hinter dem Stahlwärmeübertrager installiert.

4. Versuchsfahrt: Gegenstromvergaser 22.10.1999

Ca. 1 Stunde nach dem Anfahren der Anlage wurde mit der Holzbefüllung begonnen. Die Gaswerte stiegen konstant an, so das 1,5 Stunden nach der ersten Befüllung mit Holz ein Heizwert von 4,5 MJ/m³ erreicht wurde. Dieser Heizwert konnte über 1,5 Stunden gehalten und dann sogar auf 5,4 MJ/m³ gesteigert werden. Der Vergasungsmittelstrom betrug während dieser Zeit ca. 23 m³/h, und der Schwachgasvolumenstrom lag zwischen 48 und 53 m³/h. Die Anlage wurde bei einem Reaktorunterdruck von 4 mbar und einem Holzdurchsatz von 32,2 kg/h gefahren.

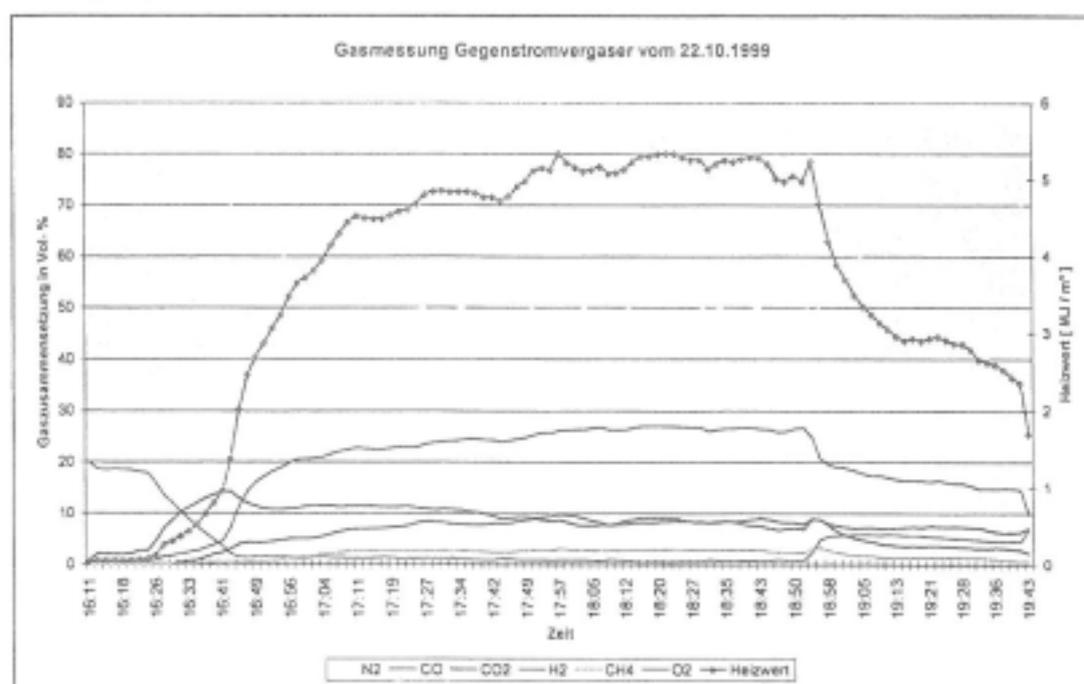


Bild 11: Gaswerte und Heizwert aus dem Versuch von 22.10.1999

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Die optimierte Kondensatabscheidung funktionierte zunächst sehr gut, so dass in den ersten drei Stunden kein Kondensattransport zum Saugzug zu beobachten war. Danach erfolgte der Durchbruch des Kondensates durch die Holzschüttung und die Verschleppung in Richtung Saugzug. Um den Saugzug nicht mit Kondensat zu belasten, was aufwendige Montage- und Reinigungsarbeiten nach sich gezogen hätte, wurde entschieden den Versuch abzubrechen.

Mengenbilanz :

Input:		Output:	
Holzkohle	9,0 kg	Produktgas	52 m ³ /h
Holzschnitzel	80,4 kg	wässriges Kondensat nach Kühler 1	kg
Vergasungsluft	24 m ³ /h	Kondensat nach Kühler 2	kg
		davon aus Holzschüttung	-
		Asche / Ausbrand	8,5 kg (10,6%)

Tabelle 9: Gegenüberstellung Input / Output

Verbesserung der Anlage auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem Versuch am 22.10.1999

Im Vorfeld des nächsten Versuches am 19.11.1999 wurden weitere Umbaumaßnahmen an der Kondensatabscheidung durchgeführt. Durch Beobachtungen beim vorhergehenden Versuch wurde festgestellt, dass es günstiger ist, die mit Holz gefüllte Glassäule von oben nach unten zu durchströmen als von unten nach oben. Durch diesen Verfahrensaufbau kann entstehendes Kondensat abtropfen, anstatt sich am Kopf zu sammeln. Dazu wurde nach dem Glaskühler (Kühler 2) eine Leitung mit Durchmesser 80 mm auf den Kondensatabscheiderkopf geführt und am unteren Ende ein zusätzlicher Kondensatablass eingebaut.

5. Versuchsfahrt Gegenstromvergaser 19.11.1999

Ziel des Versuches war die Erhöhung der Betriebsstundenzahl im Dauerversuch.

Der Vergaser wurde nach dem vorherigen Versuch nicht vollständig entleert. Daher wurde die glühende Kohle auf ein bestehendes Holzbett gegeben, wodurch erst der Durchbrand bis in die Oxidationszone erfolgen musste, bevor mit dem Befüllen mit Holz begonnen werden konnte.

Aufgrund des Umbaus konnte das entstandene flüssige Kondensat erfolgreich abgeschieden werden. Das war die Grundlage für einen ununterbrochenen Betrieb von 8 Stunden mit sehr guten Prozess- und Schwachgasparametern.

Der Befüllzyklus wurde nach der Gastemperatur in der Schwachgasleitung (TI 017) ausgerichtet. Stieg die Temperatur an dieser Messstelle auf einen Wert von 200 °C, wurde eine Schleusenfüllung Holz (ca. 2 kg) in den Vergaser eingebracht. Dadurch sank die Gastemperatur auf ca. 180 °C. Sobald die Gastemperatur wieder 200 °C erreichte, wurde die Befüllung fortgeführt. Bei entsprechender Luftzufuhr von ca. 25 m³/h konnte ein optimaler Betriebspunkt eingestellt werden. Der Heizwert des Produktgases lag im Schnitt bei 5 MJ/m³, wobei der Höchstwert 5,4 MJ/m³ erreichte.

Bei dem Versuch wurden 185,4 kg Holz in ca. 7,3 Stunden vergast. Das entspricht im Durchschnitt etwa 25,5 kg Holz / Stunde bei einer Rüttlerfrequenz von 20 Sekunden.

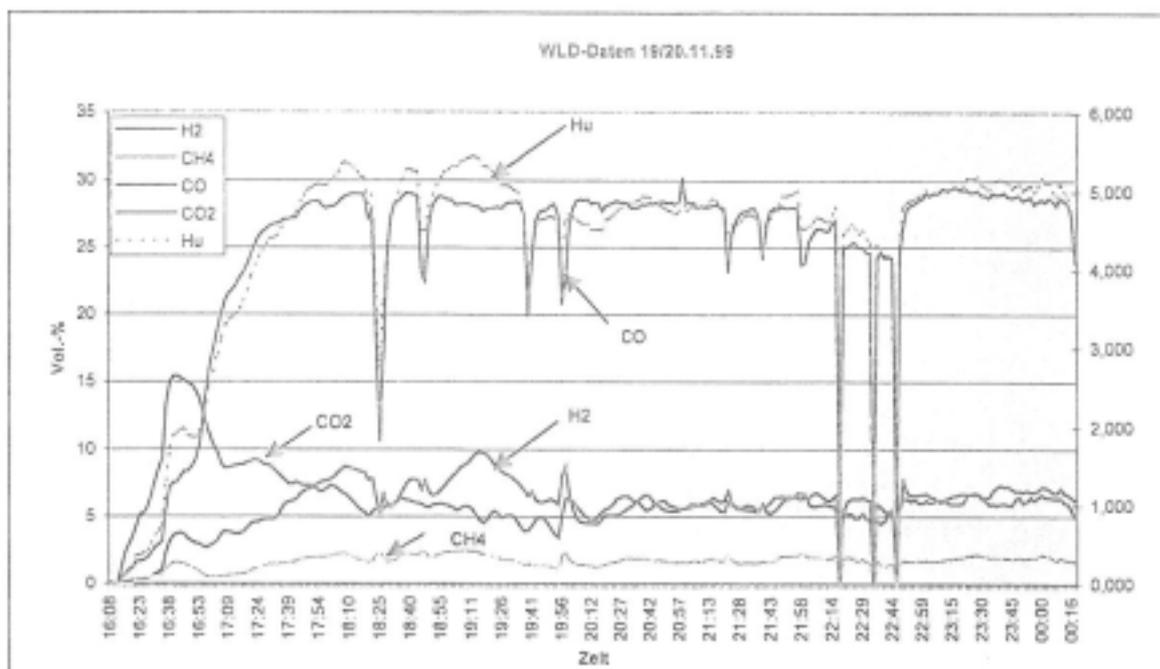


Bild 12: Gaswerte und Heizwert aus dem Versuch vom 19/20.11.1999

Bei der Befüllung traten teilweise vor dem unteren Schieber Verstopfungen durch zu große Holzstücke auf. Nach Abstellen der Luftzufuhr und Öffnen der Schieber konnten diese Verstopfungen mechanisch beseitigt werden. Dabei wurde festgestellt, dass der Vergaser zu 100 % gefüllt, aber nicht überfüllt war. Im weiteren Versuchsverlauf konnte die Rüttler-einstellung sowie die Zufuhr von Vergasungsmittel so einreguliert werden, dass der Füllstand konstant blieb.

Die Umbauten an der Gasabscheidung brachten den gewünschten Effekt. An der Reduzierung der Gasleitung hinter dem Kondensatabscheider vom Innendurchmesser 80 mm auf 25 mm entstand Kondensat. Dieses Kondensat wurde in dem nachgeschalteten Kühler abgeschieden, wodurch kein Kondensatdurchbruch in Richtung Saugzug erfolgte.

Der Abfahrbetrieb wurde eingeleitet, als der für diesen Versuch bereitgestellte Brennstoff aufgebraucht war. Bereits in den vorhergehenden Versuchen zeigte sich, dass der Abfahrvorgang nicht ganz unproblematisch ist. Damit beim Abfahren ohne Brennstoffzufuhr die Vergasertemperaturen nicht zu stark steigen, darf dem Reaktor keine Luft mehr zugeführt werden. Durch den fehlenden Sauerstoff erfolgt kein weiterer Umsatz und der Reaktor geht aus.

Mengenbilanz :

Input:		Output:	
Holzkohle	9,0 kg	Produktgas	48 m ³ /h
Holzschnittel	185,4 kg	wässriges Kondensat nach Kühler 1	kg
Vergasungsluft	23 m ³ /h	Kondensat nach Kühler 2	kg
		davon aus Holzschüttung	-
		Asche / Ausbrand	19,2 kg (10,36%)

Tabelle 10: Gegenüberstellung Input / Output

6.1.1 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit dem Gegenstromvergaser

Durch die Versuche an dem Gegenstromvergaser konnten die Daten bezüglich der mechanischen Auslegung und der entstehenden Stoffströme bestätigt werden. Aufgrund der Versuche wurden die Anlagenfahrweise und die Gasreinigung optimiert.

Der errechnete Brennstoffmassenstrom von 25,215 kg/h wurde mit 25,4 kg /h bei einem Schwachgasvolumenstrom von ca. 50 m³/h (berechnet nach Literaturangaben zu 50,43 m³/h) erreicht. Dies entspricht bei einem Heizwert des Brennstoffes von 16020 kJ/kg einer Reaktorleistung von 113 kW (Auslegungswert 100 kW).

Die berechnete Schwachgaszusammensetzung unterschieden sich jedoch von der gemessenen Zusammensetzung des Gases, wobei der Heizwert aufgrund des höheren CH₄-Gehaltes dem vorab kalkulierten Heizwert entsprach. Bei den Angaben in der Tabelle 11 handelt es sich um Daten aus der letzten Versuchsfahrt.

Bezeichnung	Berechnete Werte in Vol.-%	Gemessene Werte in Vol.-%
H ₂	23,08	6,92 – 8,99
CH ₄	1,46	2,21 – 2,88
CO	18,53	24,51 – 28,73
CO ₂	12,40	5,73 – 9,18
N ₂	36,96	48,61 – 54,11
O ₂	0	0,47 – 1,69
Heizwert	5,351 kJ/m ³	4,916 – 5,408 kJ/m ³

Tabelle 11: Vergleich der berechneten und der gemessenen Schwachgaszusammensetzung

Für den erzeugten Koks ergab sich ein Massenstrom zwischen 8,3 % und 10,36 % des eingesetzten Brennstoffes, was einem Massenstrom von ca. 2,5 kg/h entspricht.

Die Analyse des Kokses ergab die folgende Zusammensetzung:

Kohlenstoff	82,88 %
Wasserstoff	1,77 %
Stickstoff	0,32 %
Sauerstoff	12,38 %
Schwefel	0,011 %
Heizwert	29.435 kJ/kg

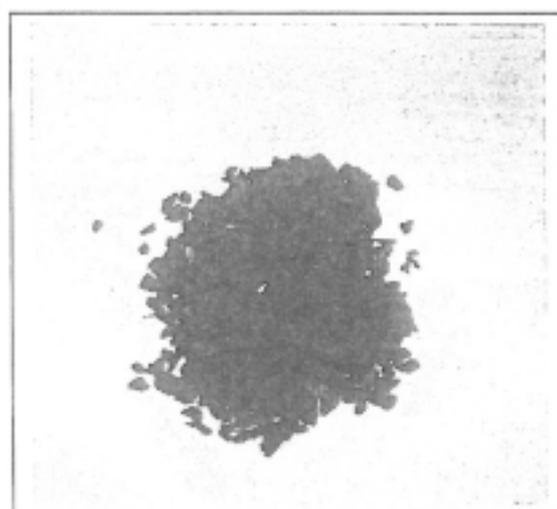


Bild 13: Stückigkeit des Kokses

6.2 Versuche mit dem Kombi-Vergaser

Für den Versuchsbetrieb der Gesamtanlage wurde der Gleichstromreaktor installiert und anhand der Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Gegenstromvergaser die Gasreinigung entsprechend angepasst sowie mit zusätzlichen Messstellen ausgerüstet. Zur Warm-Inbetriebnahme wurde zunächst die zweite Stufe (Gleichstromvergaser) auf Betriebstemperatur gebracht und dann die erste Stufe (Gegenstromvergaser) angeheizt. Die Menge an Vergasungsmittel sowie die Betriebsparameter für die erste Stufe wurden aus den Versuchen mit dem Gegenstromvergaser übernommen. Die Betriebsparameter für die zweite Stufen sind an den Versuchsverlauf angepasst worden.

1. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 07.04.2000

Zuerst wurde die zweite Stufe in Betrieb genommen. Hierzu erfolgte die Füllung des Reaktors mit Koks aus den vorherigen Gegenstromvergaserexperimenten, dem dann Energie zugeführt wurde, bis die Reaktortemperatur ca. 400 °C betragen. Anschließend erfolgte die Zündung des Gegenstromreaktor mit Holzkohle.

Während des Anfahrens der ersten Stufe ging die Temperatur des Gleichstromreaktors (2.Stufe) jedoch stark zurück, was zu einer erheblich Kondensatbildung führte. Im weiteren Versuchsverlauf stellte sich heraus, dass der Saugzug wegen des unerwartet geringen Druckverlustes der zweiten Stufe zu groß dimensioniert wurde, wodurch die automatische Unterdruckregelung nur schleppend und sehr träge ansprach. Deshalb wurde der Saugzug manuell, unterhalb des optimalen Betriebspunktes des Saugzugmotors geregelt. Dadurch kam es zur Überhitzung und zum Ausfall des Aggregates.

Nach dem Ausfall des Saugzuges musste der Versuch abgebrochen werden. Die Überhitzung des Saugzuges und die bis zu diesem Zeitpunkt entstandenen großen Kondensatmengen machten ein erneutes Anfahren des Saugzuges unmöglich. Bei Abfahren des Vergasers wurden die Reaktoren weitgehend leer gefahren, um bei den folgenden Versuchen die gleiche Anfahroutine anwenden zu können. Die letzte Befüllung des Vergasers fand 1,5 Stunden nach Versuchsbeginn statt.

Verbesserung der Anlage auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem Versuch am 07.04.2000

Zur Erhöhung des Druckverlustes der Anlage und zur besseren Abscheidung des Kondensates wurden in die Gasreinigung vor dem zweiten Wärmeübertrager ein Drosselventil und in den zweiten Wärmeübertrager ein Glasfaserfilter eingebaut.

Zudem wurde ein Bypass um den Saugzug installiert, der bei Unterschreiten der Mindestdrehzahl öffnet, damit die Regelcharakteristik des Saugzuges erhalten bleibt. Durch diesen Bypass wird Produktgas im Kreis geführt.

2. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 17.04.2000

Das Anfahren der Anlage erfolgte wie beim Versuch am 07.04.2000. Bei der Inbetriebnahme konnte eine stetige Temperaturerhöhung in beiden Reaktoren beobachtet werden. Ab einer ausreichenden Temperatur wurde dann Holz in den ersten Reaktor eingefüllt.

Nach den ersten Befüllungen konnte ein kontinuierlicher Anstieg des Schwachgasheizwertes beobachtet werden. Um ca. 9:30 zeigten sich an einem Kühler der Gasreinigung Risse, was ein sofortiges Abschalten der Anlage notwendig machte.

3. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 25.04.2000

Das Anfahren der Anlage erfolgte wie bereits beschrieben.

Der Einbau des Drosselventils in die Gasreinigungsstrecke wirkte sich vorteilhaft aus. Zum einen war es dadurch immer möglich, den Saugzug in einem stabilen Betriebspunkt zu betreiben, zum anderen bewirkte die Querschnittsverengung eine hohe Kondensatabscheidung innerhalb der Gasreinigung.

Im Betrieb ergaben sich mechanische Probleme mit der Dichtigkeit der Schieberklappen, die bei höheren Temperaturen nicht ausreichend dicht schlossen. Ein weiteres Problem trat durch die Undichtigkeit des Schleusensystems (DK 3) auf. Dadurch war der Sauerstoffgehalt des Schwachgases zu hoch und während des gesamten Versuches im kritischen Bereich. Auch durch das Schleusensystem (DK 1) wurde unkontrolliert Sauerstoff in den Prozess eingetragen. Zudem konnte der erforderliche Brennstoffstrom zum vollständigen Befüllen des Gegenstromreaktors nicht erreicht werden.

Nach 2 Stunden Versuchsdauer zeigte sich, dass der Mantel des Gleichstromreaktors rot glühte, die am Reaktormantel installierten Thermometer aber nur Temperaturen um 450 °C anzeigten. Daraufhin wurde die Luftzufuhr in den zweiten Reaktor sofort unterbunden, und die Temperaturen sanken sofort. Vorteilhaft war, dass bei den hohen Temperaturen kaum teerhaltiges Kondensat gebildet wurde. Hierdurch zeigt sich indirekt, dass die hochmolekularen Kohlenwasserstoffe aus der Gegenstromstufe gecrackt wurden. Um den geforderten Unterdruck von 6 mbar im ersten Reaktor aufrecht zu erhalten, musste die Leistung des Saugzuges permanent erhöht werden. Gegen Ende des Versuches lag der Unterdruck hinter dem zweiten Reaktor bei ca. -200 mbar, ohne Gegendruck des Druckgebläses. Aufgrund des hohen Unterdruckes konnte das entstandene Kondensat nicht mehr abgelassen werden.

Im weiteren wurde festgestellt, dass der Rüttler des zweiten Reaktors nicht mehr die volle Bewegung ausführte, so dass ein kontinuierlicher Brennstofffluss nicht mehr gewährleistet war.

Aus diesen Gründen wurde die Anlage nach ca. 9 Stunden abgefahren. Nach Abkühlung der Anlage auf Raumtemperatur erfolgte die Demontage des Gleichstromreaktors. Dabei stellte sich heraus, dass die Temperaturen der Anlage während des Betriebes über dem Schlackeerweichungspunkt gelegen haben müssen. Es sind Proben vom Koks sowie den geschmolzenen Rückständen genommen worden und eine Bestimmung des Schmelzverhaltens nach DIN 51 730 durchgeführt. Die Untersuchung ergab, wie deutlich an den Verlaufs Bildern zu sehen ist, dass die Temperaturen im Reaktor über 1380 °C gelegen haben. Der Asche ist bei diesen Temperaturen in der Oxidationszone geschmolzen und am Rost wieder kondensiert. Dadurch konnte der Rüttler nicht mehr die erforderliche Bewegung ausführen, d. h. die Schlacke wurde nicht mehr abgeführt und der Druckverlust stieg drastisch an.

Die Kontrolle des Gegenstromreaktors, des Rostes und der Rüttlereinheit ergab keine Beschädigung dieser Bauelemente. Die Anlage wurde gereinigt und für den nächsten Versuch vorbereitet.

Die Thermoelemente wurden jedoch neu geeicht und von der Reaktorwand in den Gegenstromreaktor versetzt. Dadurch konnten in den folgenden Versuchen die Temperatur des Kokses unterhalb der Oxidationszone gemessen werden.

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Um die Undichtigkeit des Schleusensystems DK 3 zu minimieren wurde eine Aschekiste unter dem Schleusensystem installiert. Die Aschekiste kann während des Versuches zur Entleerung einfach demontiert werden.

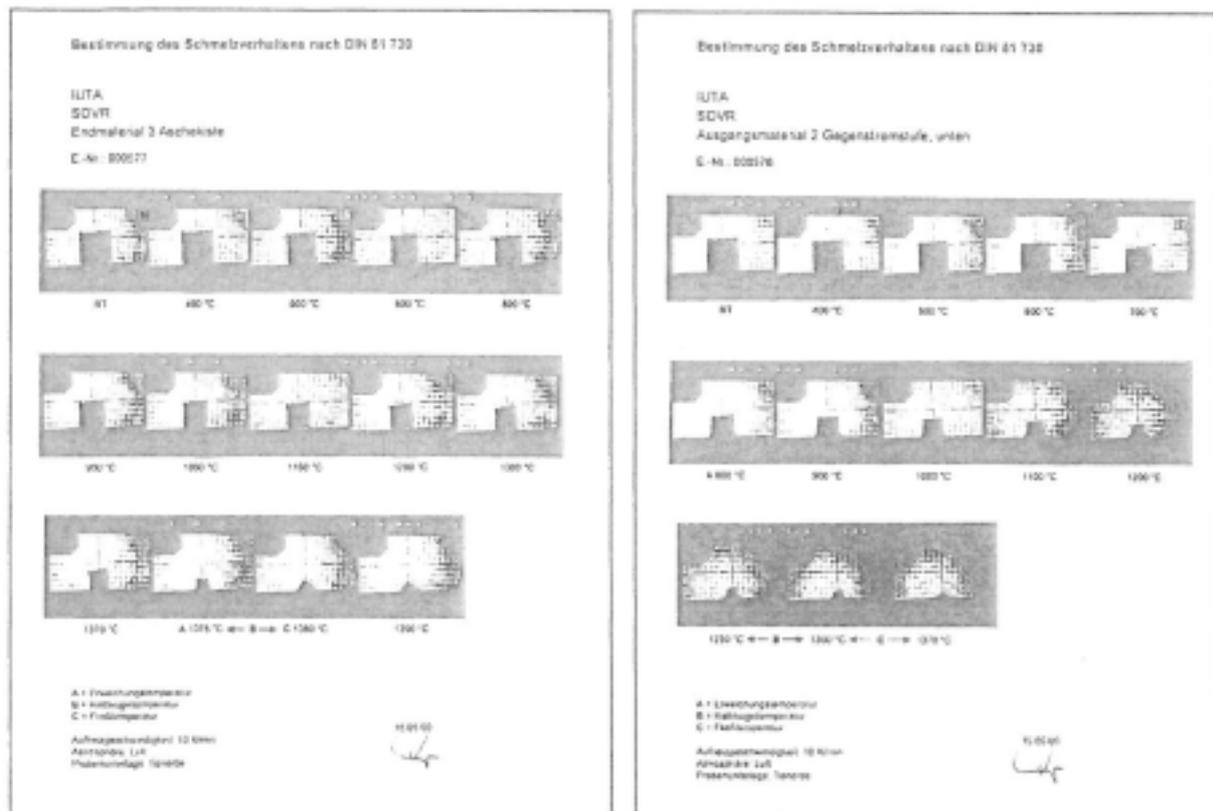


Bild 14: Bestimmung des Schmelzverhaltens nach DIN 51 730

Um zusätzliche Informationen über die Prozessabläufe vor allem in der ersten Stufe zu erhalten, wurde in die Schwachgasleitung zwischen der 1. und 2. Vergaserstufe ein O₂- und ein CO₂-Messgerät installiert. Hierdurch war es möglich, die Umsetzung des Sauerstoffes in der ersten Stufe genauer zu beobachten.

4. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 19.06.2000

Da der Gegenstromreaktor nach der letzten Versuchsfahrt nicht vollständig entleert werden konnte, erfolgte das Anfahren der ersten Stufe mit einem zu ca. 60 % gefüllten Reaktor. Im weiteren wurde die Anlage, wie bereits beschrieben, in Betrieb genommen.

Aufgrund der schon vorhandenen Füllung des Gegenstromreaktors wurde die erforderliche Vergasungstemperatur in dieser Stufe nicht so schnell erreicht wie im Gleichstromreaktor. Während des Anfahrens der Reaktoren war zu beobachten, dass sich bei einer Durchschnittstemperatur von ca. 500 °C in der zweiten Stufe ein Schwachgas mit einem Heizwert von 3,2 MJ/m³ bildete, obwohl die Gegenstromstufe aufgrund der zu niedrigen Temperaturen noch kein Produktgas liefern konnte. Da in der ersten Stufe noch kein Koks gebildet wurde, konnte der Gleichströmer (2. Stufe) nicht mit Koks befüllt werden. Aufgrund des fehlenden Brennstoffes in die zweite Stufe, gingen hier die Temperaturen mit zunehmender Versuchsdauer zurück.

Dieses alternierende Verhalten setzte sich während des gesamten Versuches fort, so dass es nur für einen kurzen Zeitraum gelang, beide Stufen gleichzeitig in einem stabilen

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Betriebspunkt zu fahren. Während dieser Zeit lag der Heizwert des Schwachgases bei $4,3 \text{ MJ/m}^3$.

Im weiteren zeigte sich, dass die Koksmenge im Gleichstromreaktor trotz intensiven Rüttlereinsatzes nicht mehr abgebaut wurde und der Druckverlust über die Anlage stetig anstieg. Daher wurde die Anlage nach 8 Betriebsstunden abgefahren.

Bei der Revision der Anlage wurde festgestellt, dass die Schubstange des Rüttlers gebrochen war. Daher war der Transport der Asche am zweiten Rost nicht mehr gewährleistet. Durch den ständigen Nachschub von Koks aus der ersten Stufe wurde der Gleichstromreaktor überfüllt.

Die Auswertung der Versuchsdaten ergab, dass der Sauerstoffgehalt im Schwachgas mit durchschnittlich 2,3 % zwar gegenüber den vorherigen Versuchen gesenkt werden konnte, aber für einen kontinuierlichen und sicheren Betrieb immer noch zu hoch war. Es zeigte sich jedoch auch, dass der Sauerstoffwert auf unter 1 % sinkt, wenn der Gleichstromreaktor in einem stabilen Betriebspunkt arbeitet.

Das Kondensat weist je nach Betriebszustand des Gleichstromreaktors eine unterschiedliche Zusammensetzung und Konsistenz auf. Während bei Temperaturen im Gleichstromreaktor über $500 \text{ }^\circ\text{C}$ das Kondensat sehr dünnflüssig war und hohe Anteile an Staub enthielt, war es bei niedrigeren Temperaturen mit geringem Staubanteil zähflüssiger.

Für den folgenden Versuch wurden das Antriebssystem des Rüttlers und der Durchmesser sowie die Höhe der Vergasungsmittleitung am zweiten Reaktor geändert. Anstatt des bisherigen Rüttlerantriebes über eine Umlenkstange wurden zwei pneumatisch getriebene Umlenkstangen eingebaut. Hierdurch wird das Kippmoment in den maximalen Auslenkpunkten durch eine gleichmäßig eingebrachte Kraft minimiert. Um die Verweilzeit des Schwachgases und des Sauerstoffes zu erhöhen, wurde der Reaktordurchmesser auf 300 mm erhöht und die Ringleitung um 150 mm höher angesetzt. Zudem ist eine weitere Leitung eingebaut worden, um das Vergasungsmittel oberhalb des Reaktors zugeben zu können.

Im weiteren wurde das Brennstoffschleusensystem DK 1 ausgewechselt. Die neuen Flachschieber sollten zum einen eine höhere Dichtigkeit, zum anderen einen höheren Brennstoffmassenstrom gewährleisten.

5. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 13.08.2000

Zu Beginn des Versuches war der Gegenstromreaktor wieder zu 2/3 befüllt. Aufgrund der Erkenntnisse aus der letzten Versuchsfahrt wurde der Gegenstromreaktor zuerst angeheizt. Bei einer Temperatur von knapp 300 °C im Gegenstromreaktor wurde die zweite Stufe angefahren. Dass zunächst kein stationärer Betrieb erreicht wurde, lag an mechanischen Problemen des Saugzuges. Dies ist deutlich im Diagramm der Gaswerte zu sehen. Im weiteren war zu beobachten, dass die Temperaturen im Gleichstromreaktor zwischen 200 und 600 °C schwankten. Die Schwankungen der Temperatur und damit auch der Gaszusammensetzung spiegeln sich auch in der Zusammensetzung des Kondensates in der Gasreinigungseinheit wieder.

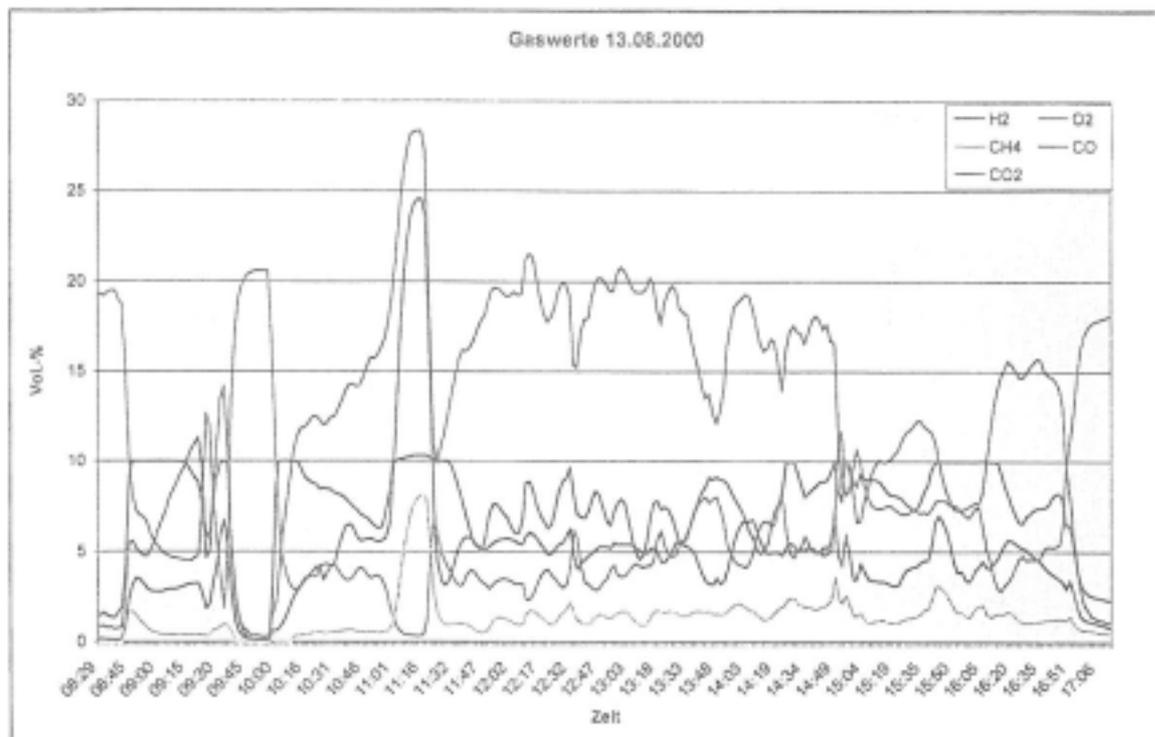


Bild 15: Gaswerte der Versuchsfahrt vom 13.08.2000

Nach 6,5 Stunden Versuchszeit fiel das Druckgebläse aus, was an dem deutlichen Einbruch der Gaswerte (Bild 15) zu erkennen ist. Die Behebung des Fehlers dauerte ca. eine Stunde, in der die Vergasungsluft über den Saugzug in die Reaktoren gezogen wurde. Aufgrund des hohen Unterdrucks in der Anlage (-80 mbar) wurde zusätzlich Luft in die Anlage gezogen, wodurch der Sauerstoffwert auf über 6 % stieg. Nachdem das Druckgebläse wieder in Betrieb war, konnte der Sauerstoffgehalt nur unzureichend auf ca. 4 % gesenkt werden. Daher wurde beschlossen, die Anlage abzufahren.

6. Versuchsfahrt Kombi-Vergaser 27.08.2000

Aus den Messwerten der letzten Versuche ist zu entnehmen, dass es erforderlich ist, im Gleichstromreaktor ausreichend hohe Temperaturen zu erzielen, bevor der Gegenstromreaktor in Betrieb genommen wird. Daher wurde vor dem Zünden der ersten Stufe der Gleichstromreaktor auf eine Durchschnittstemperatur von 800 °C vorgeheizt. Anhand der Gaswerte ist abzuleiten, dass zunächst eine deutliche Vergasungsreaktion im Koks des Gleichstromreaktors erfolgte. Nachdem die erste Stufe Gas lieferte, war ein deutlicher Anstieg der Gasmenge und des Gasheizwertes zu erkennen. In der Gasreinigung entstand zu dieser

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Zeit nur sehr wenig Kondensat, das praktisch keine hochmolekularen Kohlenwasserstoffe enthielt. Der Heizwert des Gases stieg bis auf 4 MJ/m^3 .

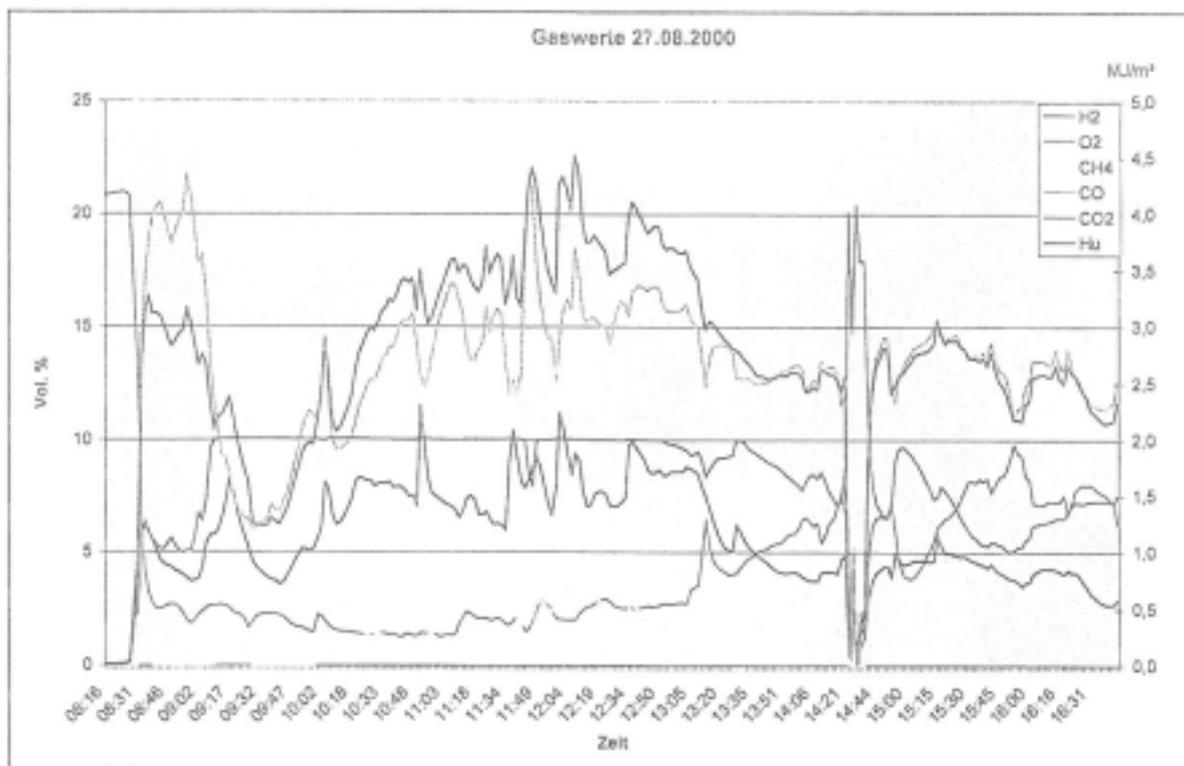


Bild 16: Gaszusammensetzung und Heizwert des Versuches vom 27.08.2000

Anhand der aufgezeichneten Messwerte war jedoch auch zu erkennen, dass die Temperaturverteilung im Gleichstromreaktor inhomogen war und nach ca. 5 Stunde nicht mehr konstant auf einer Temperatur über $800 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten werden konnte. Zugleich wurde beobachtet, dass der Schwachgasvolumenstrom zwischen der beiden Reaktoren deutlich zurückging und der Sauerstoffgehalt deutlich anstieg. Die Folge war ein Abfall des Heizwertes auf $2,5$ bis 3 MJ/m^3 und eine sichtbare Verschlechterung der Kondensatqualität sowie ein Anstieg der Kondensatmenge.

Da alle Bemühungen, die Undichtigkeit in der Anlage zu finden, scheiterten, wurde die Anlage gegen 17:00 abgefahren. Der Brennstoffdurchsatz bis zum Zeitpunkt des Abfahrens betrug ca. 16 kg/h .

Nach dem Auskühlen der Anlage wurde eine Revision durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass sich im zweiten Reaktor am Schwachgaseinlass eine Koksbrücke gebildet hatte, die zum einen den Brennstofffluss behinderte, wodurch eine gleichmäßige Temperaturführung verhindert wurde, zum anderen den Gaseinlass verschloss, wodurch der Schwachgasstrom nicht mehr in den Reaktor gelangen konnte, sondern durch das Schleusensystem DK 2 abgesaugt wurde.

6.3 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit dem Kombi-Vergaser

Die Inbetriebnahme des kombinierten Gleichstrom-/ Gegenstromvergasers gestaltete sich erwartungsgemäß komplizierter als die des Gegenstromvergasers. Für einen optimalen Betrieb der gesamten Anlage ist die richtige zeitliche Abstimmung der Inbetriebnahme der beiden Reaktoren sowie die Prozessführung in einem stationären Temperaturbereich von entscheidender Bedeutung. Dass mit dieser Anlagenkonfiguration ein relativ teerfreies Gas

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

produziert werden kann, konnte in der letzten Versuchsfahrt bewiesen werden. Jedoch sind weitere Anstrengungen notwendig, um den Heizwert und die Betriebszeiten zu steigern.

Der während der Versuche gemessene hohe Sauerstoffanteil im Schwachgas konnte zum einen auf Undichtigkeiten in der Anlage oder auf eine unzureichende Umsetzung in der Oxidationszone des Gleichstromreaktors hindeuten. Daher war es notwendig zunächst Undichtigkeiten auszuschließen, bevor eine Änderung der Vergasungsmittelzufuhr erfolgte.

Ein optimaler Betrieb ist nur zu gewährleisten, wenn alle Nebenaggregate die geforderten Leistungsdaten erfüllen. Probleme bereiteten vor allem die Schiebersysteme. Die geforderte Dichtigkeit am Schiebersystem DK 1 und DK 3 sowie der Brennstoffdurchsatz am Schiebersystem DK 1 war nicht immer gewährleistet. Diese Schwachstellen im System konnten behoben werden. Ein weiteres Problem stellte die Bestimmung des Füllstandes in den beiden Reaktoren dar. Durch den Austausch der kapazitiven Füllstandsmelder gegen Drehflügelmelder konnten auch diese Schwierigkeiten zumindest zum Teil behoben werden. Eine Beurteilung der Füllung im Reaktor ist aber auch mit diesen Meldern schwierig, da sie nur ein Signal für „Voll“ oder „Leer“ liefern und keine darüber hinaus gehende Differenzierung erlauben.

Nach den ersten Versuchen wurden einige mechanische Probleme behoben. Es wurde jedoch deutlich, dass die Vergasungsmittelzufuhr im Gleichstromreaktor zu tief angeordnet war und die Schwachgasverweilzeit nicht ausreichte. Daher wurde der Reaktordurchmesser vergrößert und die Luftzufuhr nach oben versetzt. Diese Maßnahmen erbrachten eine deutliche Verbesserung der Schwachgaswerte. Im weiteren war der Betrieb der Reaktoren zueinander zu optimieren. Das heißt, die Verweilzeit und die Vergasungsmittelzufuhr in den beiden Reaktoren mussten aufeinander abgestimmt werden. Die Verweilzeit und die Temperaturführung in der ersten Stufe konnte aus den Versuchen mit dem Gegenstromvergaser abgeleitet werden, so dass nur eine Anpassung der Reaktionsbedingungen auf die zweite Stufe erfolgen musste.

Während des Versuches am 27.08.2000 war es möglich, beide Reaktoren stationär bei gleichbleibend hohen Temperaturen zu betreiben. Der bei diesem Versuch gemessene Sauerstoffanteil im Schwachgas von 1 bis 2 % war auf eine nicht zu lokalisierende Undichtigkeit in der Gasanalyseeinheit zurückzuführen. Daher liegt der Heizwert von $4,2 \text{ MJ/m}^3$ auch höher, wenn der durch die Undichtigkeit erhöhte Sauerstoff- und Stickstoffwert herausgerechnet wird. Anhand der sehr geringen Kondensatmenge, die kaum hochmolekulare Kohlenwasserstoffe enthält, ist ein sehr guter Betrieb zu dokumentieren.

Die nach drei Stunden gemessenen hohen Sauerstoffwerte und die damit auch deutliche Verschlechterung des Kondensates ist auf eine Überfüllung und die damit einhergehende Brückenbildung am Gaseinlass der zweiten Stufe zu begründen. Damit waren die erforderlichen Reaktortemperaturen nicht mehr gleichmäßig zu halten, und der Versuch musste abgebrochen werden.

Im durchgeführten Forschungsvorhaben wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit diesem zweistufigen Vergasungssystem ein Gas zu produzieren, welches ohne aufwendige Gasaufbereitung einem Motor zugeführt werden kann. Es sind jedoch noch weitere Arbeiten notwendig, um die Betriebsstunden sowie die Betriebssicherheit der Anlage und den Heizwert des Gases deutlich zu steigern. Dies beinhaltet auch eine Steigerung der Gesamtleistung der Anlage von derzeit $71 \text{ kW}_{\text{th}}$ auf die ausgelegte Leistung von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$.

7 Ergebnisse

Im Rahmen diese Forschungsvorhabens wurde ein Verfahren konzipiert, aufgebaut und getestet, in dem die Prinzipien der Gegenstrom- und der Gleichstromvergasung kombiniert sind. Die Verschaltung erfolgt so, dass im ersten Reaktor die Vorteile der Gegenstromvergasung (gutes scale up Vermögen, breites Stückigkeitsspektrum) und im zweiten Reaktor die Vorteile der Gleichstromvergasung (geringer Gehalt an hochmolekularen Kohlenwasserstoffen, hohe Kohlenstoffumsetzung) genutzt werden.

Ausgangspunkt für die Auslegung und Konstruktion des Kombi-Vergasers und seiner Anlagenkomponenten waren in erster Linie die Ergebnisse mathematischer Berechnungen, thermodynamischer Gleichgewichtsbetrachtungen und Stoffbilanzen. Auf der Grundlage dieser Berechnungen erfolgte die detaillierte Konstruktion der Vergasungsanlage sowie die Auslegung aller zusätzlich benötigten Aggregate.

Die Vergasungsanlage besteht aus:

- Kompressoreinheit zur Versorgung der Reaktoren mit Vergasungsmittel.
- Doppelpendelklappensystem Nr.1 zur Brennstoffbeschickung und zur Vermeidung von Lufteinbrüchen.
- Reaktor Nr.1 (Gegenströmer, $\varnothing = 600$ mm, $h = 900$ mm) mit Rost, Kegel und Rüttler zum Kokstransport sowie Vergasungsmittelleitung unter dem Rost und in den Kegel.
- Doppelpendelklappensystem Nr.2 zum Kokstransport in den 2. Reaktor und zur Vermeidung von Vergasungsmittelverschleppungen aus dem 1 Reaktor in den 2. Reaktor.
- Reaktor Nr.2 (Gleichströmer, $\varnothing = 200$ mm, $h = 400$ mm) mit Rost, Kegel und Rüttler zum Aschetransport sowie Vergasungsmittelleitung oberhalb des Rostes
- Schwachgasleitung als Verbindung der beiden Reaktoren.
- Doppelpendelklappensystem Nr.3 zum Ausschleusen der Asche und zur Vermeidung von Lufteinbrüchen.
- Gasreinigungseinheit bestehend aus 2 Wärmeübertragern und 1 Zyklonabscheider.
- Saugzug zum Absaugen des Produktgases aus der Anlage und Zufuhr des Gases zum Gasbrenner
- Gasbrenner zur thermischen Nutzung des Gases.

Die Inbetriebnahme des kombinierten Gleichstrom-/ Gegenstromvergasers verlangt die Abstimmung des Anfahrverhaltens der beiden Reaktorkomponenten. Neben dem Ziel eines stabilen stationären Betriebsverhaltens ist das Erreichen eines optimalen Betriebszustandes eine Herausforderung an die Prozessführung. Das dazu notwendige Expertenwissen konnte während der durchgeführten Versuchsfahrten ständig verbessert und die Anlagentechnik kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Ein wesentliches Ergebnis ist die Realisierung einer exakten Abstimmung der Verweilzeit in den Reaktoren und die Zufuhr des Vergasungsmittels. Die Reproduzierbarkeit dieser Anpassung konnte in den fortlaufenden Versuchen bestätigt werden.

Die Ergebnisse der Versuche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Brennstoffdurchsatz in stationärem Betrieb ca. 25 kg/h
- Temperaturen im Reaktor Nr.1 750 °C bis 800 °C
- Sauerstoffgehalt in der Schwachgasleitung 0,4 bis 0,8 % bei ca. 250 °C
- Temperaturen im Reaktor Nr.2 800 °C bis 1000 °C
- Heizwert des Schwachgases 4,3 MJ/m³ bei ca. 2 % Sauerstoffgehalt
- Sehr niedriger Gehalt an hochmolekularen Kohlenwasserstoffen

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurden die Betriebsbedingungen ermittelt, unter denen ein praktisch von hochmolekularen Kohlenwasserstoffen freies Produktgas erzeugt werden kann. Mit diesem Gas ist der Betrieb eines Gasmotors durchaus möglich.

Um diese Technik in einem Unternehmen wirtschaftlich betreiben zu können, müssen weitere Anstrengungen hinsichtlich der Standzeit und der Betriebssicherheit unternommen werden. Daneben besteht noch Potenzial in der Steigerung des Heizwertes und der Leistung der Anlage.

8. Literatur

- (Bae1988) H. D. Baehr: Thermodynamik, Springer Verlag, Berlin, 1988
- (Bos1965) F. Bosjakovic: Wärmediagramme für Vergasung, Verbrennung und Rußbildung, Springer-Verlag, Berlin, 1956
- (Boss1982) U. Bossel: Wärme aus Holz, C. F. Müller, Großdruckerei und Verlag GmbH, Karlsruhe, 1982
- (BTG1995) Biomass Technology Group BV (BTG), Development of standard procedures for gas quality in biomass gasifier/power generation systems, final report of the EWAB and EC Joule proj. JOU2-CT93-0408, Enschede (Netherlands), June 1995
- (Bru1994) W. Brunner: Vergasung von Biomasse, ein zukunftsweisender Weg der Energieerzeugung. Umwelttechnik GmbH, Marienbab, 1994
- (Büh1994/1) R. Bühler: Europäische Holzvergasungsanlagen. Referat Holzvergasungs-Forum Châtel-St.-Denis, 1994
- (Büh1994/2) R. Bühler: Stand der Technik von Holzvergasungsanlagen. Vortrag auf der ENET Tagung, Zürich, 1994
- (Büh1998/1) R. Bühler: Vierjahresplan Vergasung 1998 – 2001, Bundesamt für Energie, Schweiz, März 1998
- (Bül1998/2) R. Bühl: Stand und Verbreitung der Holzvergaser-Technik, 1. Fachsymposium mit Ausstellung, Stand der Holzvergaser-Technik – Ist die Marktreife schon gegeben?, 10. Dezember 1998
- (Des1981) R. Desroisiers: Thermodynamics of Gas-Char Reaktionen in: Biomass Gasification, Principles and Technology, (Hrsg. Solar Energy Research Institute (SERI)), Noyes Data Corporation, New Jersey USA, 1981
- (Die1995) R. Dieckmann: Energetische Nutzung von Holz, Einsatz von Vergasungsanlagen. VDI-Berichte Nr. 1182, S. 201-207, 1995
- (Dub1990) H. Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau Springer-Verlag, Berlin, 1990
- (Eas1994) Easymod: Ein Angebot zur thermischen Abfallbehandlung. Firmenschrift, 1994
- (Els1973) N. Elsner: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Bertelsmann Universitätsverlag GmbH, Berlin, 1973
- (Etg1996) S. Etges: Konstruktion eines Gegenstromvergasers zur thermischen Behandlung von Biobrennstoffen, Diplomarbeit an der Gerhard Mercator Universität Duisburg, Juli 1996

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

- (Gra1993) R. G. Graham, R. Brain: Biomass Gasification: Hot-Gas Clean-Up, Report submitted to the International Energy Agency (IEA), Biomass Gasification Working Group, Dec. 21, 1993
- (Gum1962) W. Gumz: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1962
- (Has1994) P. Hasler, Th. Nussbaumer, R. Bühler: Vergasung von Biomasse für die Methanol-Synthese. P. Scherrer Institut u. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1994
- (Hem1981) Rosa Hemmers: Informationspaket Energie aus Biomasse, Fachinformationszentrum Energie Physik Mathematik GmbH, Karlsruhe 1981
- (HK1994) P. Hasler, H.-P. Kaufmann: Resultate der Versuche in einem 300 kW Holzvergaser, Holzvergasungs-Forum, Châtel-St-Denis, 29. Juni 1994
- (Hol1993) P. Holmgard, A. el'Kholy: Biomassetechnologie in Heizkraftwerken in Dänemark, VGB Kraftwerkstechnik 73, Nr. 5, S. 429 – 432, 1993
- (Hum1982) H. Hummelsiep; F. Heinrich: Vergasung von Haus- und Industriemüll nach dem SWF-Funk-Verfahren, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1982
- (Isi2000) M. Ising: Strom und Wärme aus Biomasse durch Erzeugung von Motoren Brenngas, PR-Material, Oberhausen, 2000
- (Jün1981) H. Jüntgen, K. H. van Heek: Kohlevergasung, Grundlagen und technische Anwendung, Verlag Karl Thieme, München, 1981
- (Kau1994) H.P. Kaufmann: Vergasung von Holz und Gras in Festbettvergasern. Vortrag auf der ENET Tagung, Zürich, 1994
- (Klöß1986) P. Klößner, H. Rauchfuss: Vergasung von Biomasse zur Energieerzeugung. Bundesminister für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 86-203, Köln, 1986
- (Lor1994) H. Lorson, M. Schingnitz, Konversionsverfahren zur thermischen Verwertung von Rest- und Abfallstoffen. BKW Bd. 46, Nr. 5. Mai 1994
- (Müh2000) H.-J. Mühlen, C. Schmid: Versuchsanlage zur gestuften Reformierung biogener Reststoffe für eine regenerative Wasserstoffproduktion – Projekt Herten, FEE-Tagung, Elsterwerda, 10.04 – 11.04.2000
- (Net1982) H. Netz: Verbrennung und Gasgewinnung bei Festbrennstoffen, Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing/München, 1982
- (Nik1992) Nikolaisen: Stroh als Energieträger, Technik - Umwelt- Ökonomie, Center für Biomasse-Technologie, Dansk Teknologisk Institut (DTI), Arhus, 1992

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

- (Nus1990/1) Th. Nussbaumer: Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von Altholz. Heizung Klima Nr. 9, S. 75-82, 1990
- (Nus1990/2) Th. Nussbaumer: Grundlagen der Holzvergasung Heizung Klima, Nr. 7, S. 52 – 60, 1990
- (NBJ1990) Th. Nussbaumer, R. Bühler, A. Jenni: Holzvergasungsanlagen in Europa im Bereich 2 bis 5 MW. Forschungsprojekt Holzvergasung-Altholz Phase 1. Zürich, 1990
- (Ree1981) T. B. Reed: Types of Gasifier and Gasifier Design Considerations in: Biomass Gasification, Principles and Technology, (Hrsg. Solar Energy Research Institute (SERI), Golden, Colorado) Noyes Data Coporation, New Jersey USA, 1981
- (San2000) B. Sankol: Energie aus der Landwirtschaft- Stand und Potentiale FEE-Tagung, Elsterwerda, 10.04 – 11.04.2000
- (S-L1985) P. Schulze-Lammers P, Vergasung von Biomasse und Nutzung des Gases zum Antrieb von Motoren. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising 1985
- (Sch1997) W. Schulz: Standder Holzvergasungstechnik, im Bremer Energie-Institut, Januar, 1997
- (Schu2000) O. Schulze: Statusbericht über die Erprobung der 1-MWth-Carbo-V-Anlage mit Holzhackschnitzel, geschreddertem Altholz und Kohle, FEE-Tagung, Elsterwerda, 10.04 – 11.04.2000
- (SSE1998) W. Senger, G. Schöppe, E. Erich: Stand der Vergasungstechnik für die Nutzung von Biobrennstoffen am Beispiel Holz, Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag, Januar 1998
- (Sen1998) W. Senger: Entwicklung eines kombinierten Festbettvergasers, VDI-Umwelt, Bd. 28, Nr. 1/2, 1998
- (Sta1993) H.E. Stassen HE: UNDP/WB smal-scale biomass gasifier monitoring report. World Bank, BTG biomass technology group, 1993
- (Tid1994) F. Tidow: Holzvergasung - Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven. Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, 1994
- (Weg1994) G. Wegener, A. Frühwald: Der Beitrag der Holzverwertung zum Umweltschutz, Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 142, 1994
- (Weg1995) G. Wegener: Forstwirtschaftliche und energetische Holznutzung, VDI_Seminar Alt- und Restholz: Thermische Nutzung und Entsorgung, Anlagenplanung, Energienutzung, Salzburg, 1995
- (Wit1992) U. Witte: Dampferzeugertechnik, Steinmüller Taschenbuch, Vulkan-Verlag, Essen 1992

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

9.2 Stückliste und Konstruktionszeichnungen

Stückliste Kombivergaser					Seite 1
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachn./Norm-Kurzbe	Bemerkung
1					entfällt
2	1	Stück	Rechteckflansch	1.005	
3					entfällt
4	1	Stück	Einlaufkanal	1.007	
5	1	Stück	Deckel	1.008	
6	2	Stück	Flansch	1.009	
7	1	Stück	Zylinder	1.010	
8	1	Stück	Einschnürung	1.011	
			Abwicklung Pos.8	1.101	
9	1	Stück	Ring für Einschnürung	1.012	
10	1	Stück	Rost	1.013	
11	1	Stück	Schürhakengrundplatte	1.014	
12	1	Stück	Schürhaken	1.014	
13	1	Stück	Kegel	1.016	
14	1	Stück	Flansch	1.017	
15	1	Stück	Ascheaustrag	1.018	
16a/b	1	Stück	Verjüngung	1.019	
			Abwicklung Pos.16a	1.100	
17	4	Stück	Flansch	1.020 / DN 200	
18					entfällt
19					entfällt
20	1	Stück	Schubstangenzubehör	1.023	
21	1	Stück	Schubstangenzubehör	1.023	
22	1	Stück	Schubstangenzubehör	1.023	
23	1	Stück	Zwischenstück	1.024	
24	2	Stück	Führungsflansch	1.025	
25	2	Stück	Führungsflansch	1.025	
26	1	Stück	Schubstangenzubehör	1.024	
27					entfällt
28					entfällt

Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Stückliste Kombivergaser					Seite 2
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachn./Norm-Kurzbe	Bemerkung
29	2	Stück	Blindflansch mit Dicht.	DN 65	
30	2	Stück	T-Stück	DN 65	
31	1	Stück	Rohr mit Meßanschluß	1.028 / DN 65	Absprache
32	1	Stück	Rohr	DN 65	Absprache
33	6	Stück	diverse Teile	1.029 / DN 65	
34	1	Stück	diverse Teile	1.029	
35	1	Stück	diverse Teile	1.029	
36					
37	8	Stück	diverse Teile	1.029	
38	1	Stück	diverse Teile	1.029	
39	3	Stück	diverse Teile	1.029	
40	1	Stück	diverse Teile	1.029	
41	5	Stück	diverse Teile	1.029	
103	1	Stück	Zylinder Reaktorstufe II	1.103 / DN 200	
104	1	Stück	Einschnürung Stufe II	1.104	
105	1	Stück	Ring für Einschnürung	1.105	
106	1	Stück	Rost II	1.106	
107	1	Stück	Flansch Rost II	1.107	
108	1	Stück	Kegel II	1.108	
109	1	Stück	Schürhaken II GP	1.109	
110					
111	1	Stück	Unterer Kulissenstein	1.110	
112	1	Stück	Unterer Kulissenstein	1.110	
113	1	Stück	Austrag Stufe II	1.111	
114	1	Stück	Unterer Kulissenstein	1.110	
115	1	Stück	Unterer Kulissenstein	1.110	
120	40	Stück	Schraubverbindungen	M 24	warmfest
121	92	Stück	Schraubverbindungen	M 12	warmfest
Doppelpendelklappen werden verschraubt geliefert					

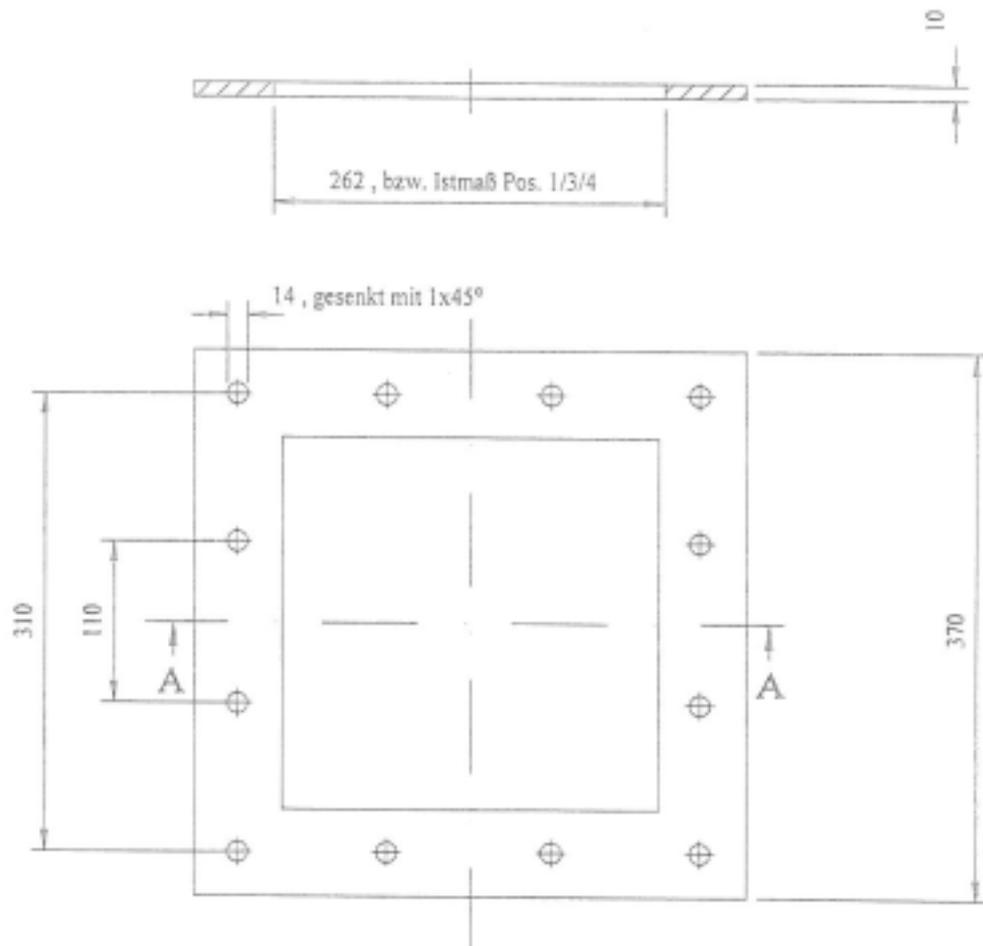
Forschungsthema „Entwicklung eines Festbettvergaser mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“

Stückliste Kombivergaser					Seite 3
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachn./Norm-Kurzbe	Bemerkung
122	6	Stück	große Dichtungen	für Stufe I	
123	12	Stück	runde Dichtungen	Übergänge	
124	21	Stück	quadrat. Dichtungen	Schleusen	

Zusammenbauzeichnungen :

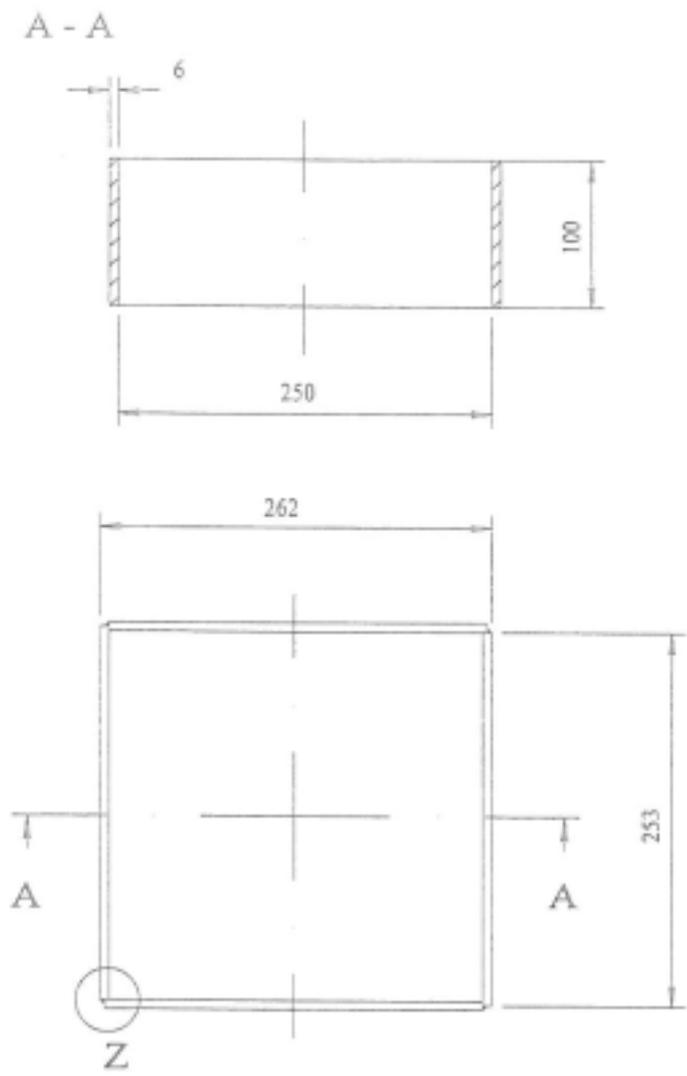
Gesamtzusammenbauzeichnung Stufe I	1.201
Gesamtzusammenbauzeichnung Stufe II	1.202
Zusammenbauzeichnung 3 Draufsicht Rost I	1.203
Zusammenbauzeichnung 4 Oberer Deckel	1.204
Zusammenbauzeichnung 5 Oberer Vergaser	1.205
Zusammenbauzeichnung 6 Lufteindüsung	1.206
Zusammenbauzeichnung 7 Lufteindüsung	1.207
Zusammenbauzeichnung 8 Schubhebel	1.208
Zusammenbauzeichnung 9	1.209
Zusammenbauzeichnung 10 Unterer Vergaser	1.210
Zusammenbauzeichnung 11 Austrag Stufe II	1.211
Zusammenbauzeichnung 12 Unterer Rost	1.212

A - A

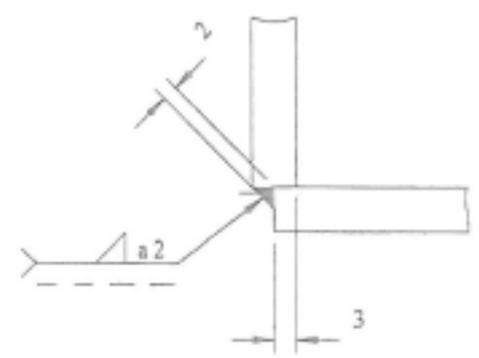


Pos. 2		Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m			Maßstab 1:5	
					1.4713	
					Rechteckflansch	
		NTA			1.005	
					Blatt 5	
					40	
Zust.	Änderung	Erstun	Werk			





Z 1:1

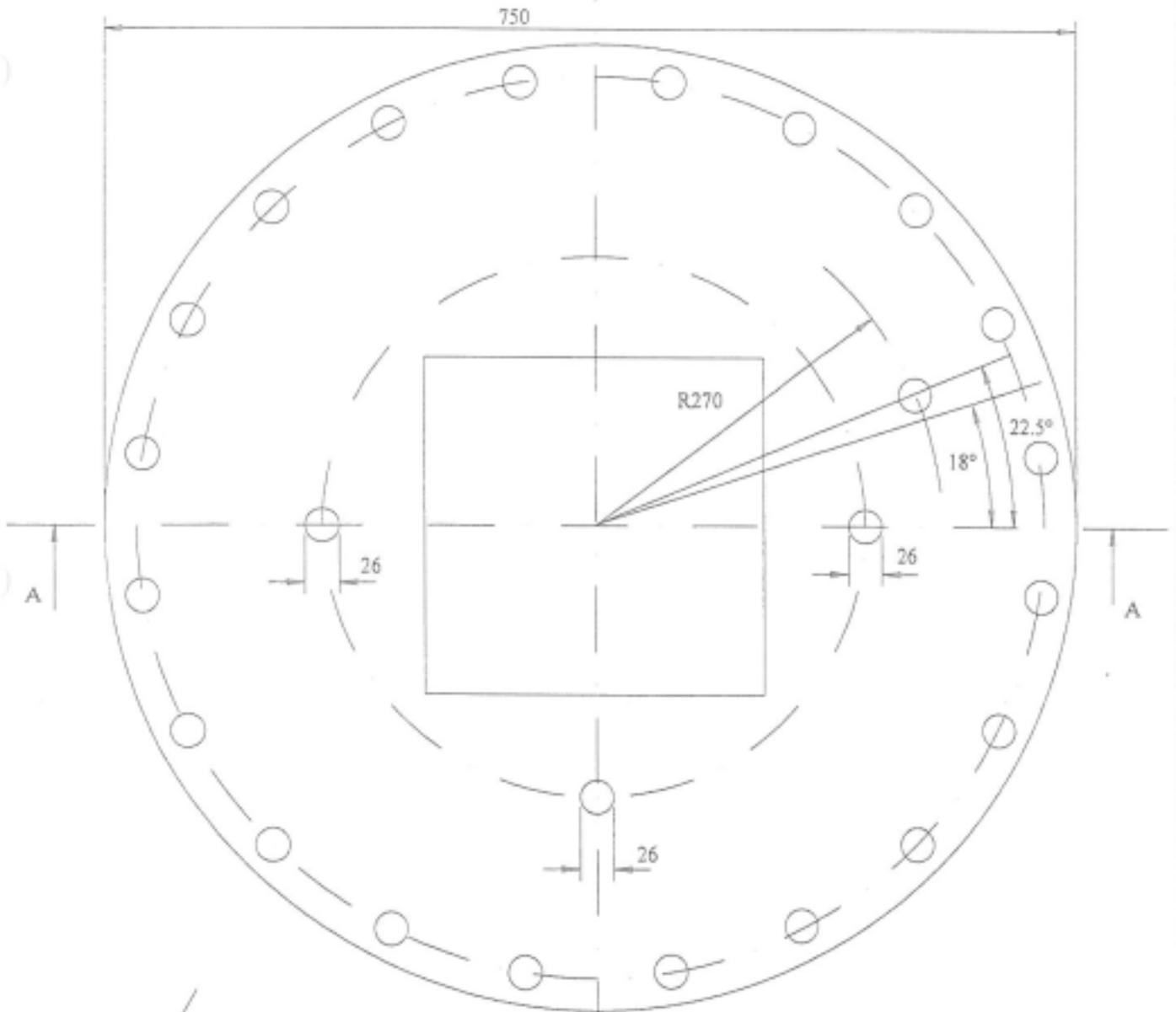
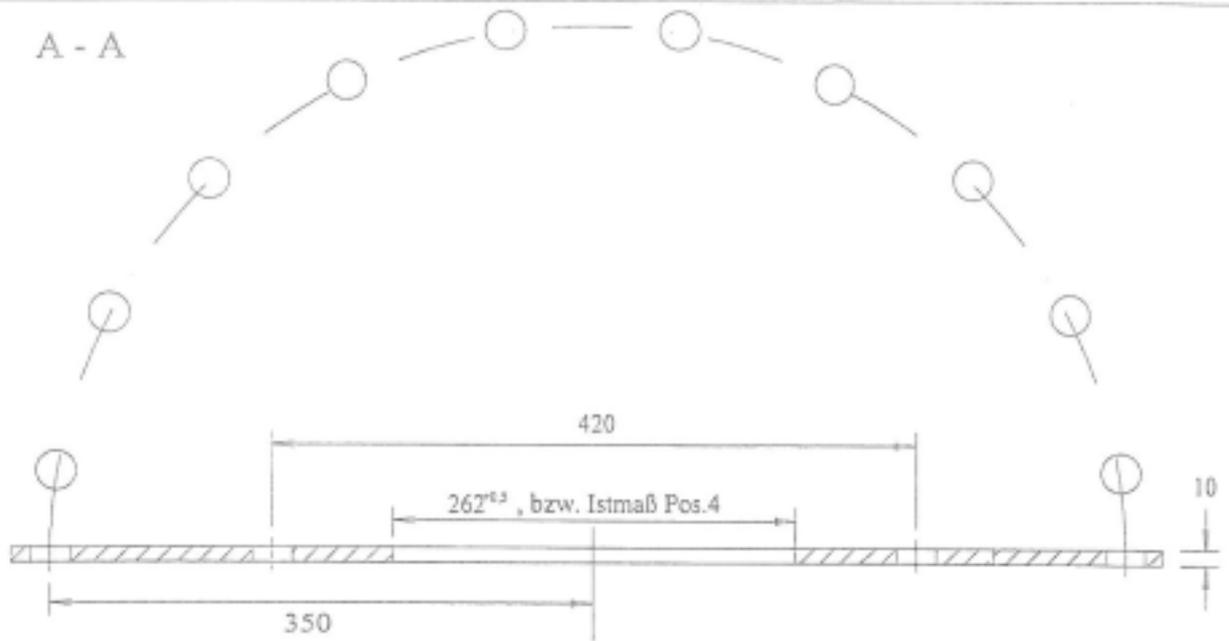


111 / DIN 8563 T3-AK / s /
Thermanit 17



Pos. 4		Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:5, 1:1	
				1.4713	
Bearbeitung	181210	Kurz	Datum	Name	Einlaufkanal Doppelklappe
		Bearb.	06-12-1998	Senger	
		Gepr.			
		Norm			
		IUTA		1.007	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Blatt 7 40 P.	

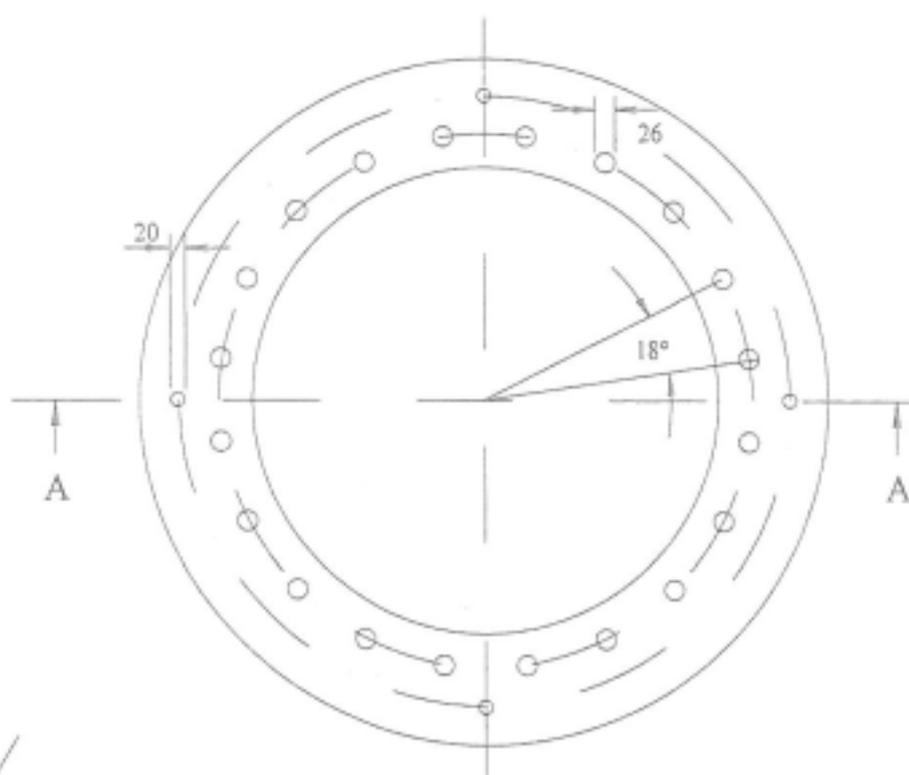
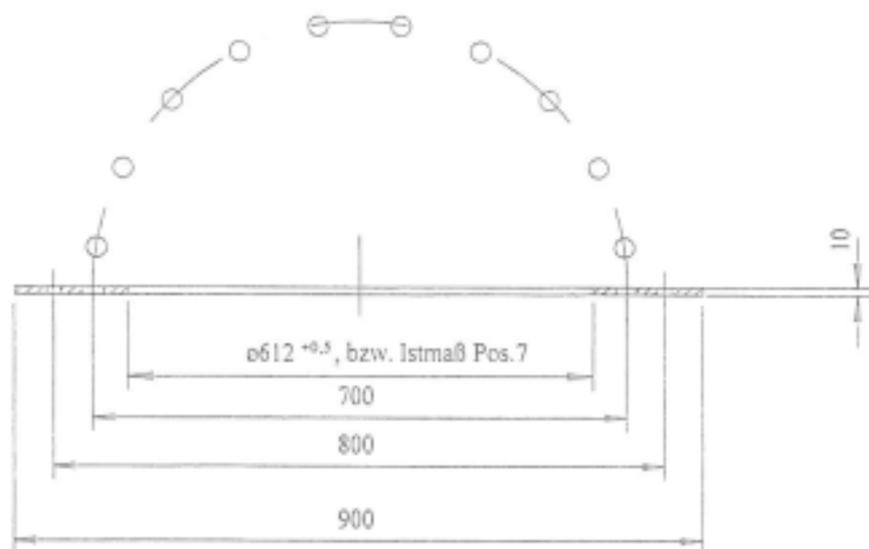
A - A



alle Bohrungen mit 1x45° angefast

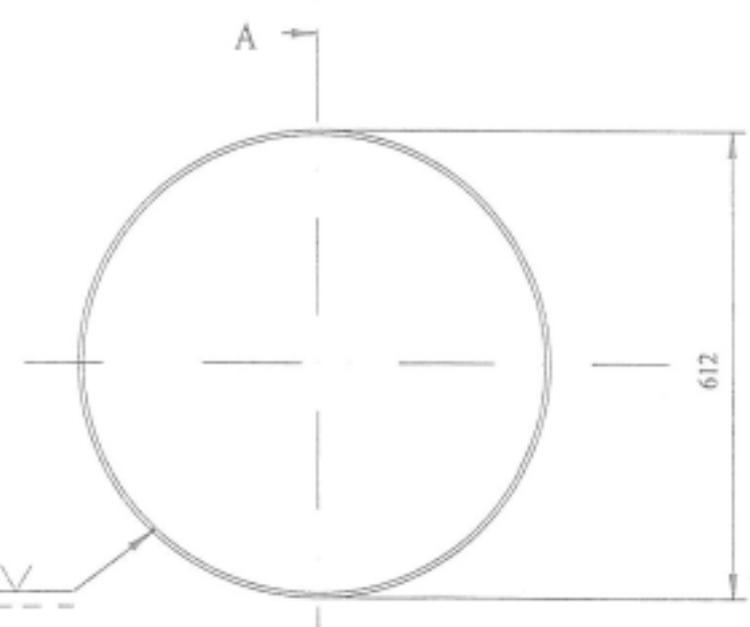
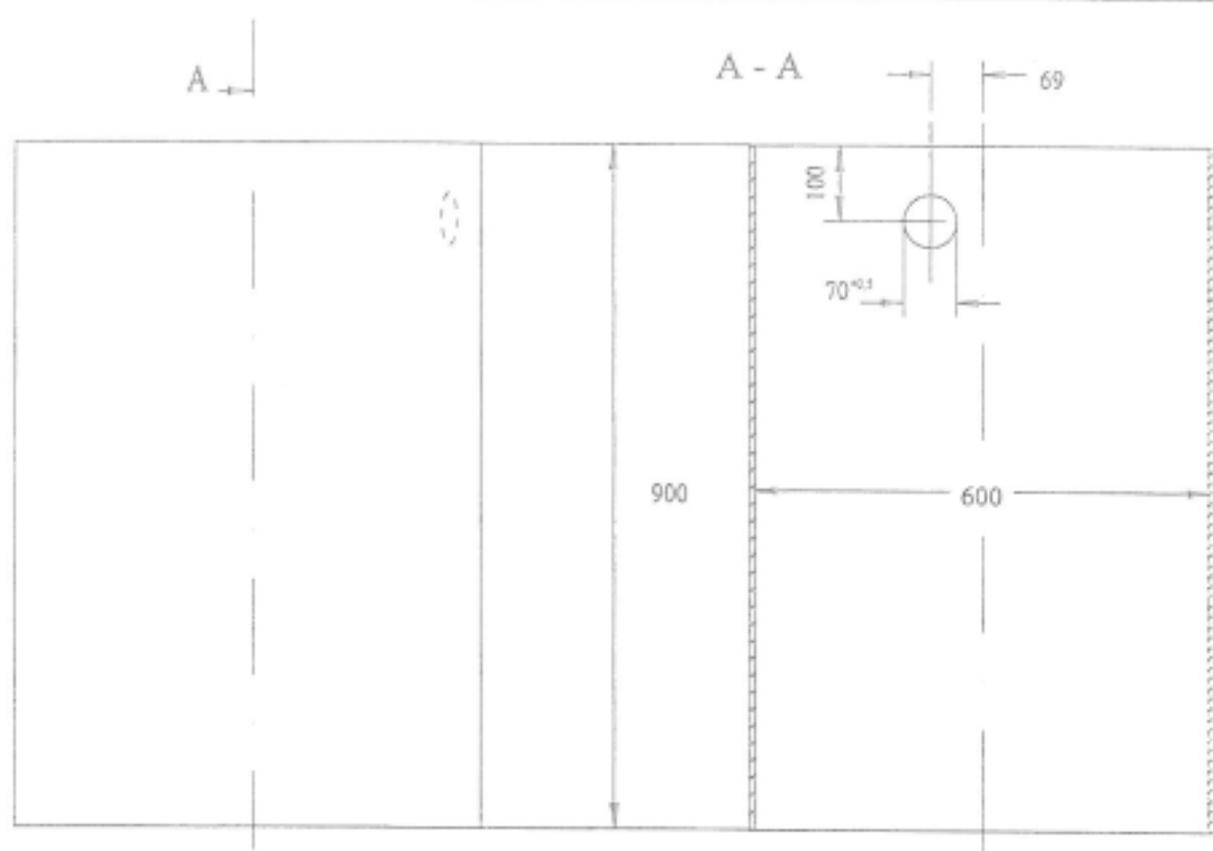
Pos. 5		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:5, 1:5,1	
				1.4713	
				Deckel	
				1.008	
				Blatt 8	
				40 7	
Zust.	Änderung	Zust.	Änderung		

A - A



alle Bohrungen mit 1x45° angefast

Pos. 6		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m			Mußstab	1:10, 1:2
					1.4713	
Parallelen der Flanschbohrer	21.12.1998	Seiten	Datum	Notiz	Flansch	
			04.11.98	F. Rach		
		IUTA			1.009	Blatt 9
Zust.	Änderung	Datum	Notiz			40



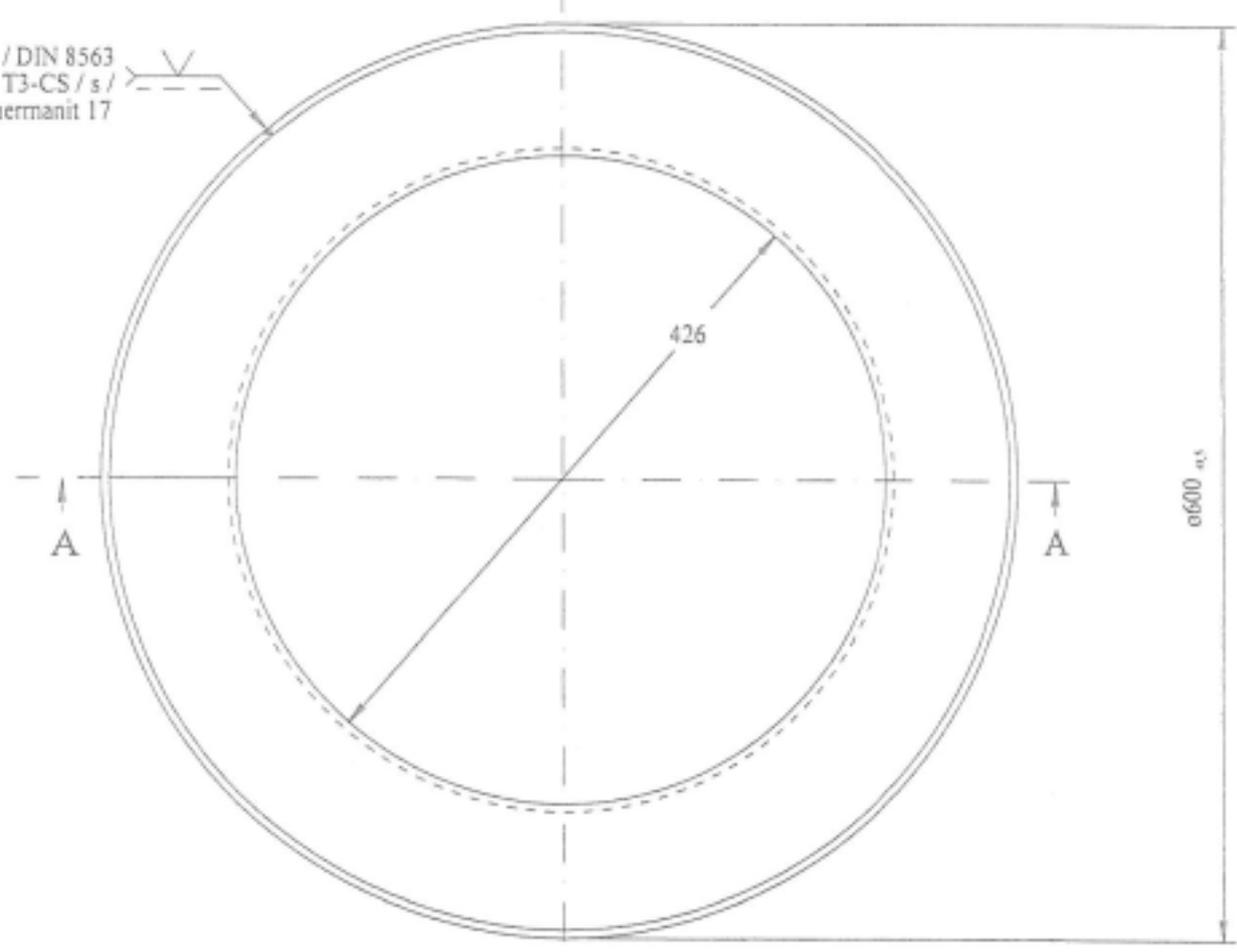
111 / DIN 8563 T3-BS / s /
Thermanit 17



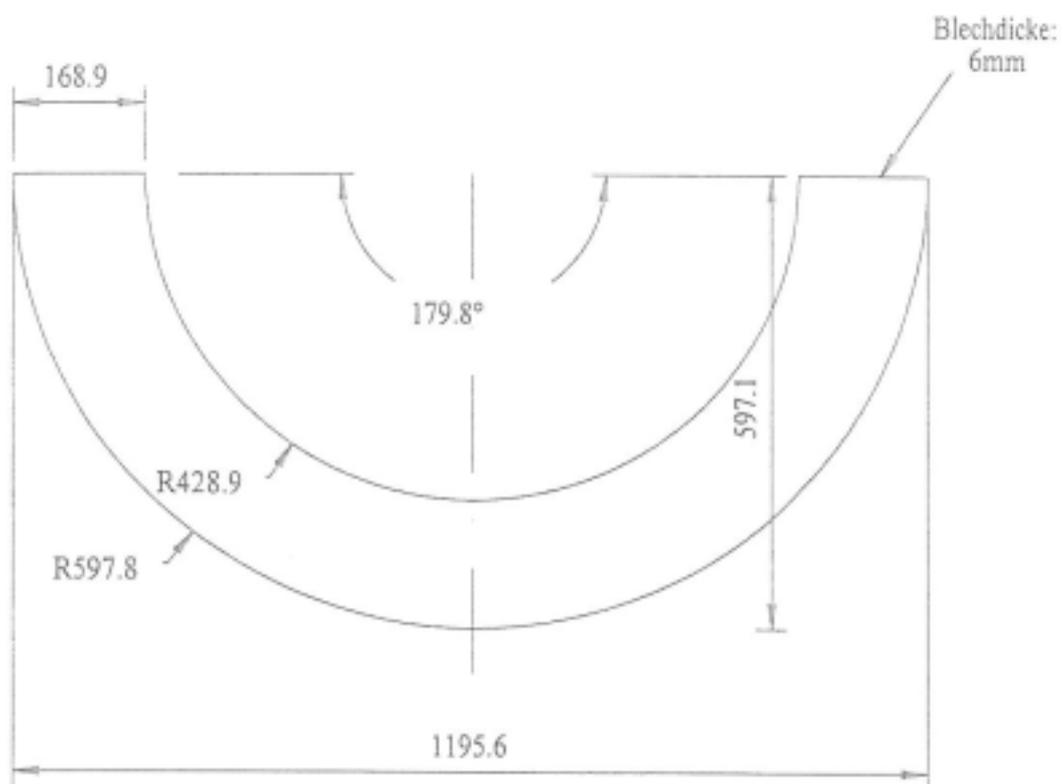
Pos. 7		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m			Maßstab 1:10, 1:1	
					1.4713	
Bezeichnung		20.12.98	Rach	Do tun	Name	Zylinder
				Bearb. 02.11.98	Semper	
				Gepr.		
				Norm		
		IUTA			1.010	
Zust.		Änderung	Do tun	Name	Blatt 10 40 F	



111 / DIN 8563
T3-CS / s /
Thermanit 17

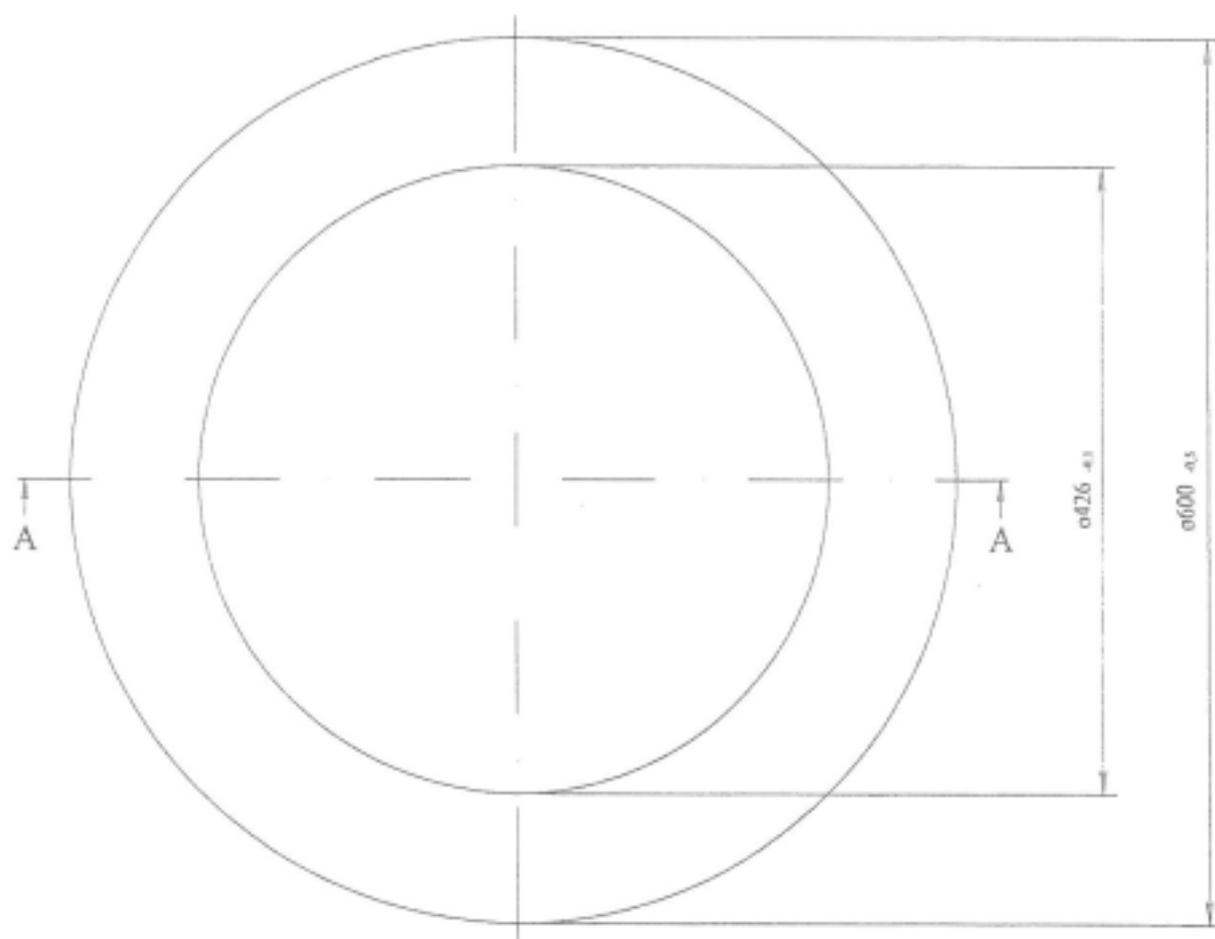


Pos. 8				Maßstab 1:5, 1:1	
				1.4713	
Toleranzen	01.11.98	Buch	Ge tun	Name	Einschnürung
			Bearb. 08.11.98	Sesger	
			Gepr.		
			Abgrn		
				ST1	
				1.011	
				Blatt 11	
				40	
Zust.	Änderung	Do tun	Name		



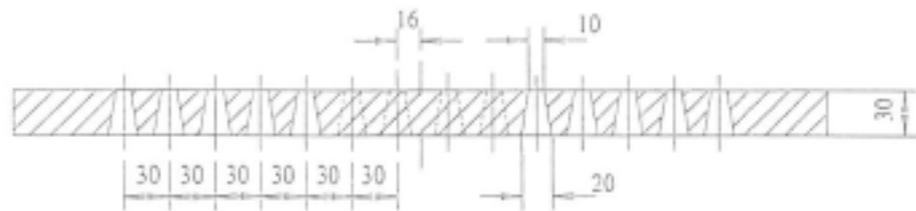
Abwicklung Pos. 8		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:10		
				1.4713		
		Datum	None	Abwicklung Einschnürung		
		Zeichn.	15.11.98			F. Ruch
		Gepr.				
		Norm				
		Gerhard-Mercator-Universität-GH-Duisburg IUTA		1.101		
Zust.	Anst.	Datum	Name	Blatt 2 6 8		

A - A

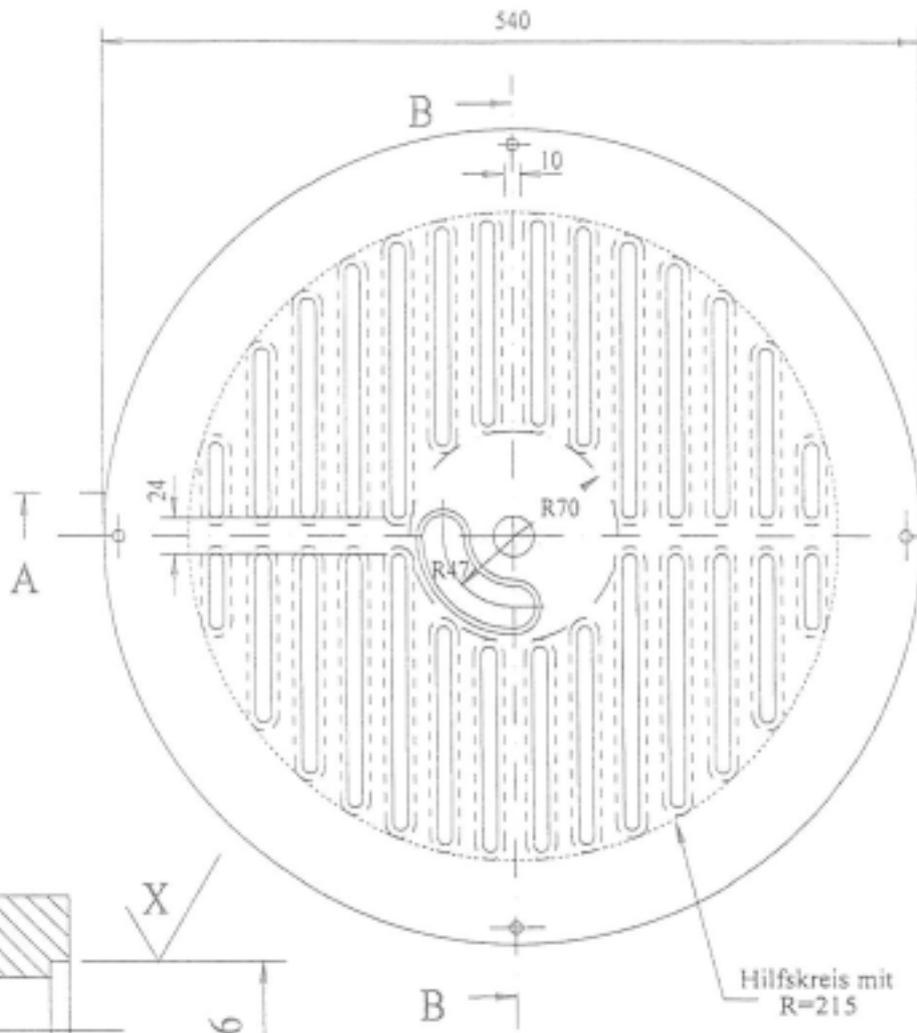
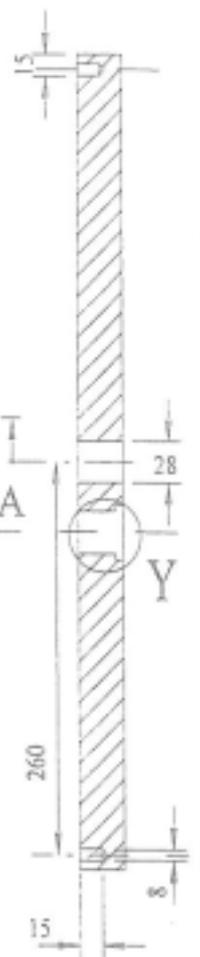


Pos. 9		Allgemein-toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:5, 2:1	
				1.4713	
Toleranz-Faktor	21 (17/18)	Bach	Zeichn	Norm	Ring für Einschnürung
			08.11.98	Senyer	
		IUTA		1.012	
Zust	Änderung	Zeichn	Norm	Blatt 12 39 P	

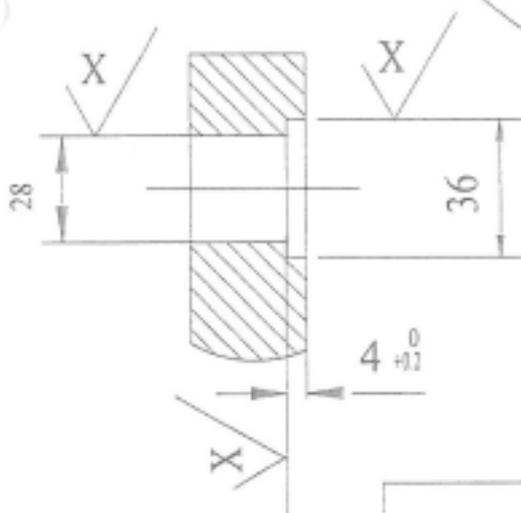
A - A



B - B



Y 1:2

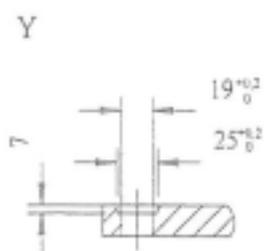
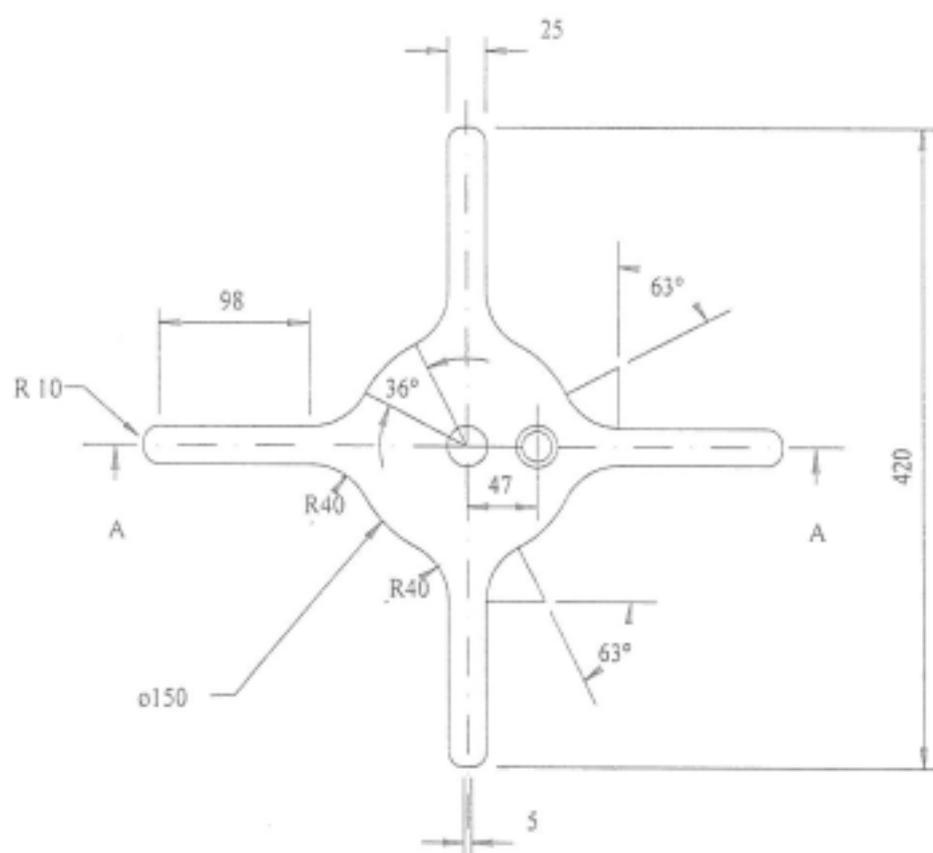
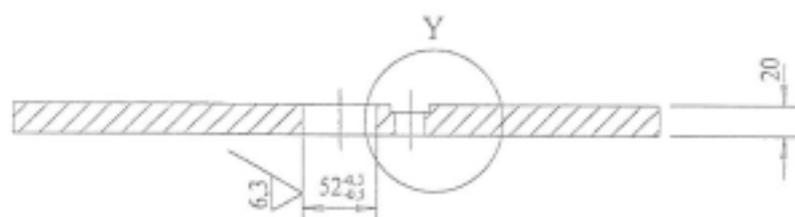


$\nabla = 6.3$

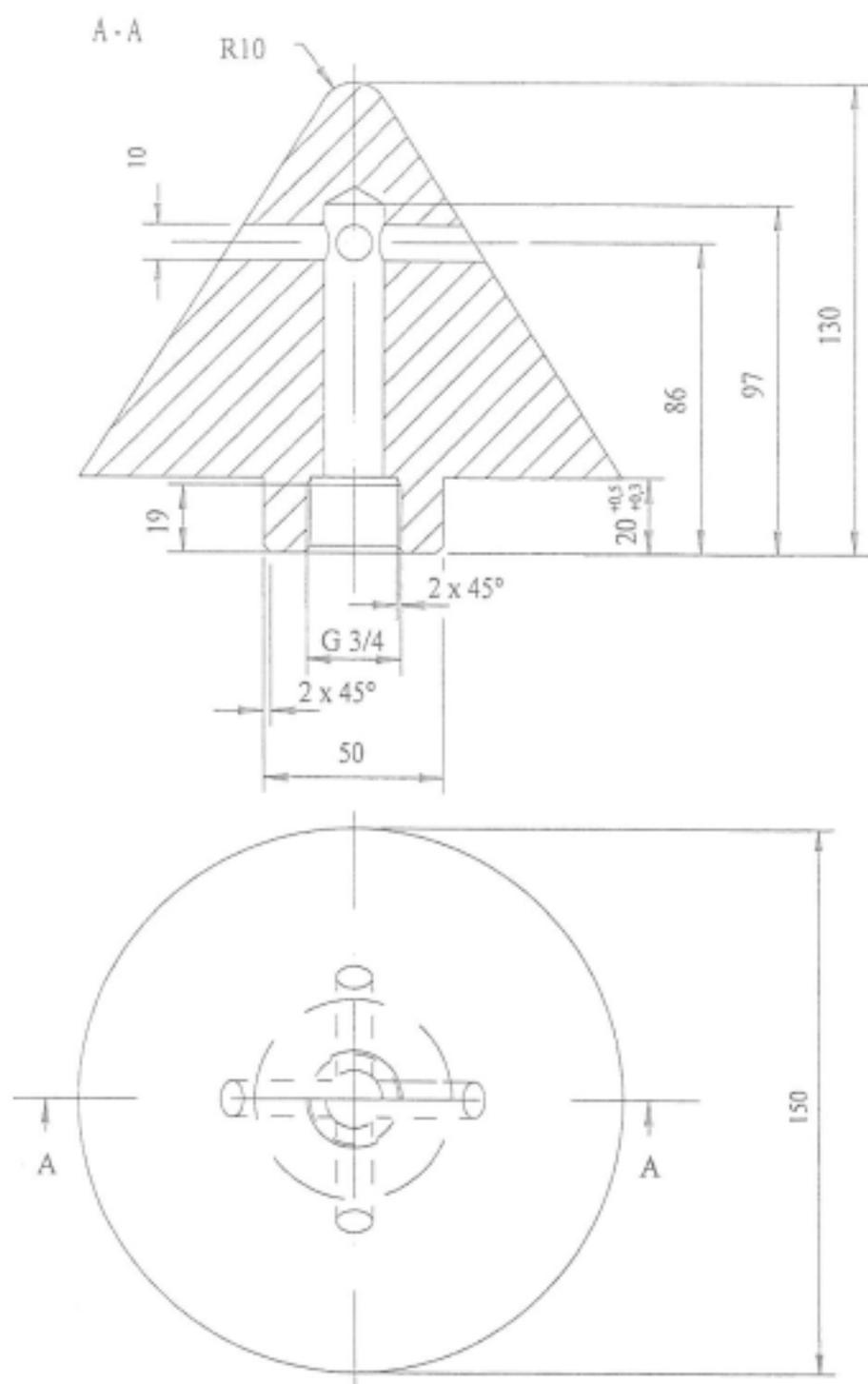
∇ (X)

Pos. 10	Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m	Maßstab 1:5, 1:2	
		1.4841	
		Zeichn. Datum	None
		Bezeichnet	None
		Gepr.	
		Norm	
		IUTA	
		1.013	Blatt 13
Zust.	Aenderung	Datum	39 A

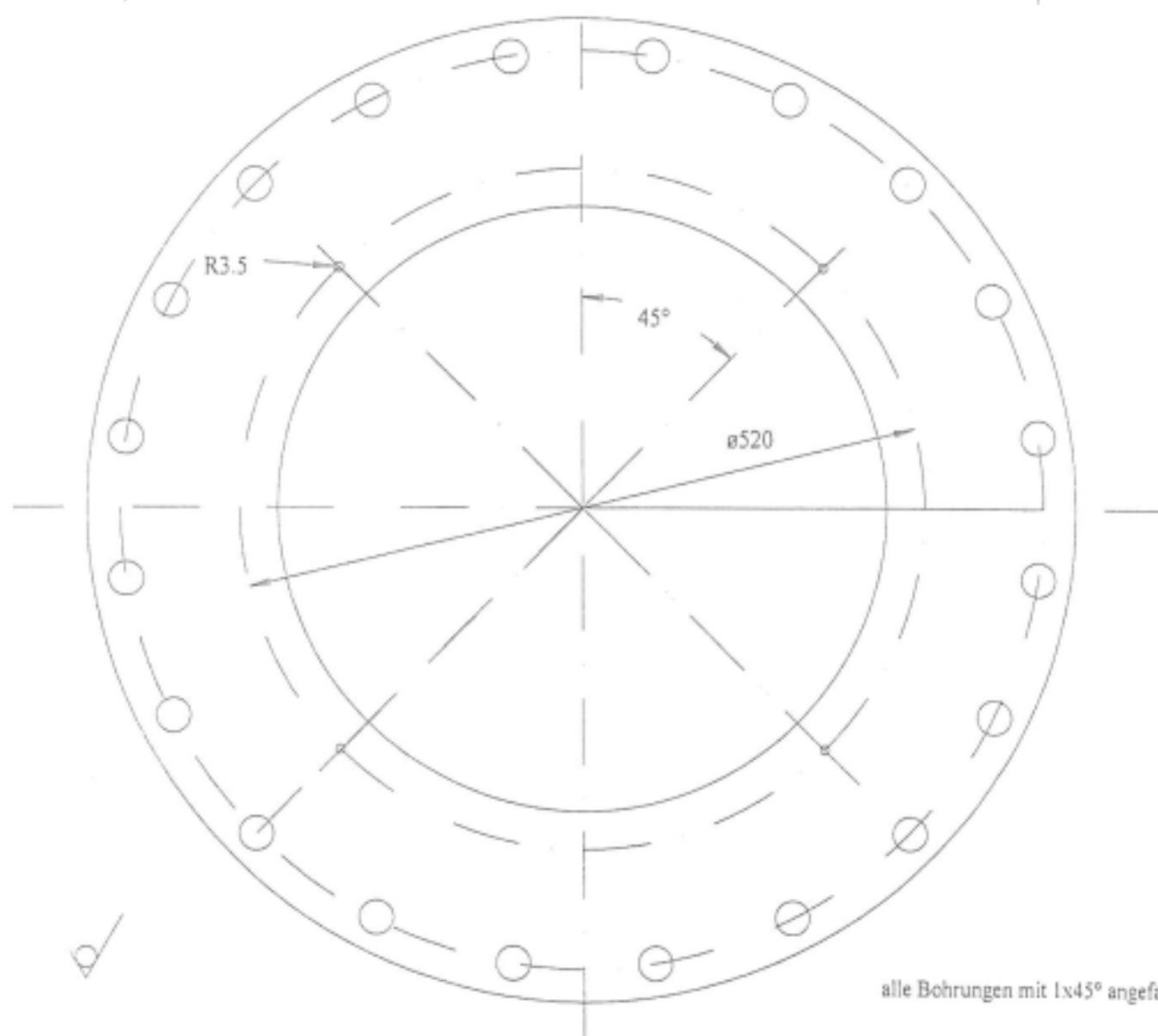
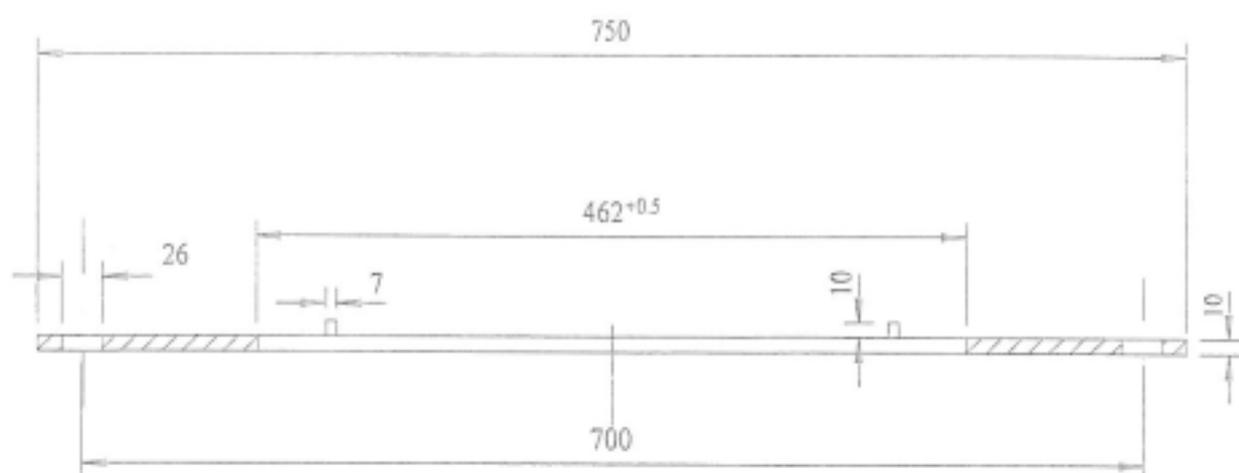
A-A



Pos. 11		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Mafstab 1:5	
				X 15 CrNiSi 25 10	
		Besrb. 28.11.98		Schürhakenrundplatte	
		Norm		1.014	
		IUTA		Blatt 25	
Zust.	Anderung	Datum	Blanz	36	

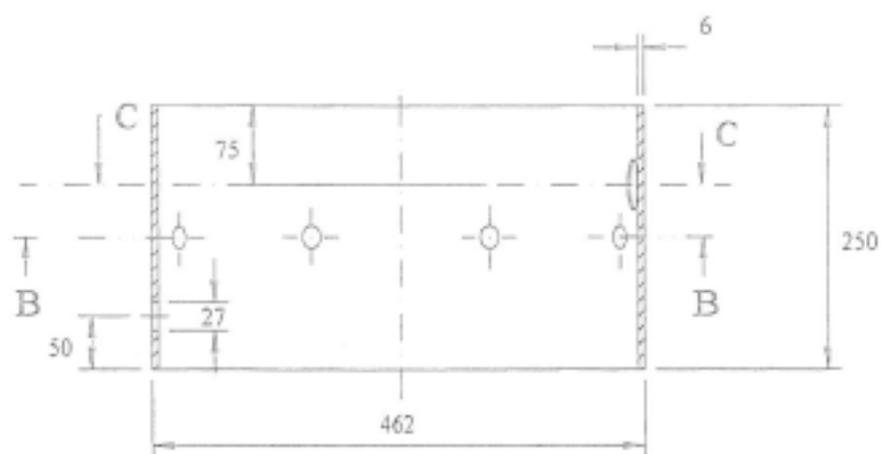


Pos. 13		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m			Maßstab 1:2	
					1.4841	
Anschlußmaße	11.12.98	Rach	Zustun	Namer	Kegel	
		Bearb.	08.11.98	Senger		
		Gepr.				
		Norm				
		IUTA			1.016	
Zust.	Änderung	Zustun	Namer			Blatt 16
						40 B

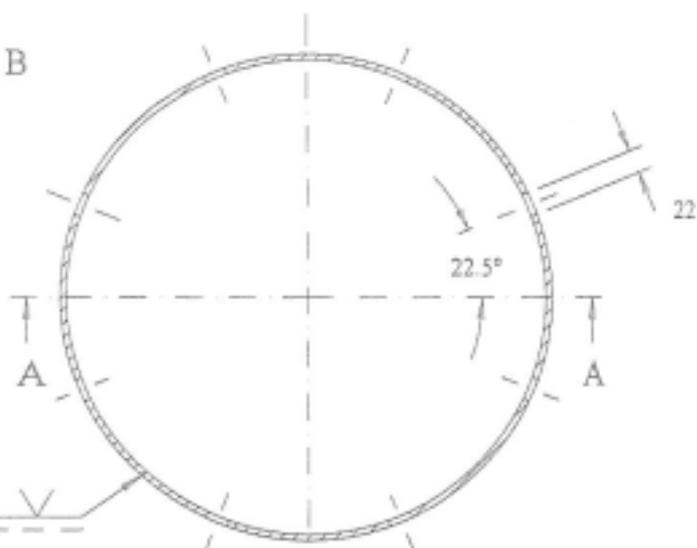


Pos. 14		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:5	
				1.4713	
				Flansch	
				1.017	
				Blatt 16	
				40 P	

A - A

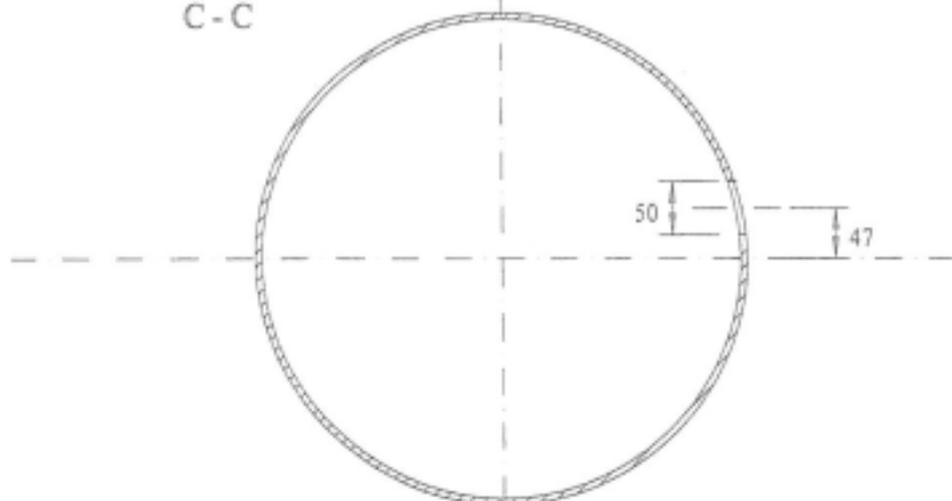


B - B



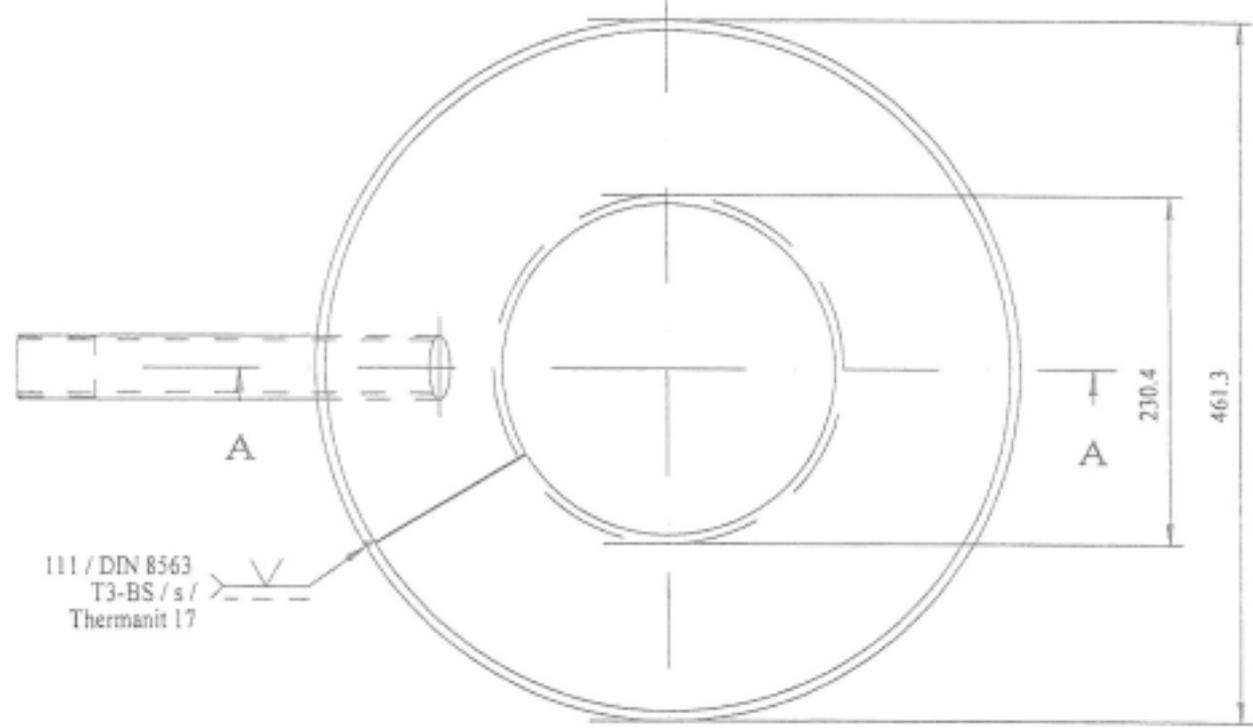
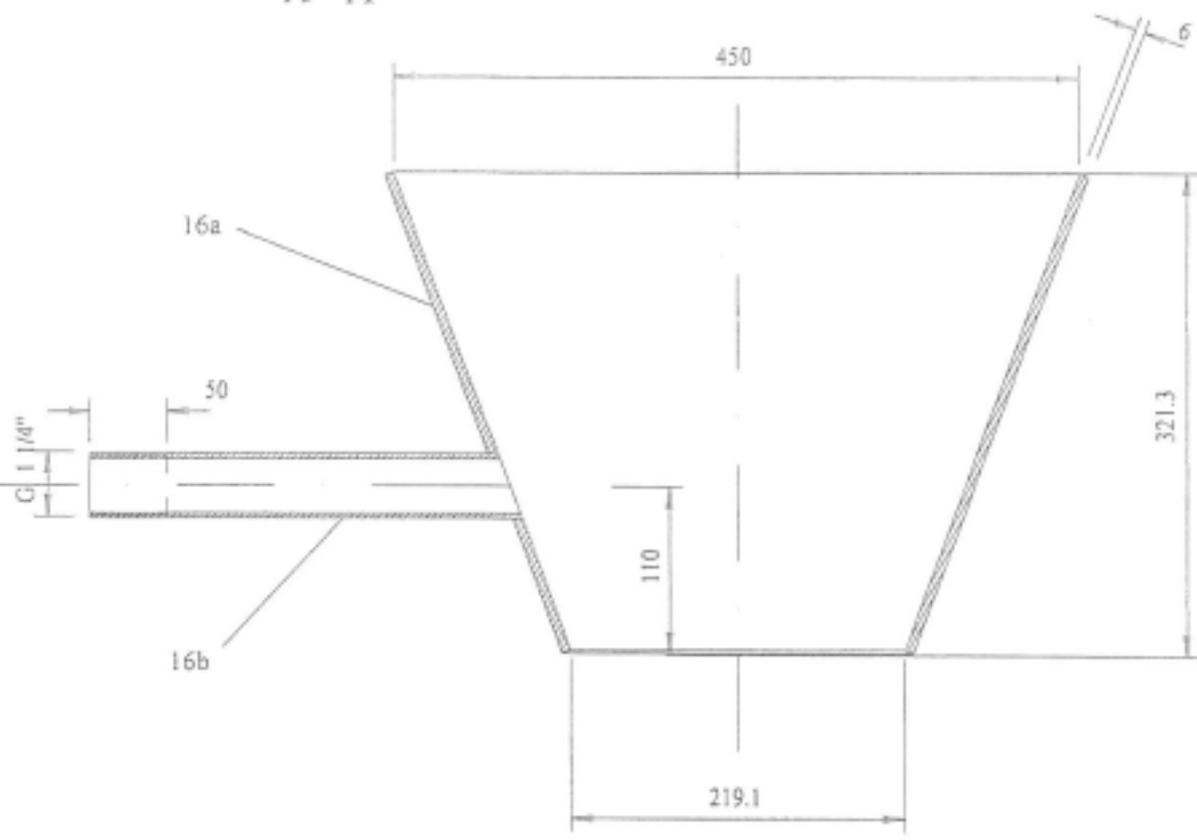
111 / DIN 8563 T3-BS / s
Thermanit 47

C - C



Pos. 15		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:7	
				1.4713	
				Ascheustrag	
		IUTA		1.018	
				Blatt 17	
				39 St.	

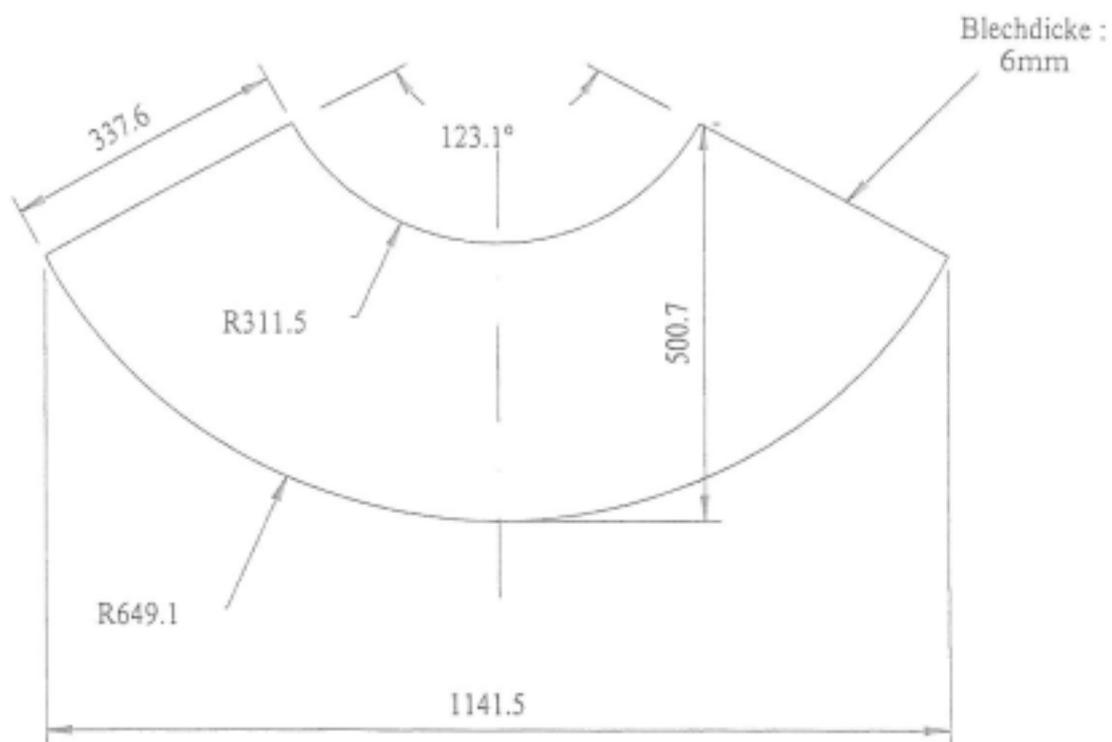
A - A



111 / DIN 8563
T3-BS / s /
Thermanit 17



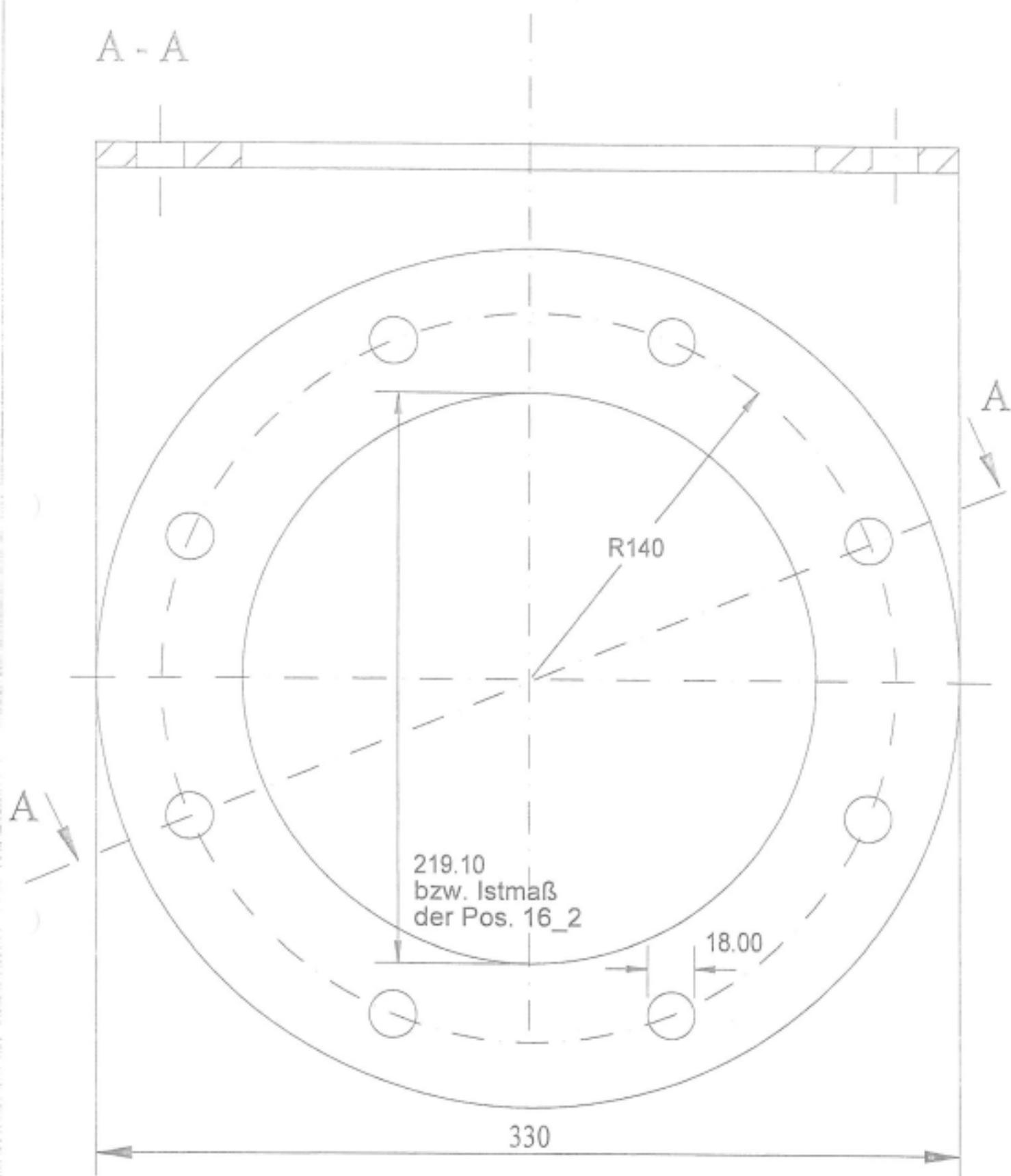
Pos. 16a/ 16b		Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:5	
				1.4713	
				Verjüngung	
		IUTA		1.019	
				Blatt 18	
				39	
Zust.	Änderung	Da tun	Name		



Abwicklung Pos. 16a		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Meßstab	
				1.4713	
		Datum	Name	Abwicklung Verjüngung	
		Bearb. 15.11.98	F. Ruch		
		Gepr.			
		Norm			
IUTA				1.100	
Zust.	Änderung	Datum	Name	6	

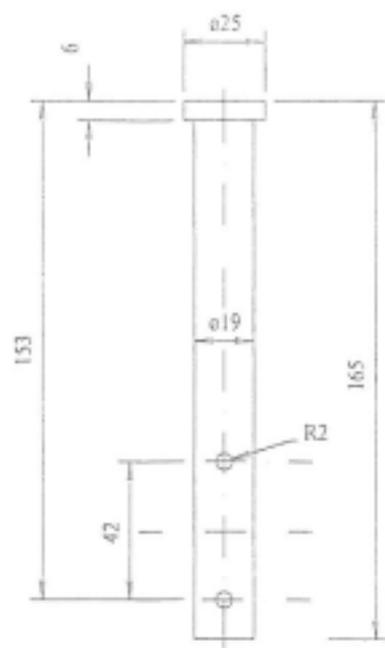


A - A



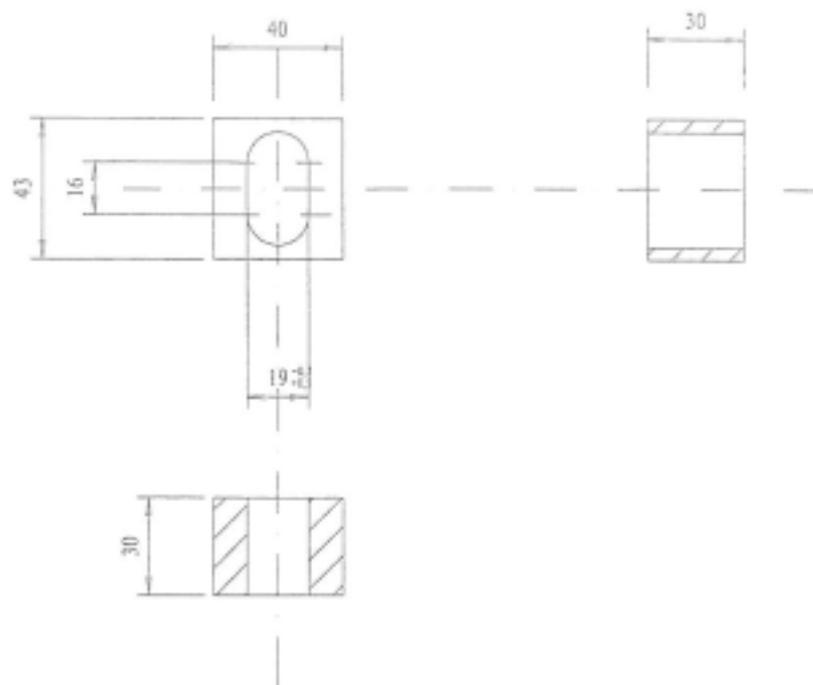
Alle Bohrungen mit
1 x 45° angefast

Pos. 17		Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
				1.4713	
Anpassung an 3. Stufe	21.12.98	Stapel	Da tun	None	
			Bearb.	25.11.98 F. Rach	
			Gepr.		
			Norm		
		IUTA		Flansch	
				1.020	Blatt 20
Zust.	Änderung	Da tun	None		39

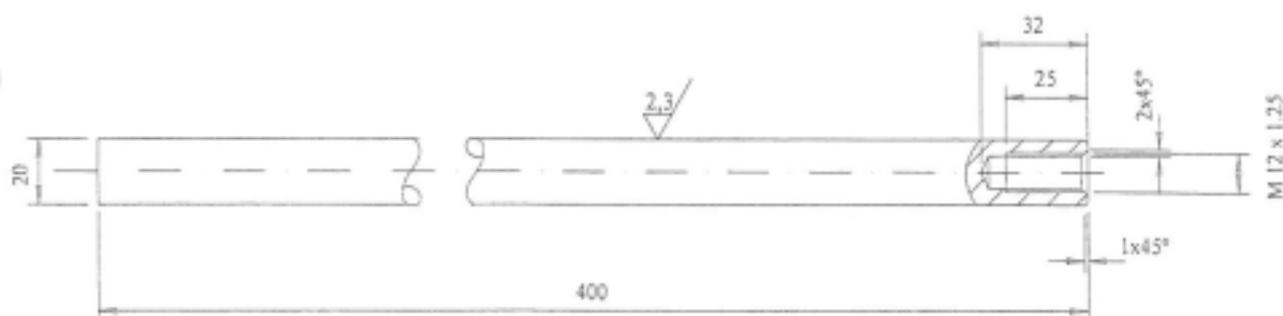


Pos. 20

6.3



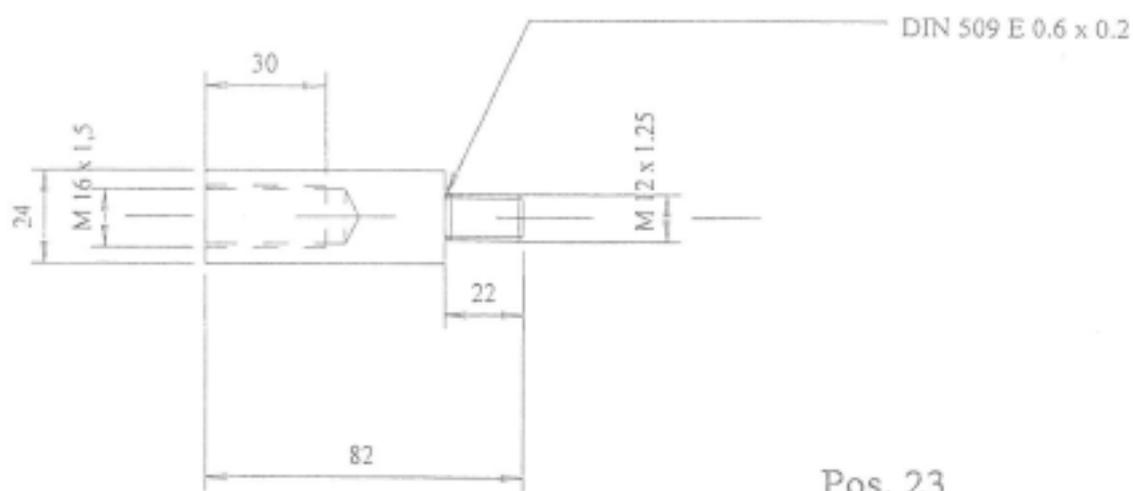
Pos. 21



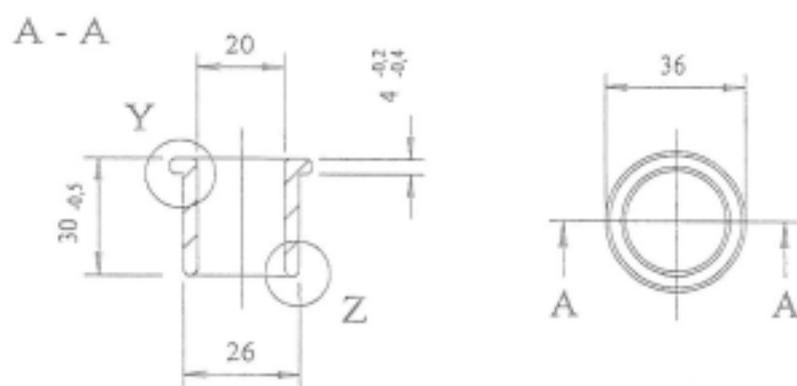
Pos. 22

6.3 (2.3)

Pos. 20 - 22		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
				1.4713	
		Zustun None		Schubstangenzubehör	
		Bearb. 25.11.98 F. Bach			
		Gepr.			
		Norm			
		IUTA		1.023	
				Blatt 23	
				39	
Zust.	Änderung	Zustun	None		

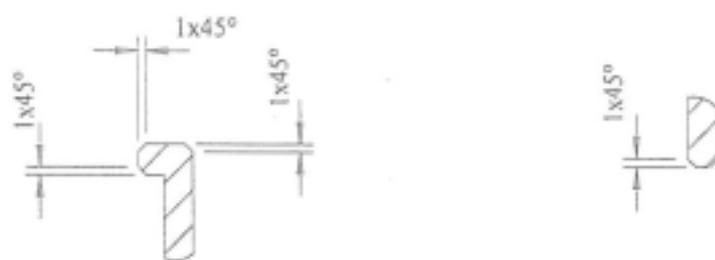


Pos. 23



Y 1:1

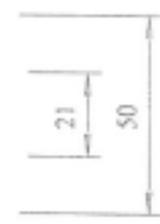
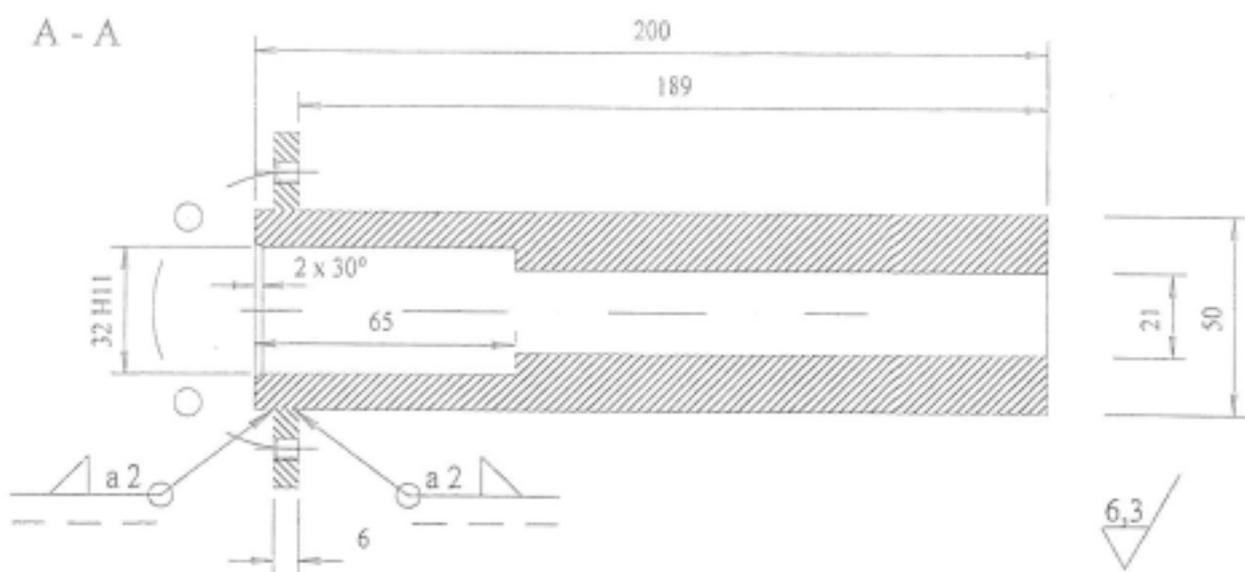
Z 1:1



Pos. 26 (1.4841)

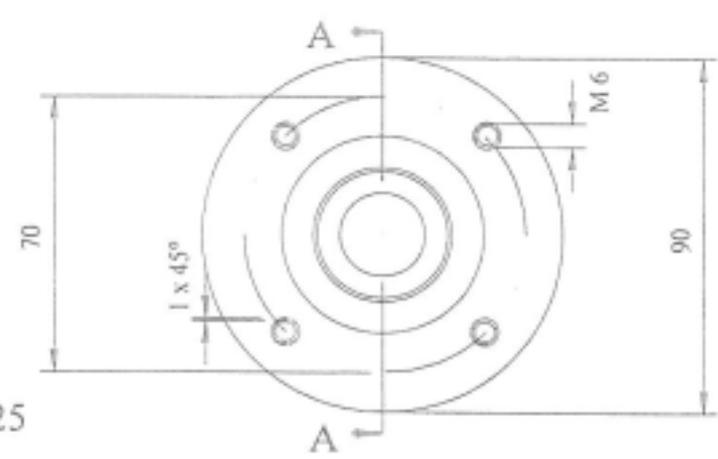


Pos. 23/26	Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m	Maßstab 1:2, 1:1	
		1.4713 (1.4841)	
		Datum 06.12.98	None F. Rach
		Bearb.	
		Gepr.	
		Norm	
		IUTA	
		1.024	
Zust.	Änderung	Datum	None
			Blatt 24 39 b



6,3

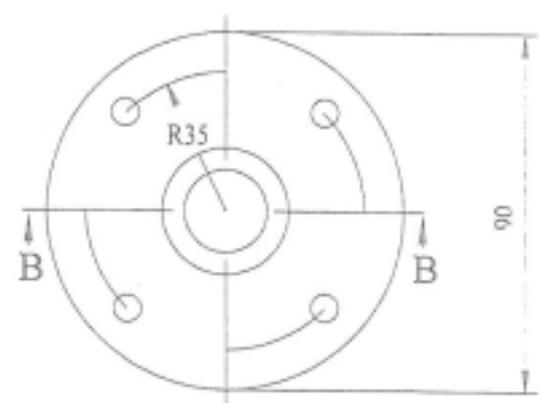
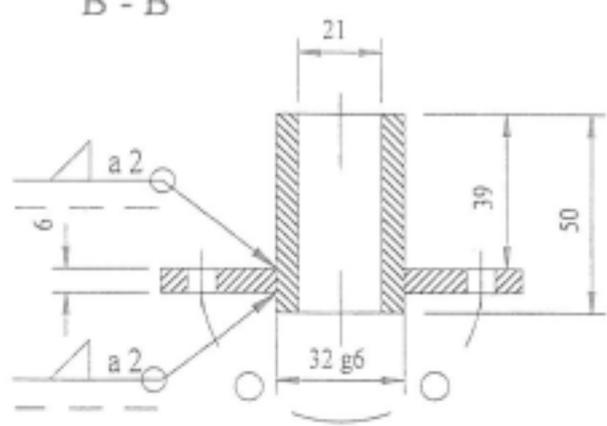
Alle Bohrungen mit 1x45° angefast



Pos. 25

Schweißverfahren:	111 (WIG)
Alle Kehlnähte	
Bewertungsgruppe:	CK DIN 8563 T3
Schweißposition:	hw
Zusatzwerkstoff:	Thermanit 17

B - B



Pos. 24

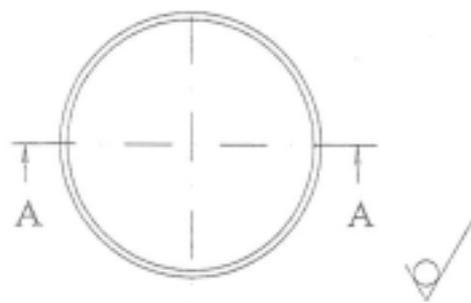
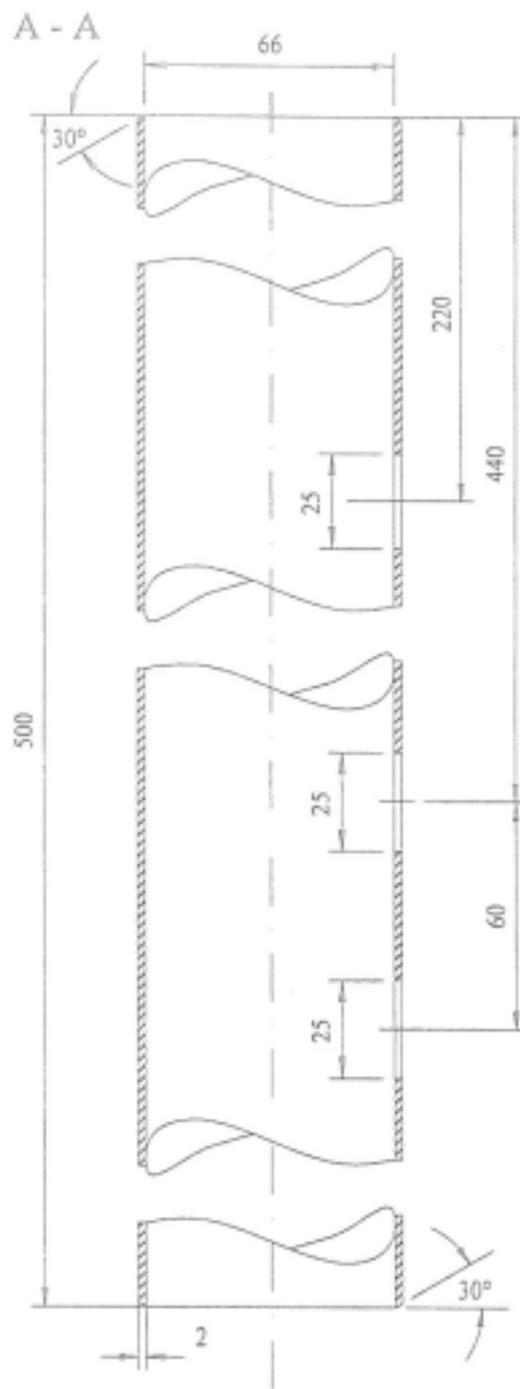
Alle Bohrungen mit 1x45° angefast

6,3

Übersetzungstafel

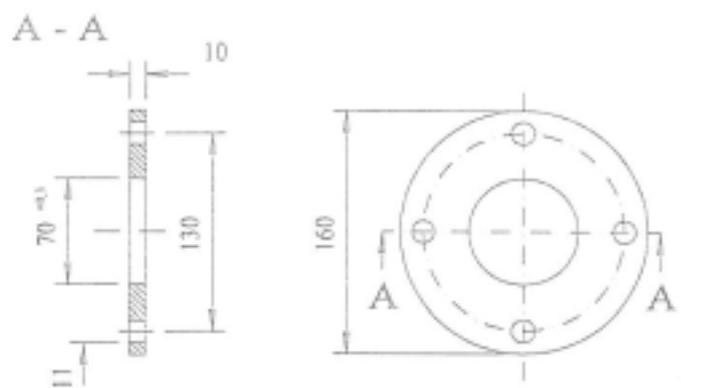
Paßmaß	Grenzabmaße
32 H11	+160 0
32 g 6	-9 -25

Pos. 24/25				Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
						1.4713	
						Führungsflansch mit Brille	
				Gerhard-Mercator-Universität-GH-Duisburg IUTA		1.025	
Zust. Änderung Datum Name						Blatt 25 39 B	



Pos. 31

Pos. 31	Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m	Maßstab 1:2	
		10 CrMo 9 10	
	Stück	Nenn	Rohr / Flansch
	Beinh 22.12.98	F. Bach	
	Gepr.		
	Nenn		
		IUTA	
			1.028
Zust	Änderung	Stück	Nenn
			Blatt 1
			1 / 1

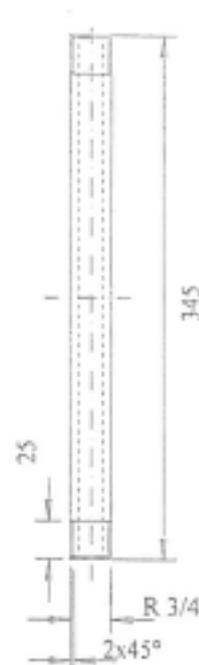


Pos. 33

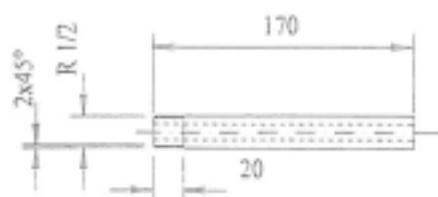
Alle Bohrungen 1x45° angefast



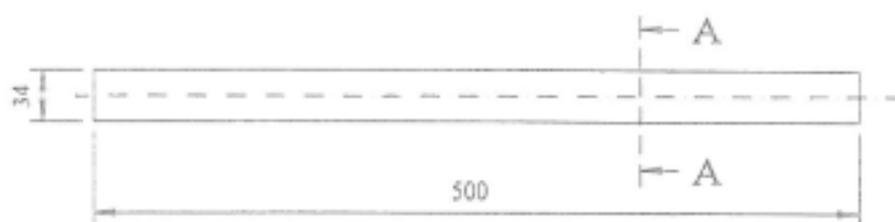
Pos. 34



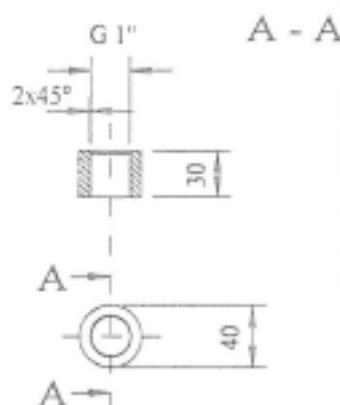
Pos. 35



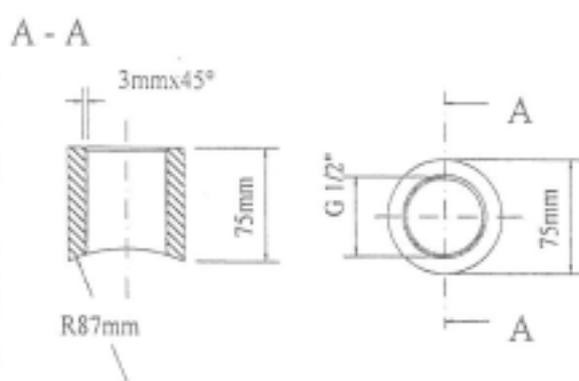
Pos. 37



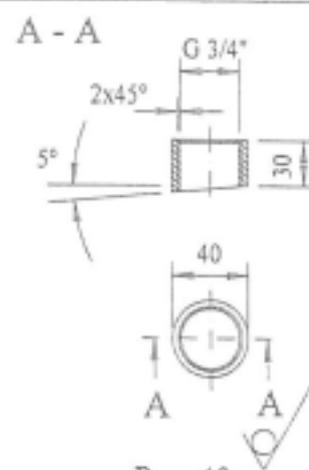
Pos. 38



Pos. 39



Pos. 41



Pos. 40



Pos. 33 - 35/37 - 40/41

Allgemein-
toleranzen
ISO 2768 - m

Maßstab 1:5

1.4713

Datum	None
Bearb.	26.11.88
Gepr.	F. Rack
Norm	

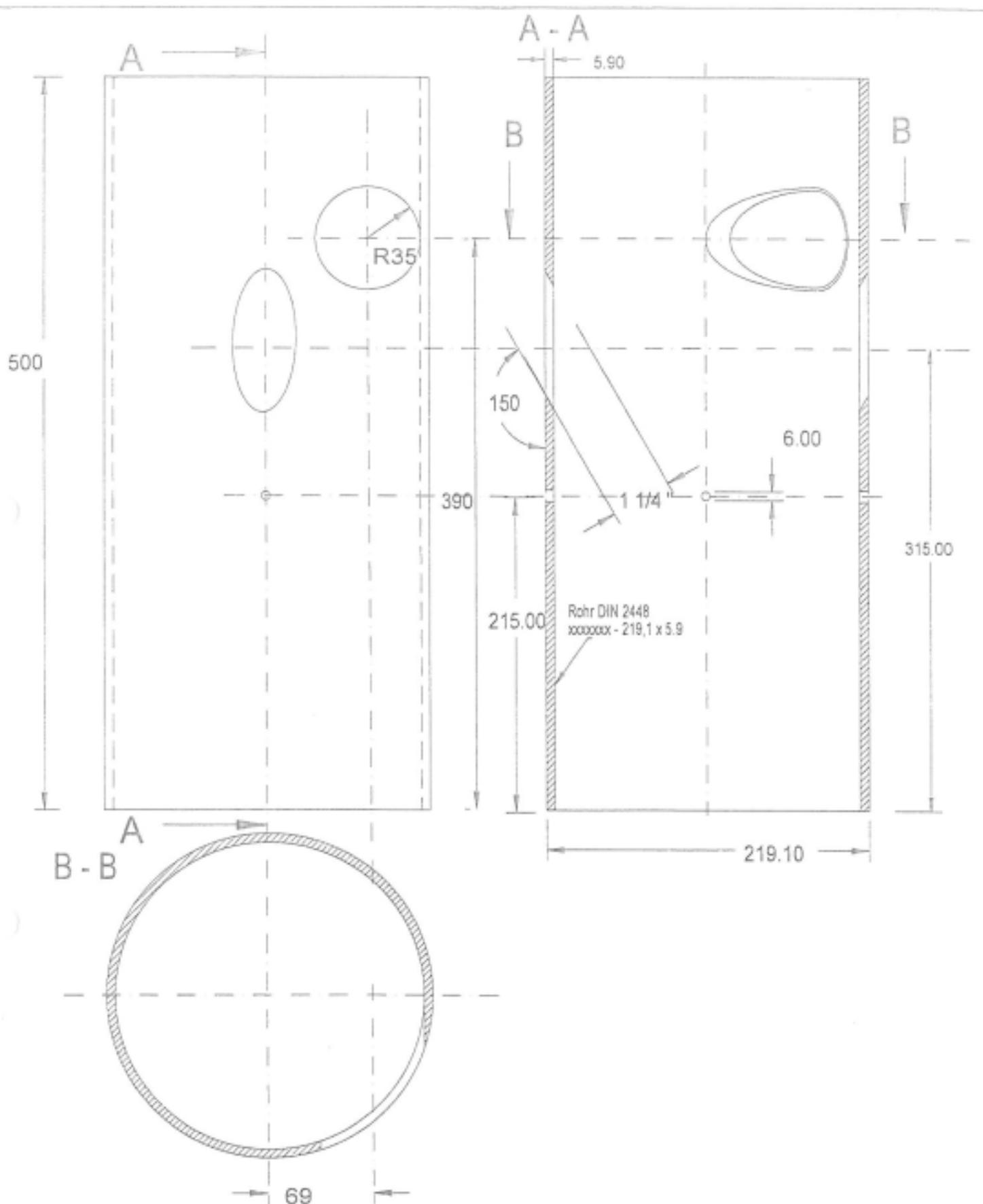
Diverse Teile

IUTA.

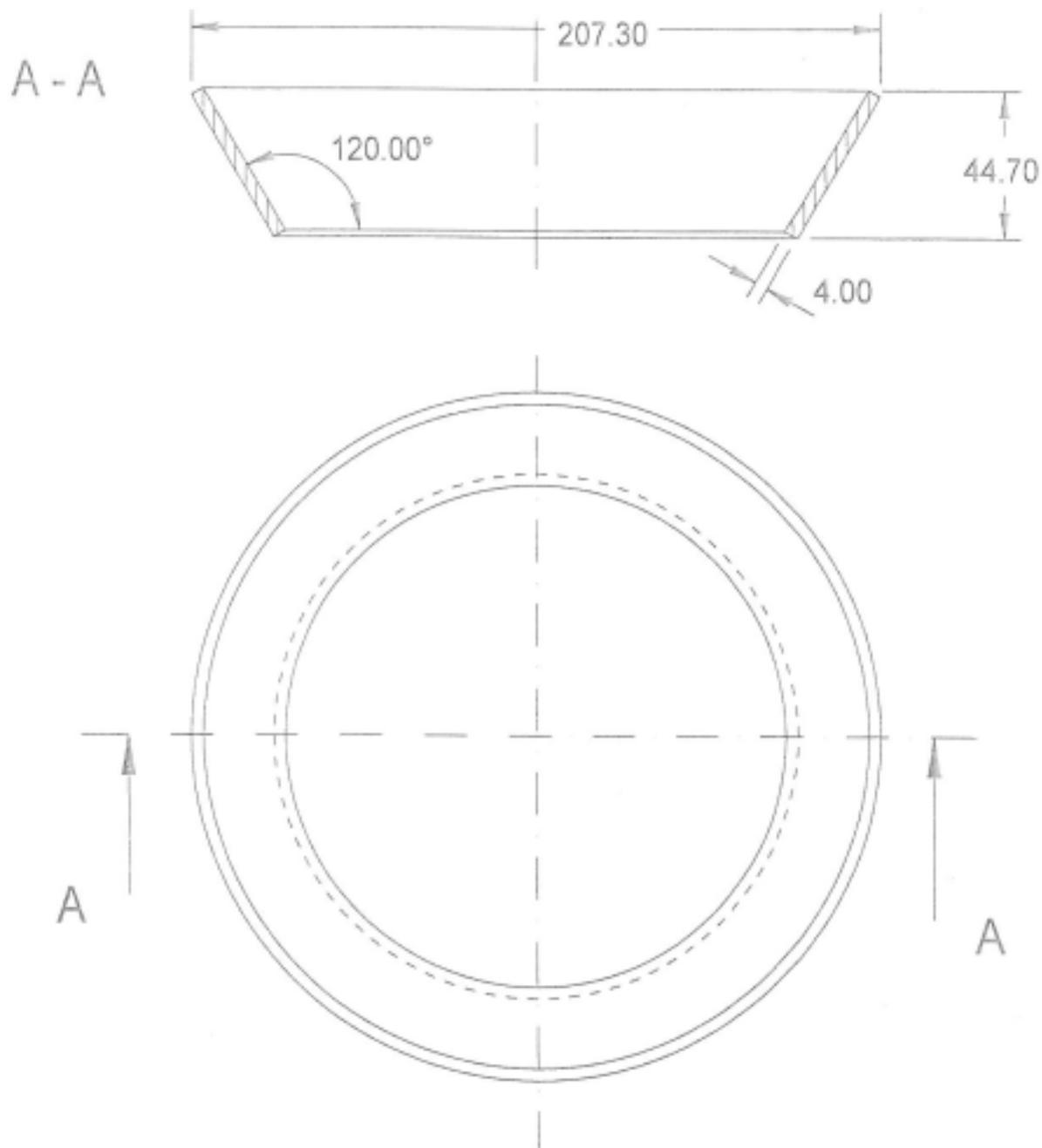
1.029

Blatt 29
39

Zust. Anmerk. Datum Name

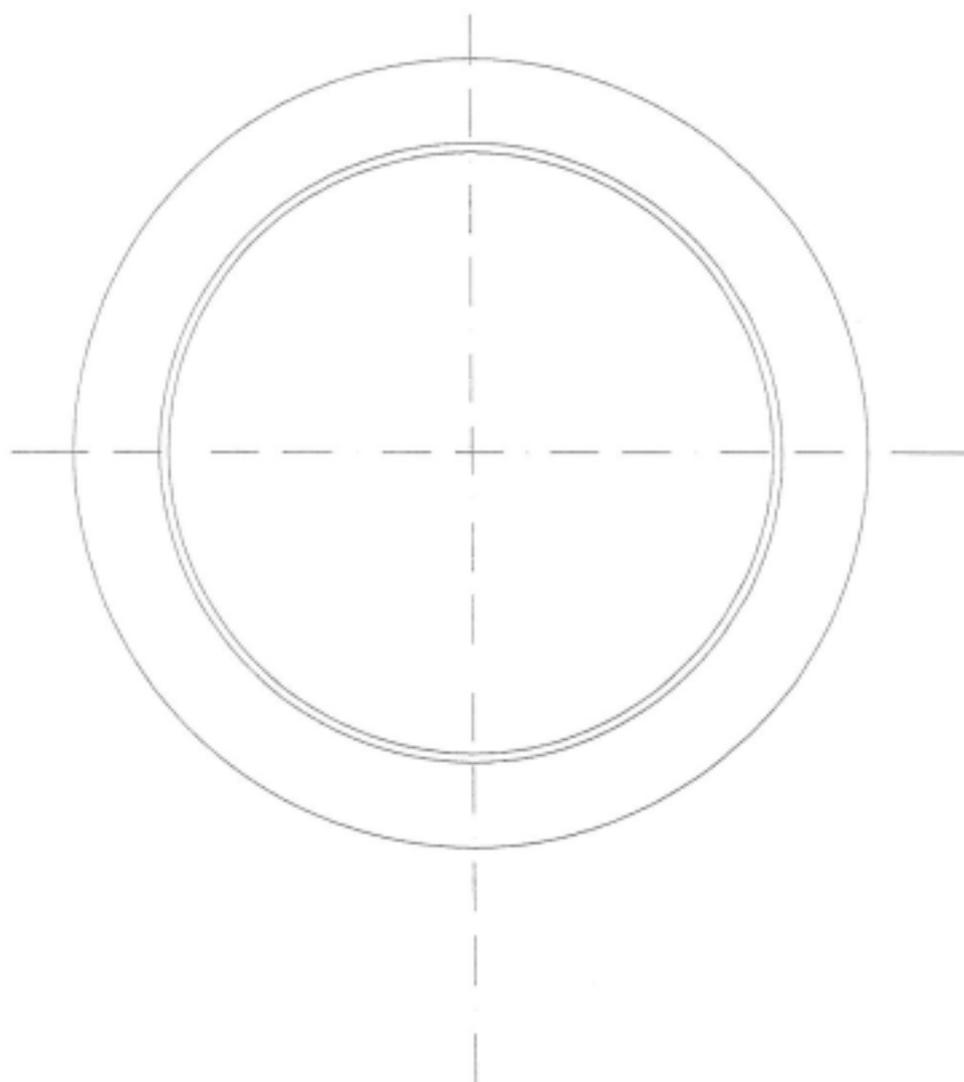
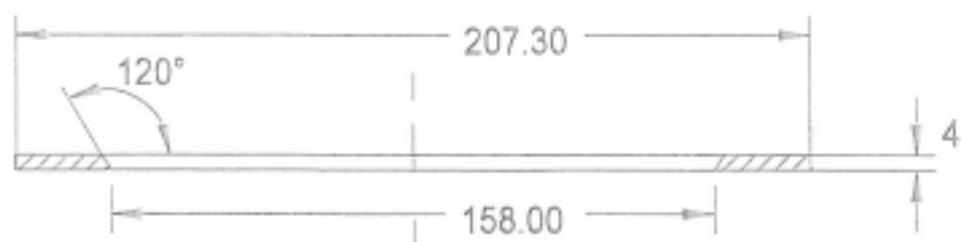


Pos. 103	Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m	Maßstab 1:2	
		Zeichner 16.11.1998	Prüfer Senger
		Zylinder Reaktorstufe II	
		1.103	Blatt
Zust.	Änderung	Datum	Wskt.

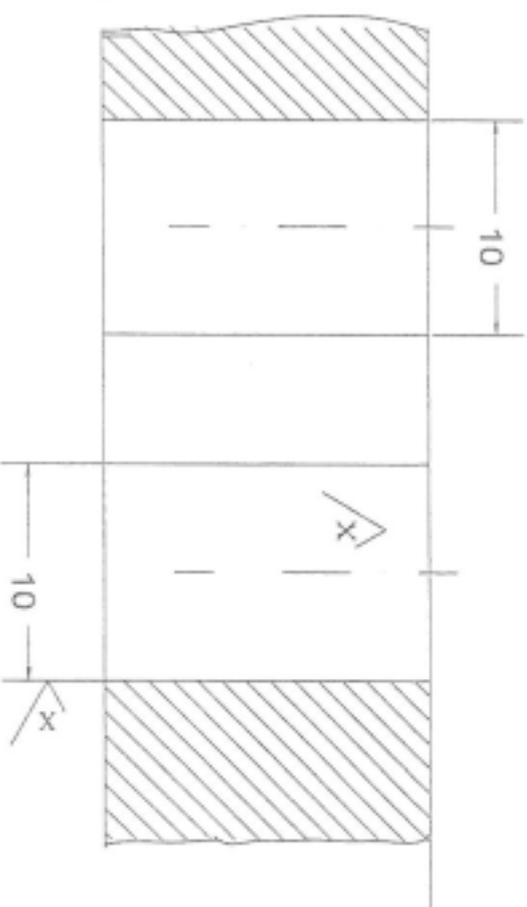
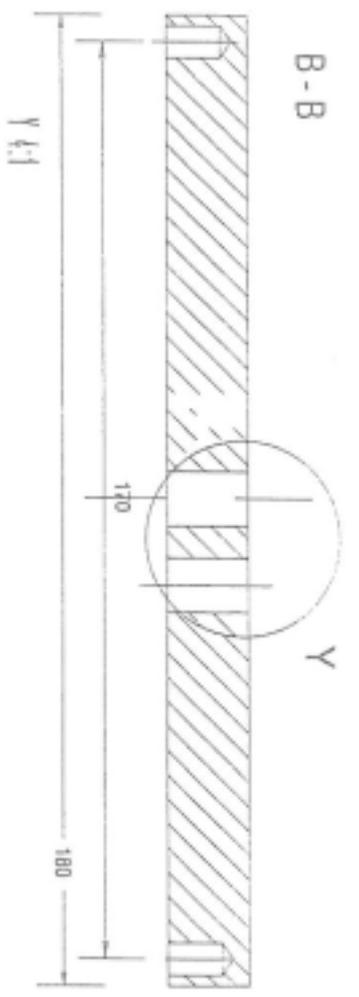
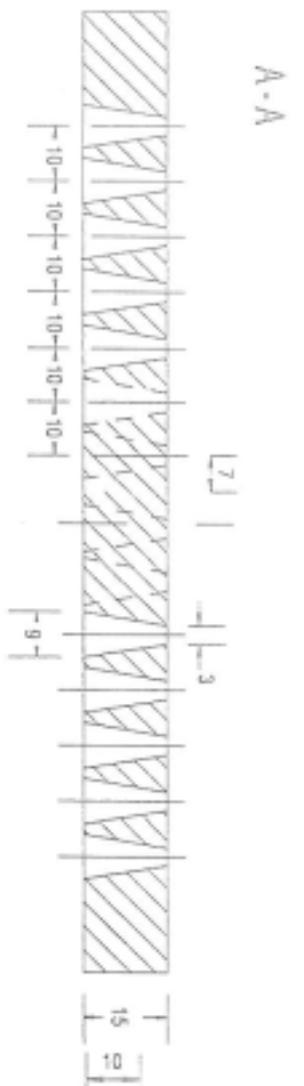
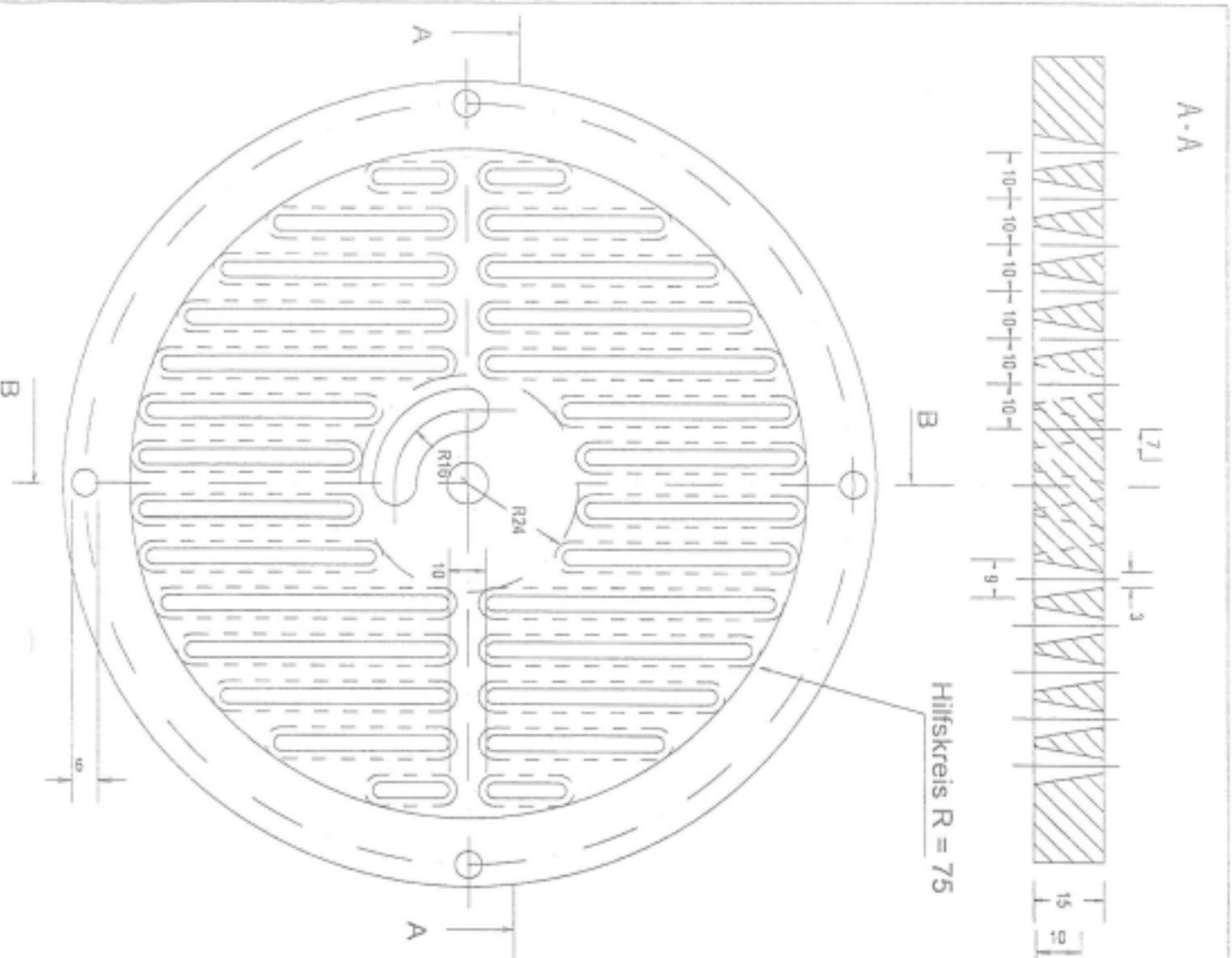


Pos. 104		Allgemeintoleranzen nach ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
		Do tun	None	Einschnürung Stufe II	
		Bearb. an 11/196	Seiger		
		Gepr.			
		Norm			
		IUTA		1.104	
Zust.	Anforderung	Do tun	None	Blatt	
				2	

A - A



Pos.105		Allgemeintoleranzen DIN 2768 - m		Maßstab 1 : 2		
				Ring für Einschnürung		
		Bearb.	Datum			None
		Gepr.	10.11.1998			Seeger
		Norm				
				ILTA		
					Blatt	
					1.105	
Zust.	Änderung	Datum	None		Bl.	

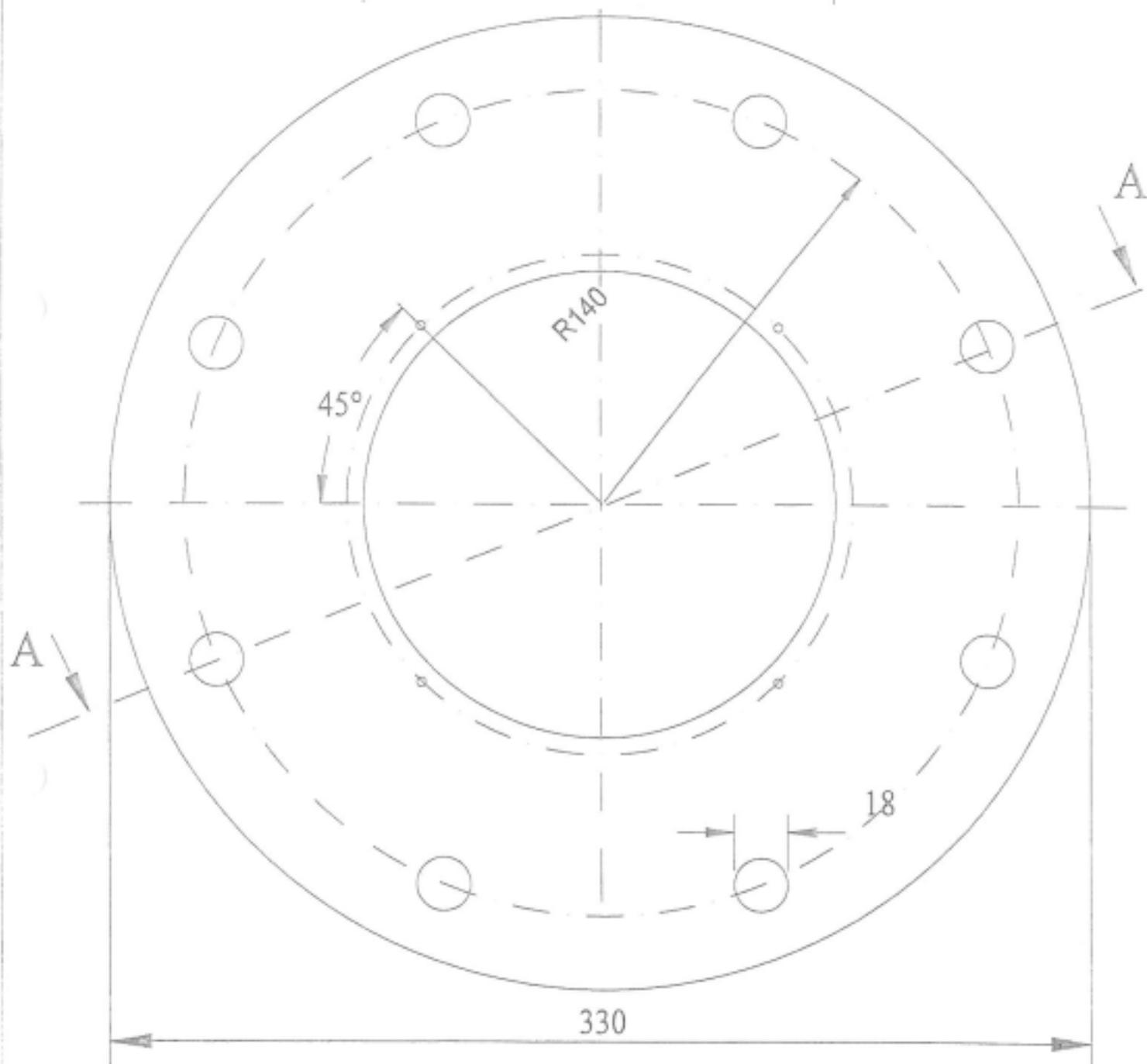
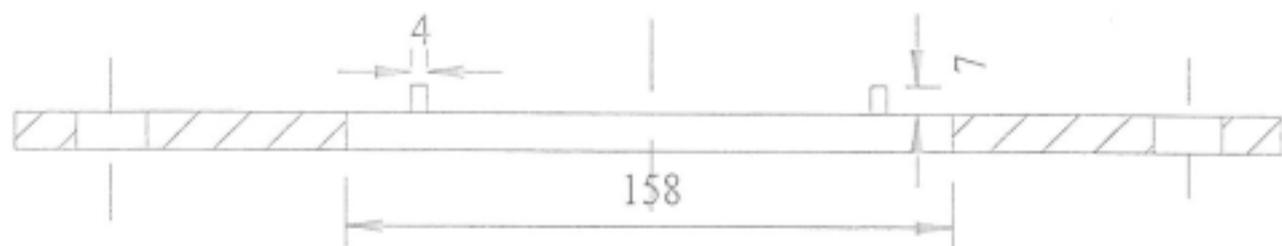


$$\sqrt{x} = \sqrt{\frac{6.3}{x}}$$

$$\varnothing (\sqrt{x})$$

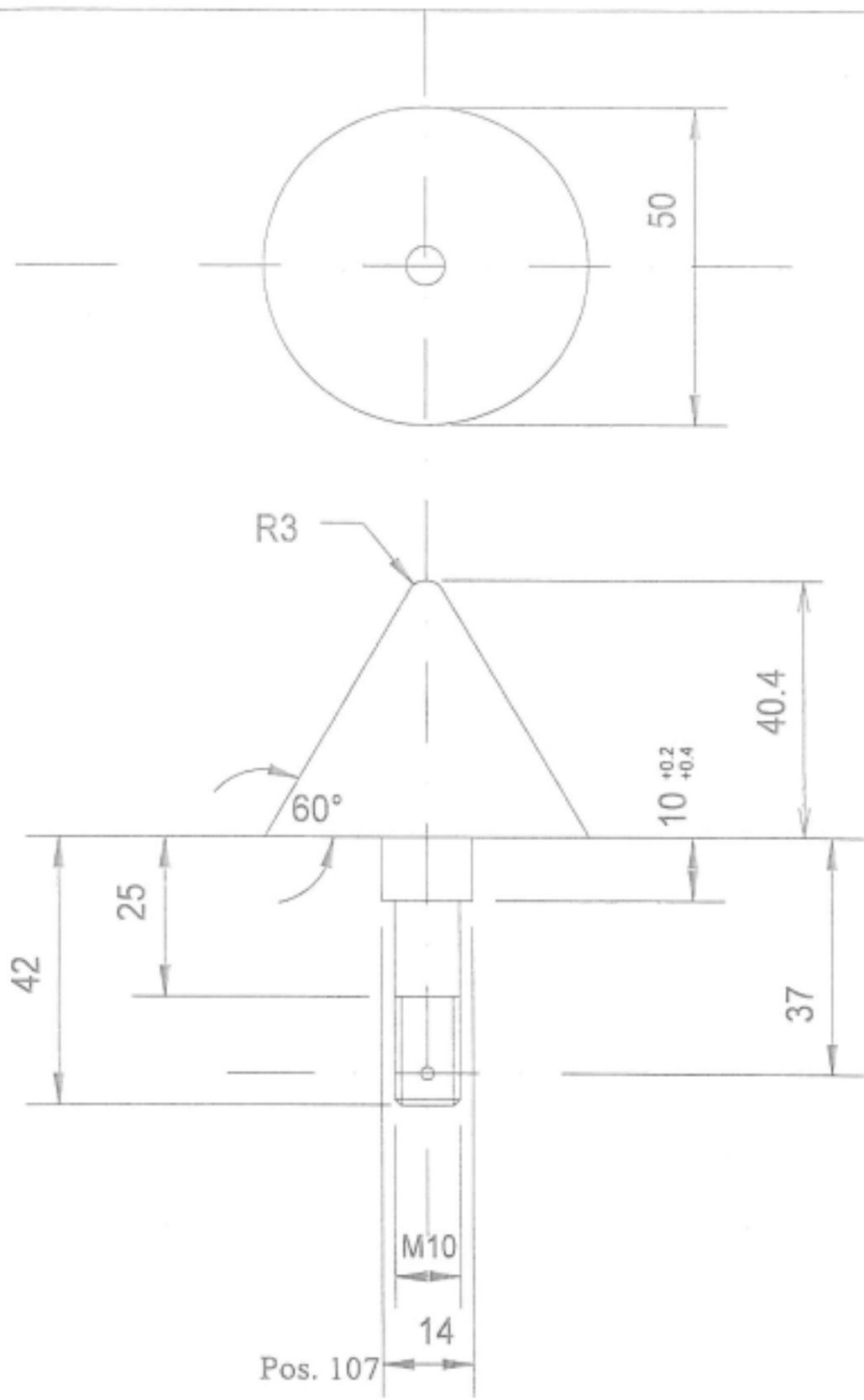
Pos. 106	Allgemeine Toleranzen ISO 2768 - m	Webcode 1:1, 4:1	1.4841
	Norm 2711:1998 Siegel		Rost II
	UTTA		1.106

A - A

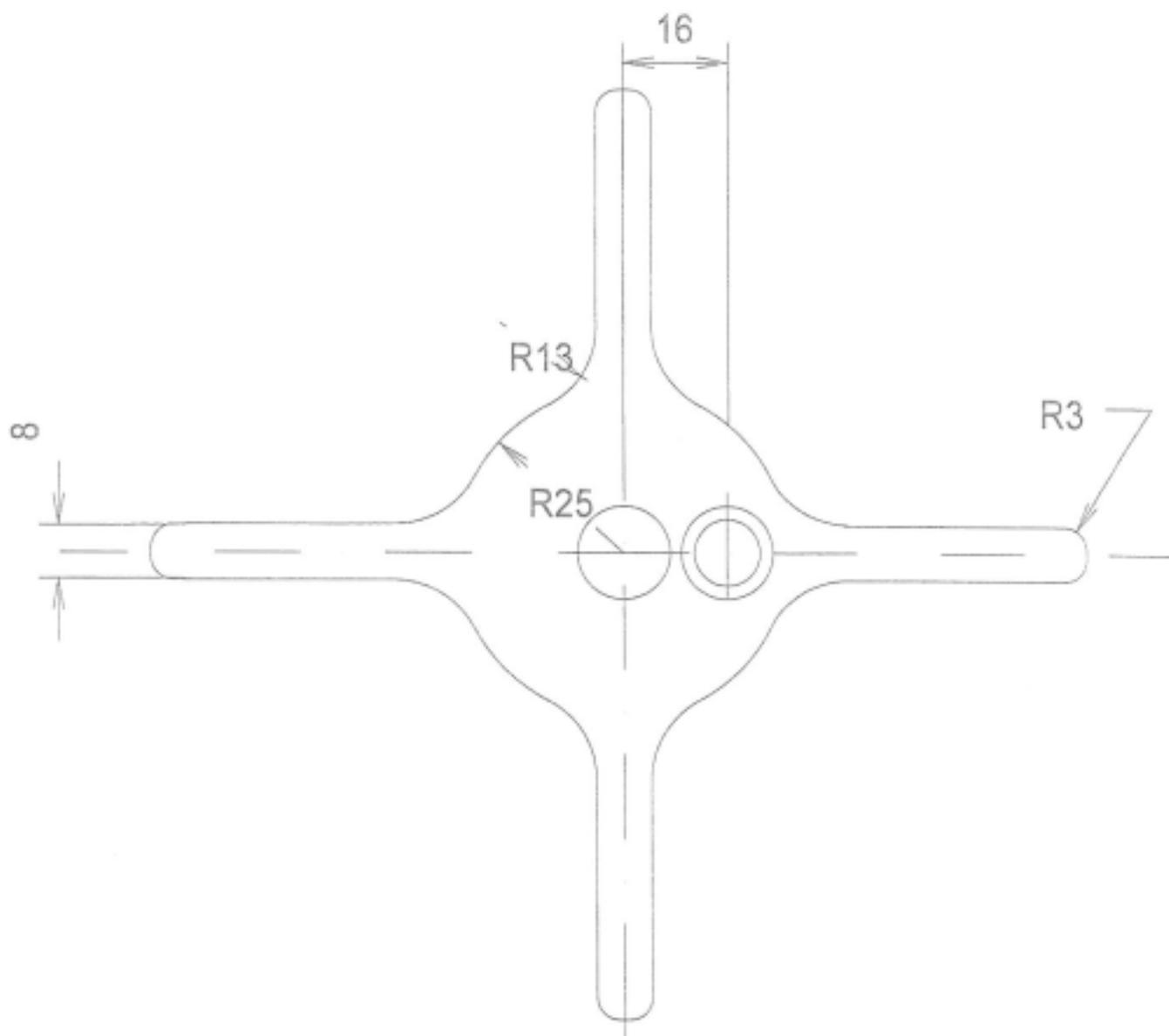
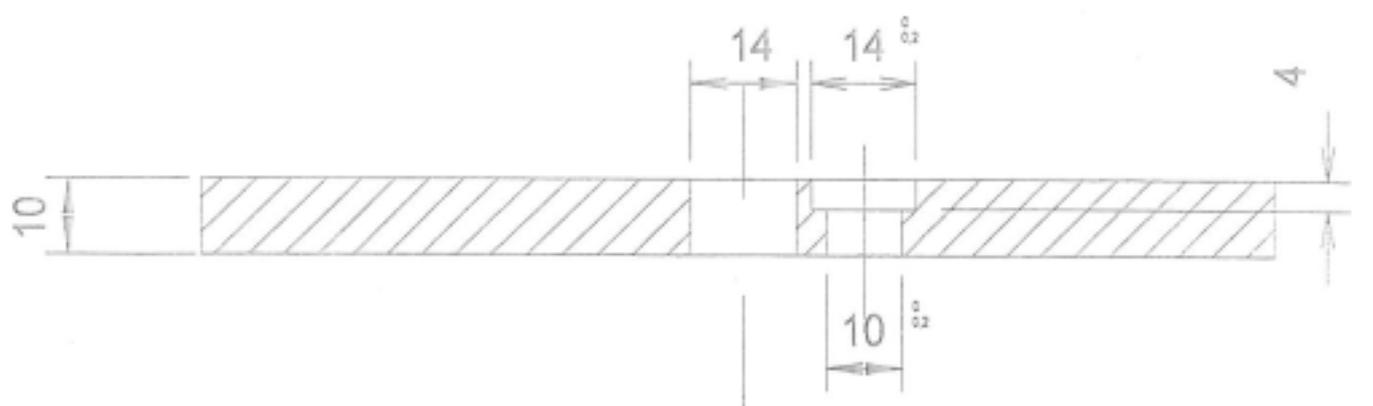


Alle Bohrungen mit
1 x 45° angefast

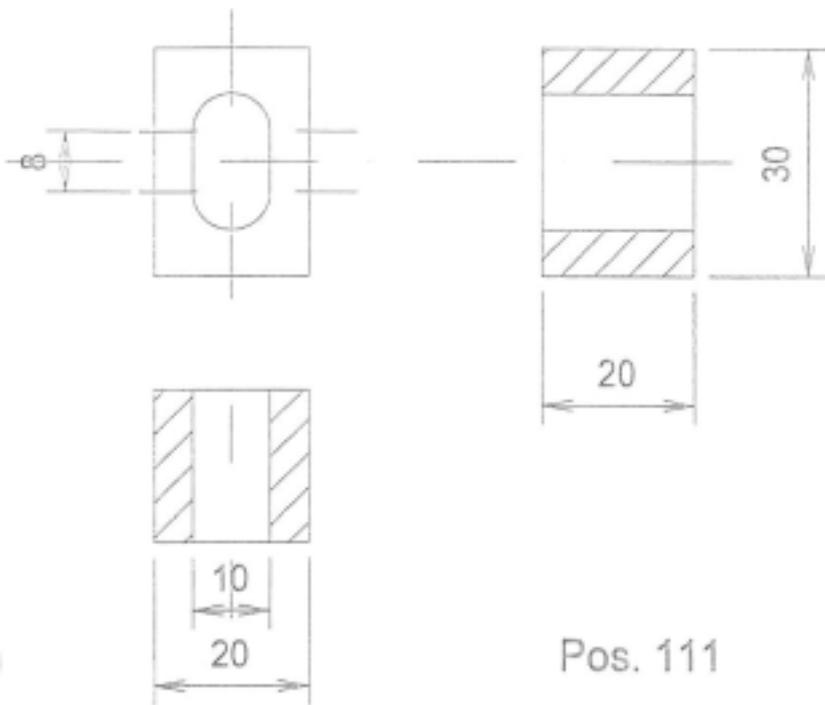
Pos. 107		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
				1.4713	
Anpassung an 2. Stufe		20.12.98	Sejzer	Zust. None	Flansch Rost II
				Bez. 25.11.98	
				Gepr.	
				Norm.	
				RTA	1.107
Zust.	Anderung	Zust.	None		Blatt
					2



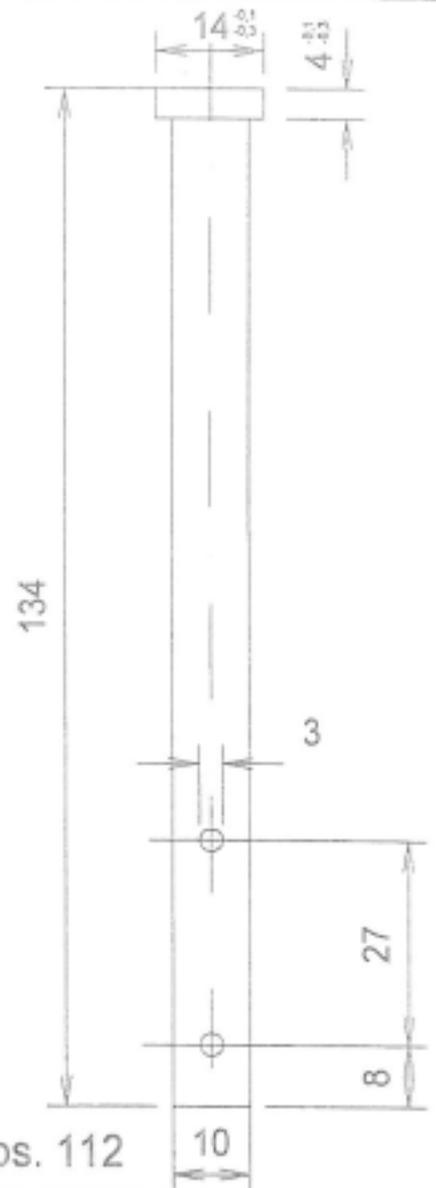
Pos. 108		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
				1.4713	
		Datum Name		Kegel II	
		Besch. 25.11.98 F. Rach			
		Gepr.			
		Wann			
		IUTA		1.108	
				Blatt 23	
				39 B	
Zust	Änderung	Datum	Name		



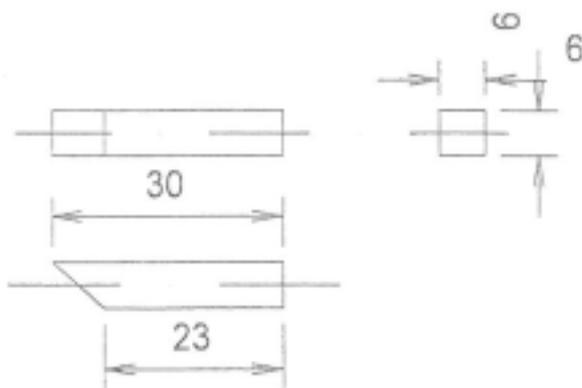
Pos. 109		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2		
				1.4713		
		Datum	Name	Schürhaken II GP		
		Bearb.	18.11.98			F. Rach
		Gepr.				
		Norm				
		IUTA		1.109		
Zust.	Aenderung	Datum	Name	Blatt 23		
				39 B		



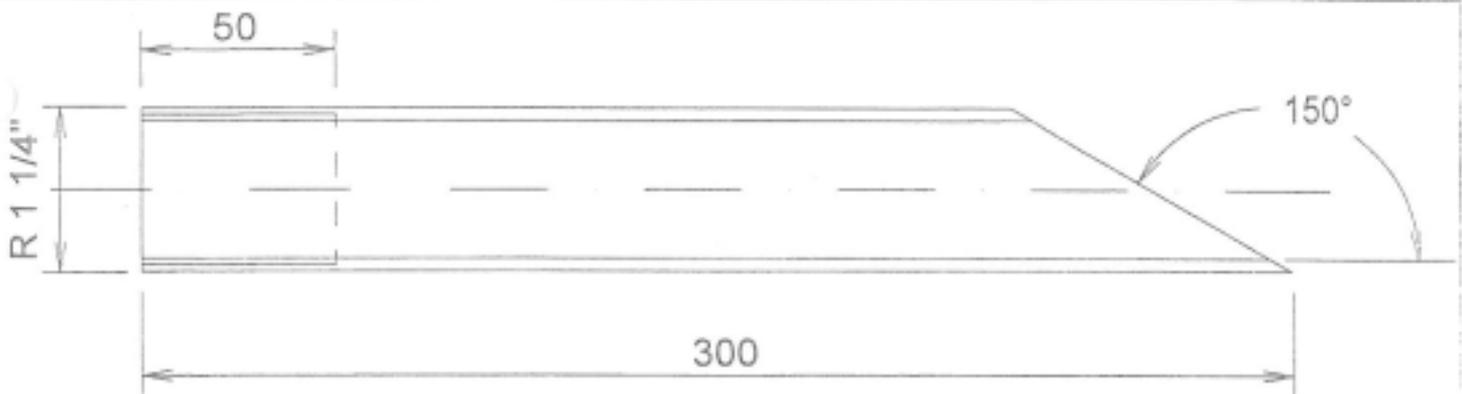
Pos. 111



Pos. 112

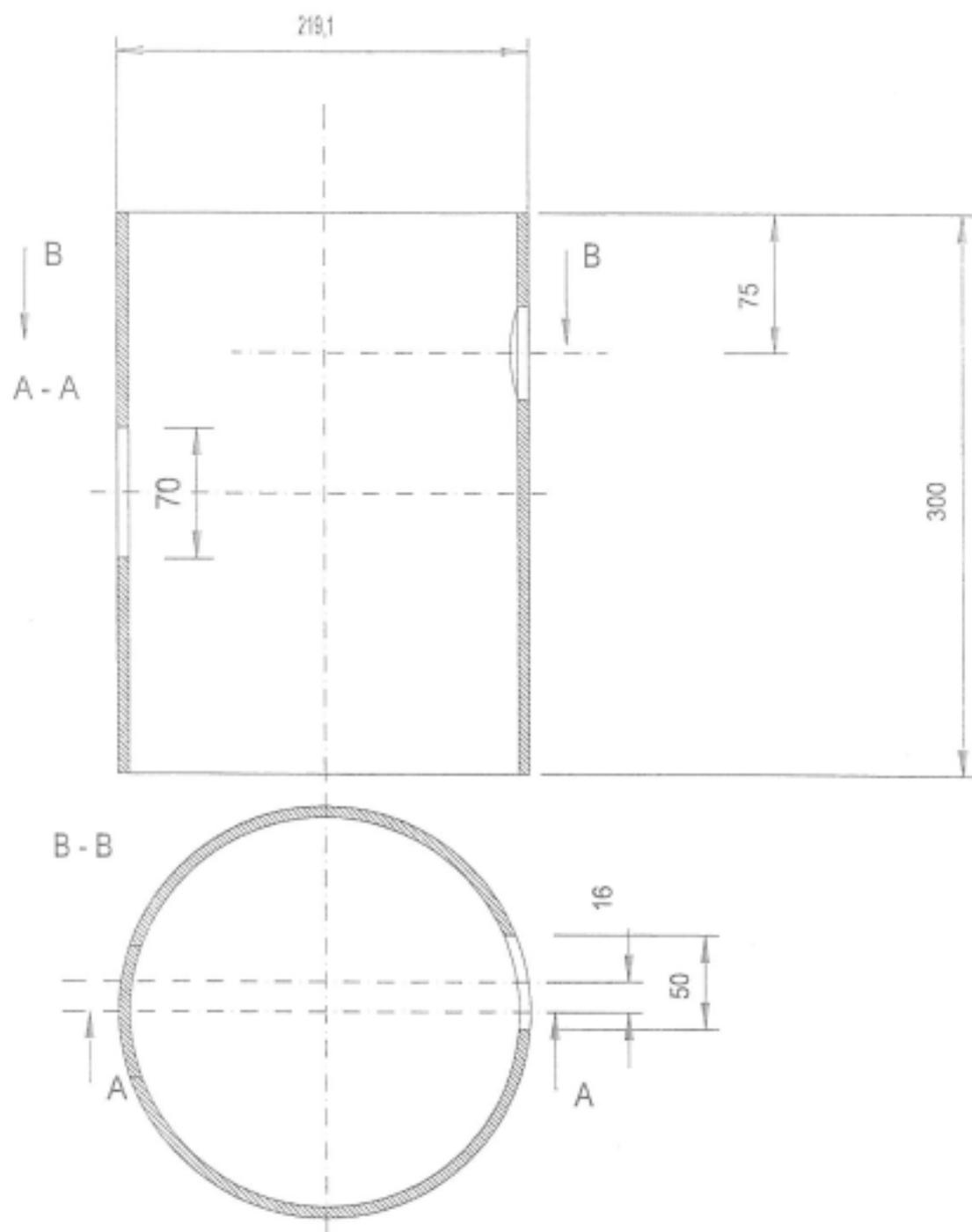


Pos. 115

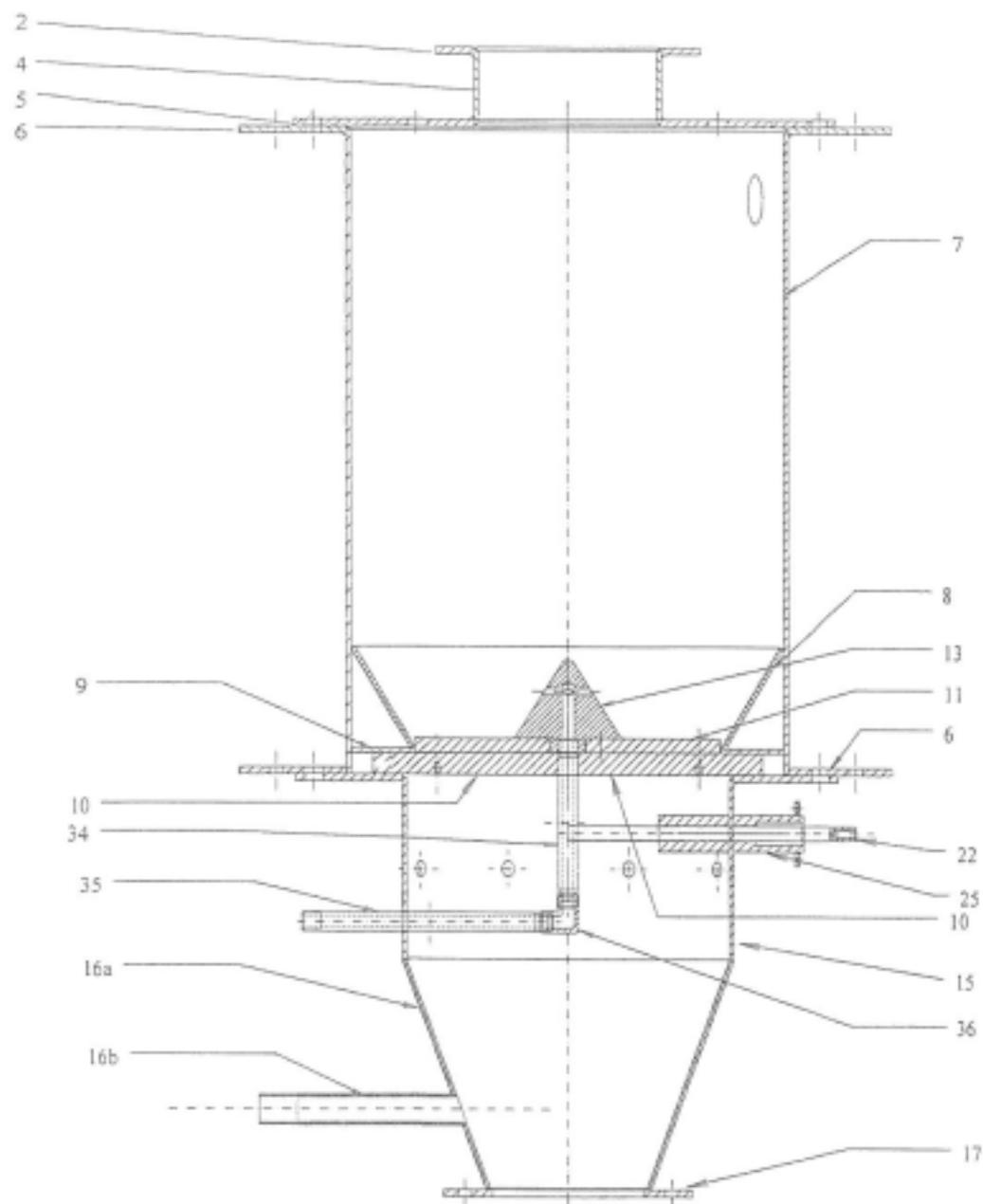


Pos. 114

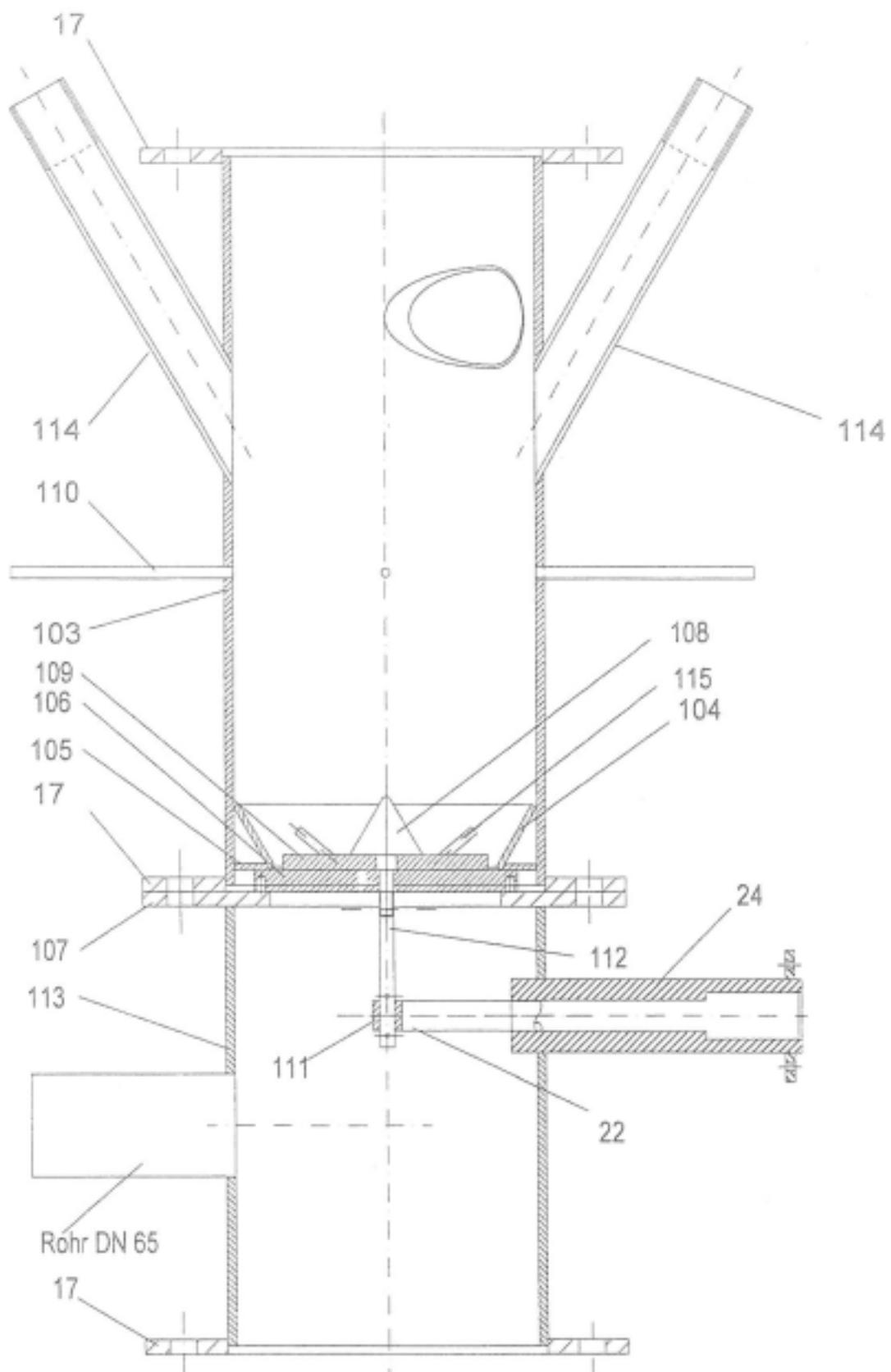
Pos. 111, 112, 114, 115		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:1		
		Datum	Name	Unterer Kulissenstein		
		Bearb.	13.12.98			W. Senger
		Gepr.				
		Wann				
				IUTA		
				1.110		
				Blatt 23		
				39 3		
Zust.	Anderung	Datum	Name			



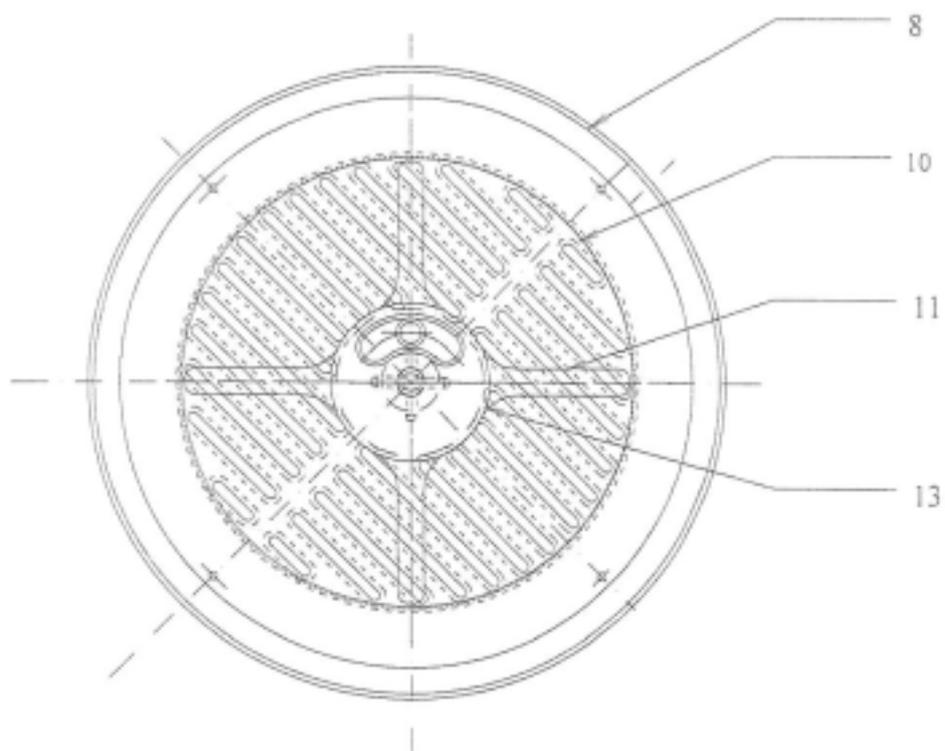
Pos. 113		Allgemein- tolerzen ISO 2768 - m		Maßstab		
		Detail	None	Austrag Stufe II		
		Stand.	16.12.1998			Sepp
		Gepr.				
		Norm				
		IUTA		Blatt		
				1. 111		
Zust.	Änderung	Detail	None	Blatt		



		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:10	
		ISO fun	None	Gesamtzusammenbauzeichnung 1	
		Stand 16.12.98	F. Rach		
		Gepr.			
		Norm			
IUTA				1.201	
Zust.	Änderung	ISO fun	None	39 p	

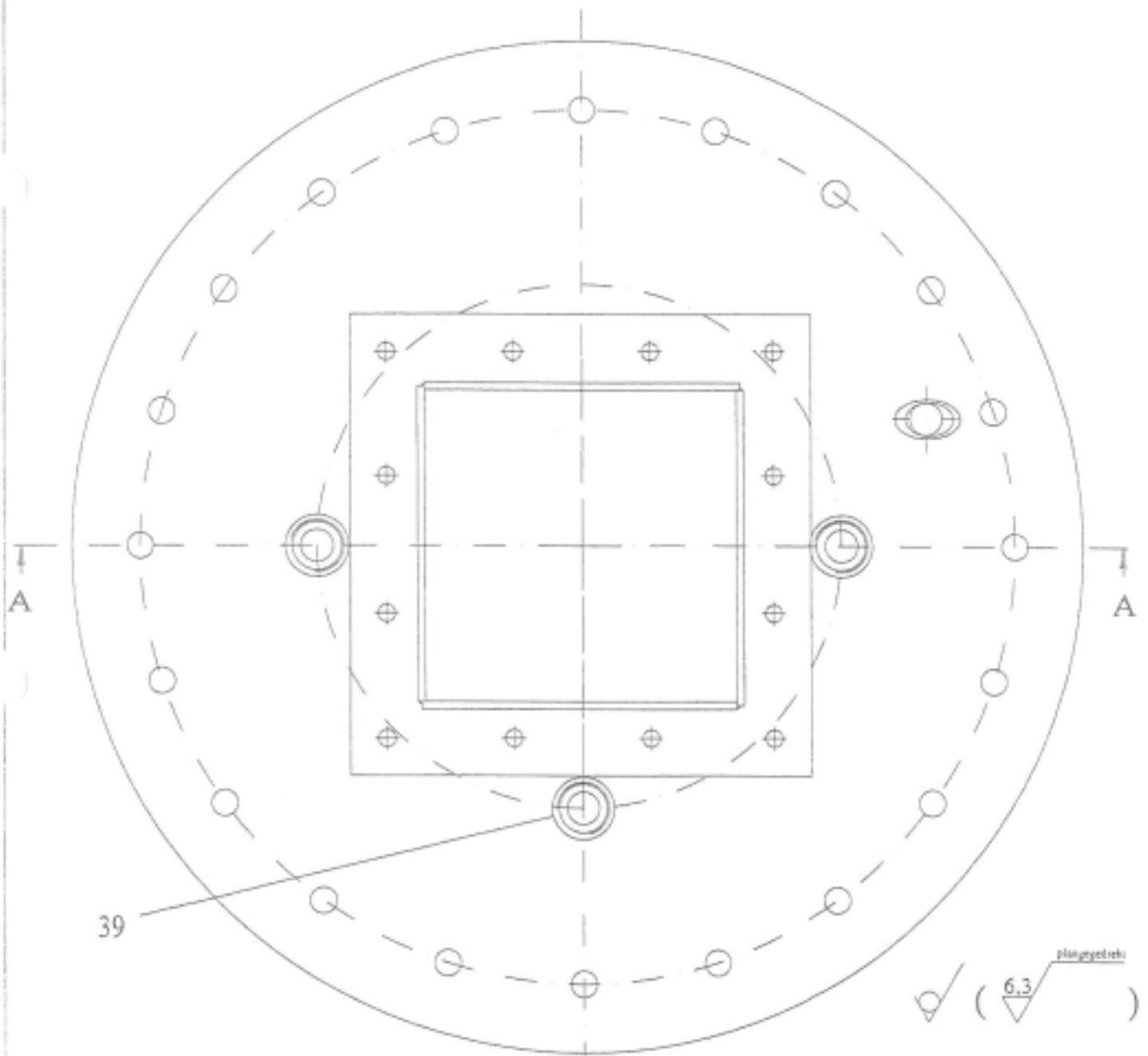
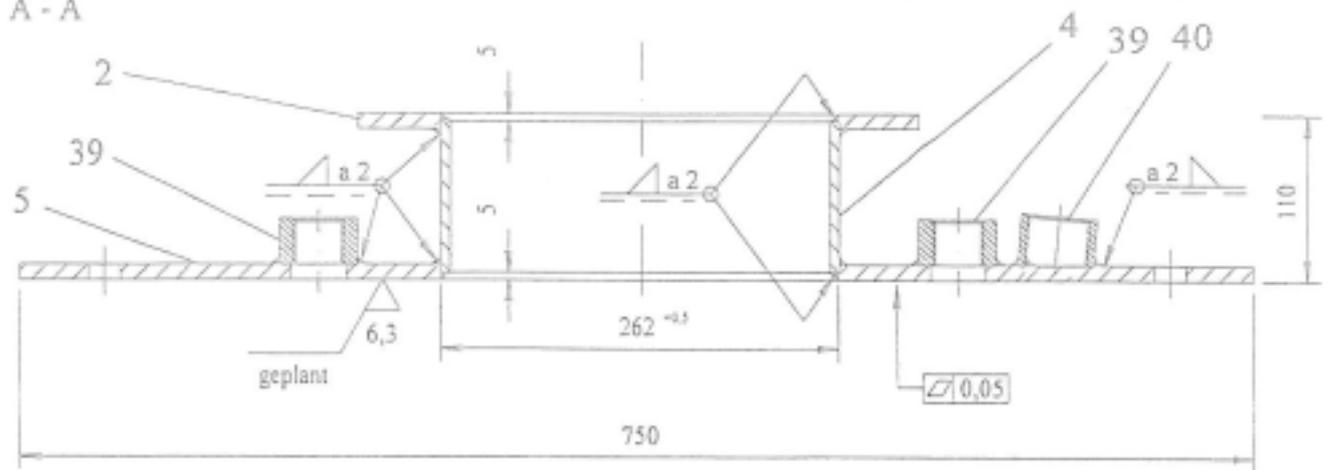


		Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab	
		Datum	None		
		Bezeichnet	13.12.98	W. Senger	
		Gepr.			
		Norm			
		ETA			
				Gesamtzusammenbau- zeichnung Stufe II	
				1.202	
				Blatt	
				8	
Zust.	Änderung	Datum	None		



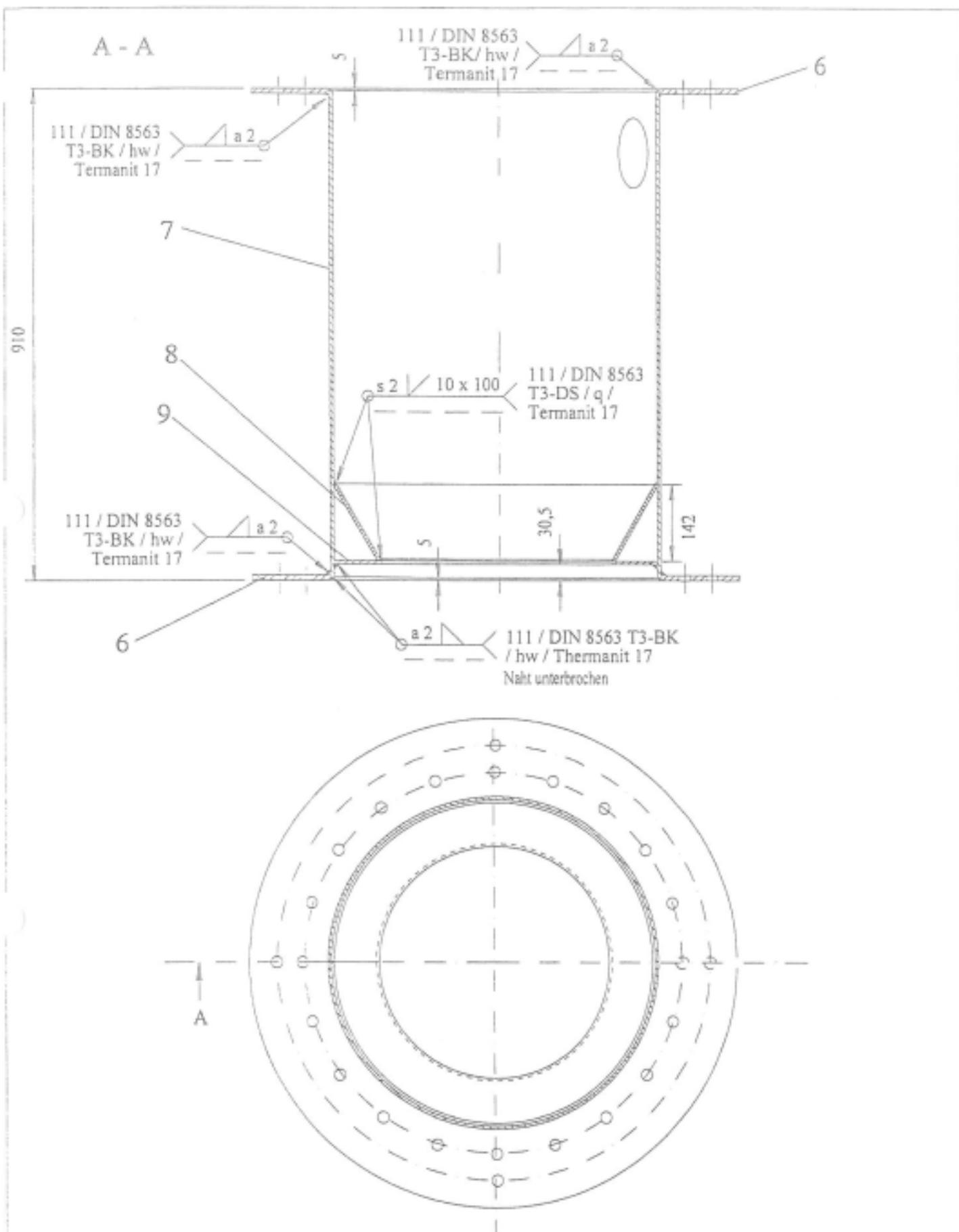
				Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		M:Stab	
Zust				Rechn: 19.11.98		Zusammenbauzeichnung 3 Draufsicht Rost I	
Anmerkung				Zeichn: F. Bach			
				Gepr.			
				Norm:		Blatt	
				IUTA		1.203	
						Blatt	
						2	

A - A



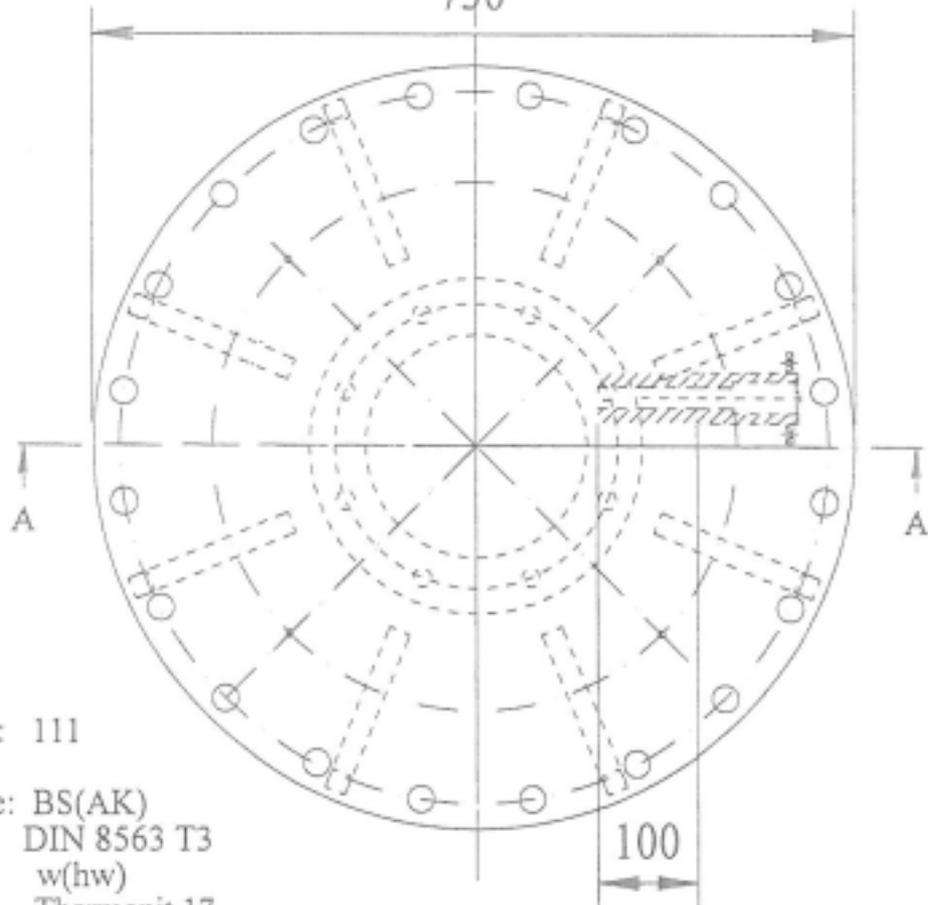
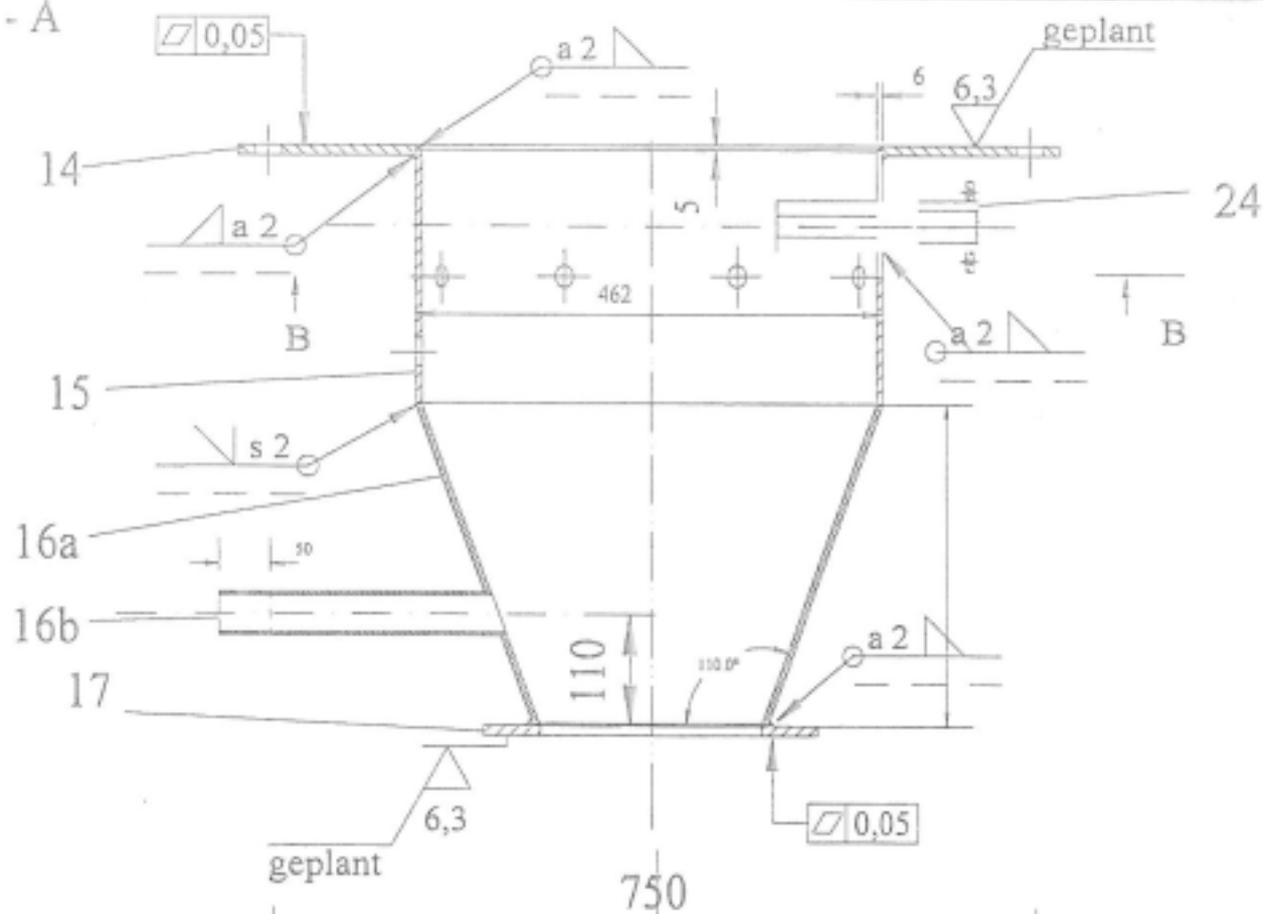
Schweißverfahren: 111
 Alle Kehlnähte
 Bewertungsgr.: BK
 DIN 8563 T3
 Schweißposition: hw
 Zusatzwerkstoff: Thermanit 17

		Allgemein-toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab	1:5
				1.4713	
				Zusammenbauzeichnung 4	
		IUTA		1.204	
				Blatt 34	
				39	
Zust.	Änderung	Blatt	Blatt		



		Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab	1:10
		Bezeichnung	None	1.14713 (1.4301)	
		Beord.	18.12.98	F. Bach	
		Gepr.		Zusammenbauzeichnung 5	
		Norm			
		IUTA			
				1.205	Blatt 34
					39 B
Änderung		Bezeichnung	None		

A - A



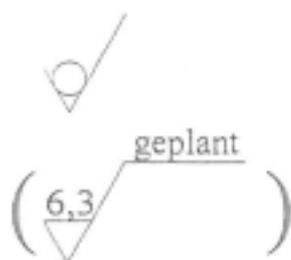
Schweißverfahren: 111

Alle Nähte

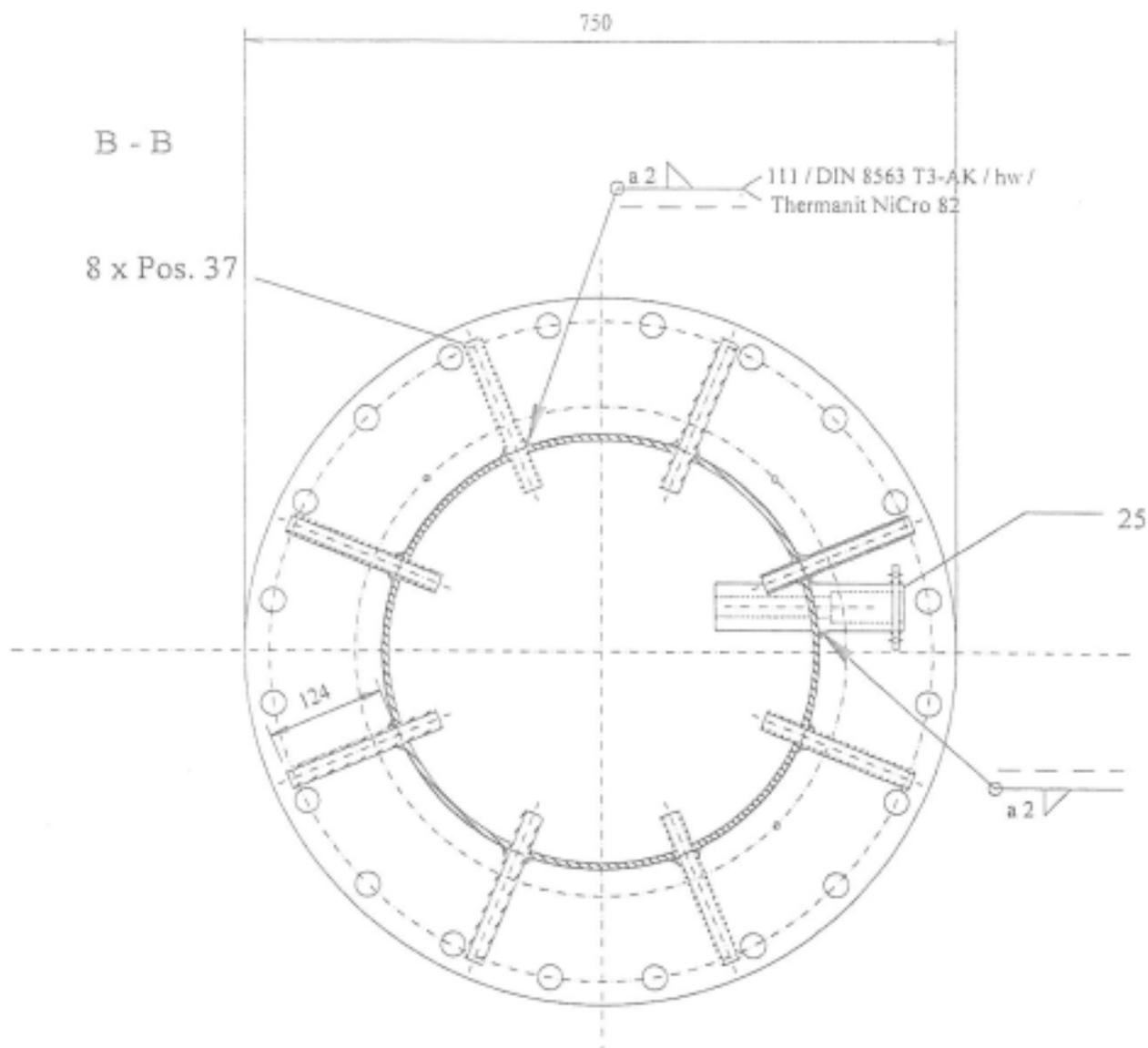
Bewertungsgruppe: BS(AK)
DIN 8563 T3

Schweißposition: w(hw)

Zusatzwerkstoff: Thermanit 17

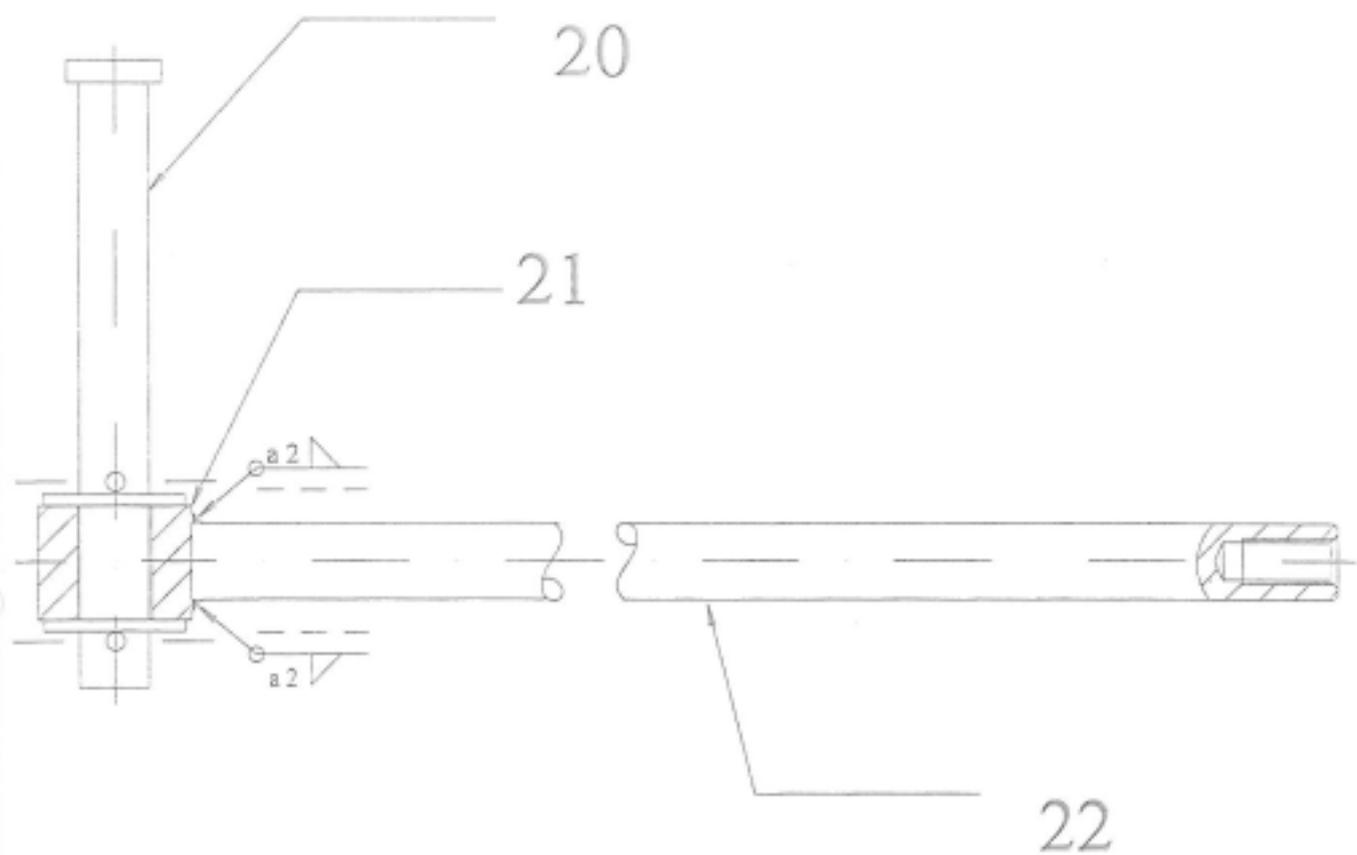


Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab	1:10
		1.4713 (1.4749)	
Bepr.	18.12.98	Zusammenbauzeichnung 6	
Gepr.			
Norm			
ILTA		1.206	
Zust.	Änderung	Datum	Blatt 35
			39 B

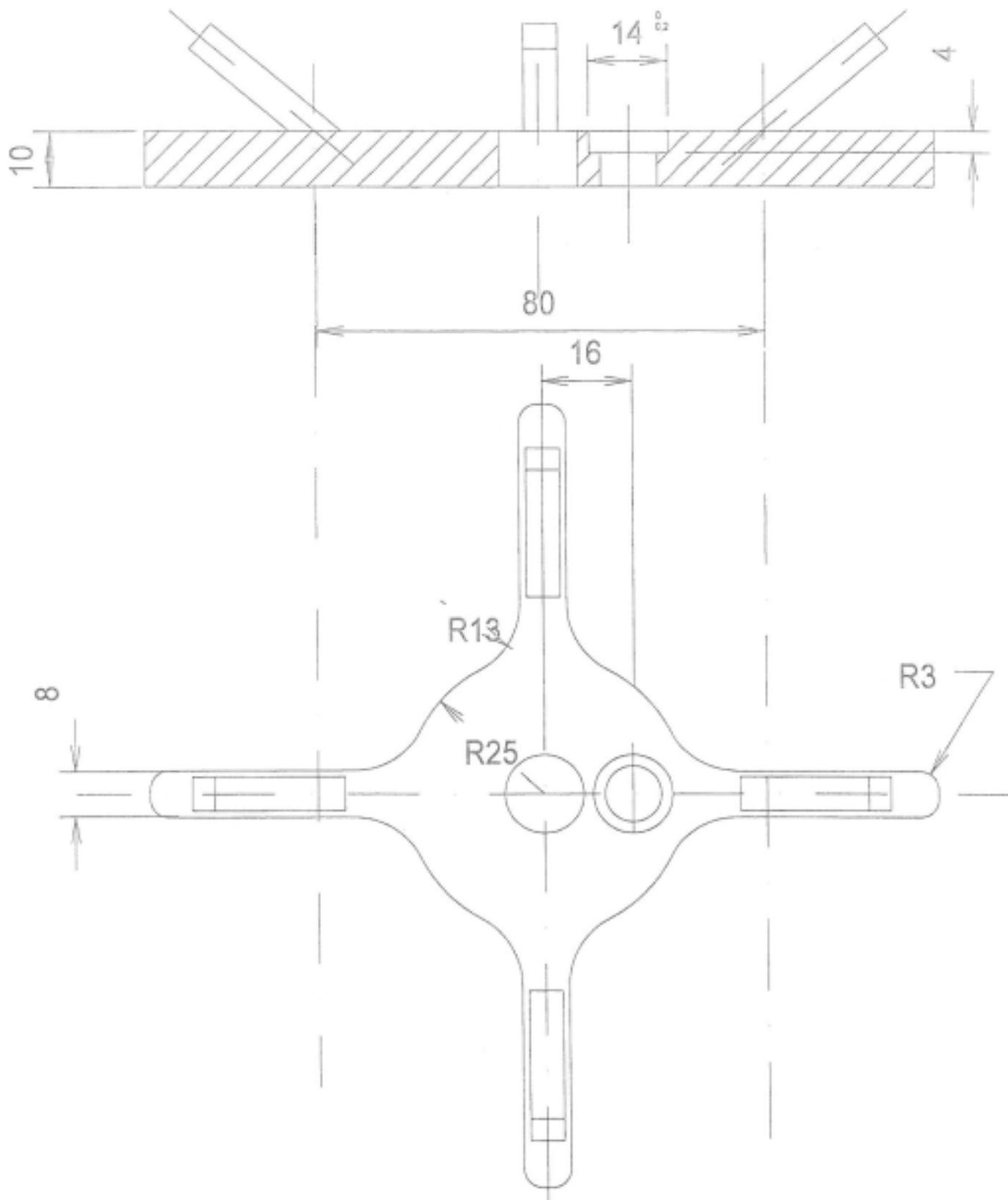


Schweißverfahren: 111
 Kehlnaht an Pos. 24
 Schweißposition: hw
 Zusatzwerkstoff: Thermanit 17

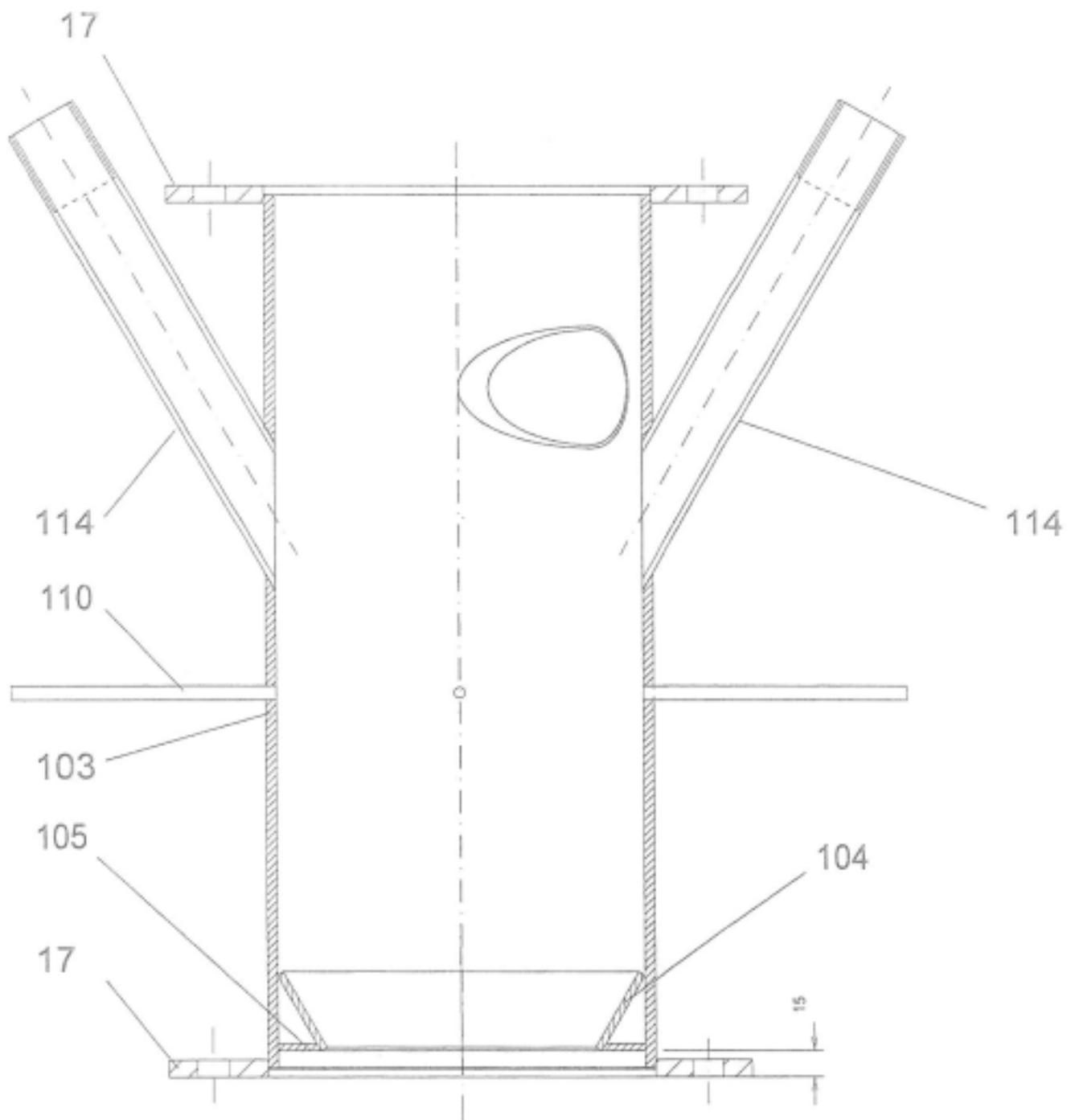
				Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:10	
						1.4713 (1.4749)	
				Besch: 19.12.98		Zusammenbauzeichnung 7	
				Gepr:			
				Norm:			
				IUTA		Blatt 36	
						1.207	
						39 B	
Just	Änderung	Datum	Name				



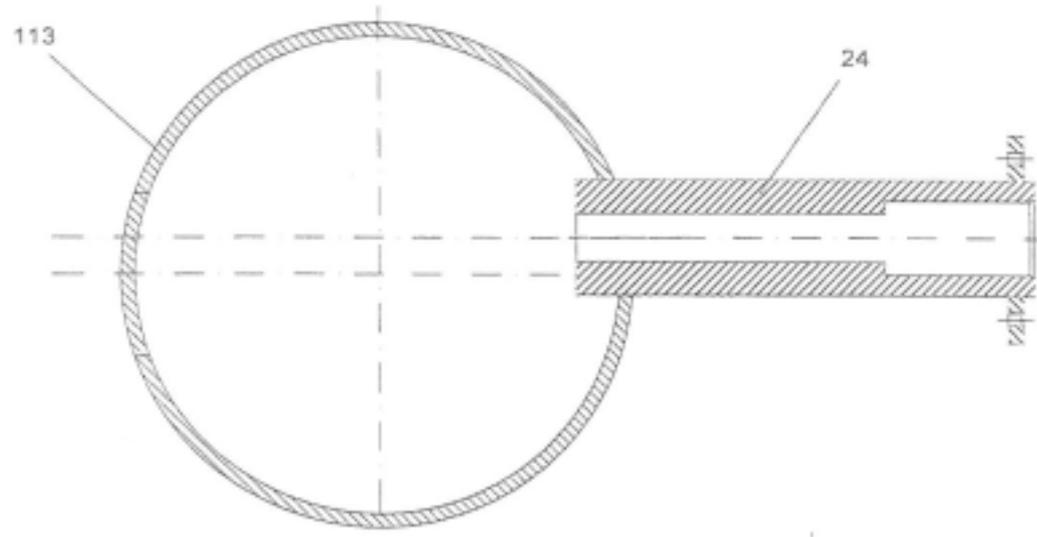
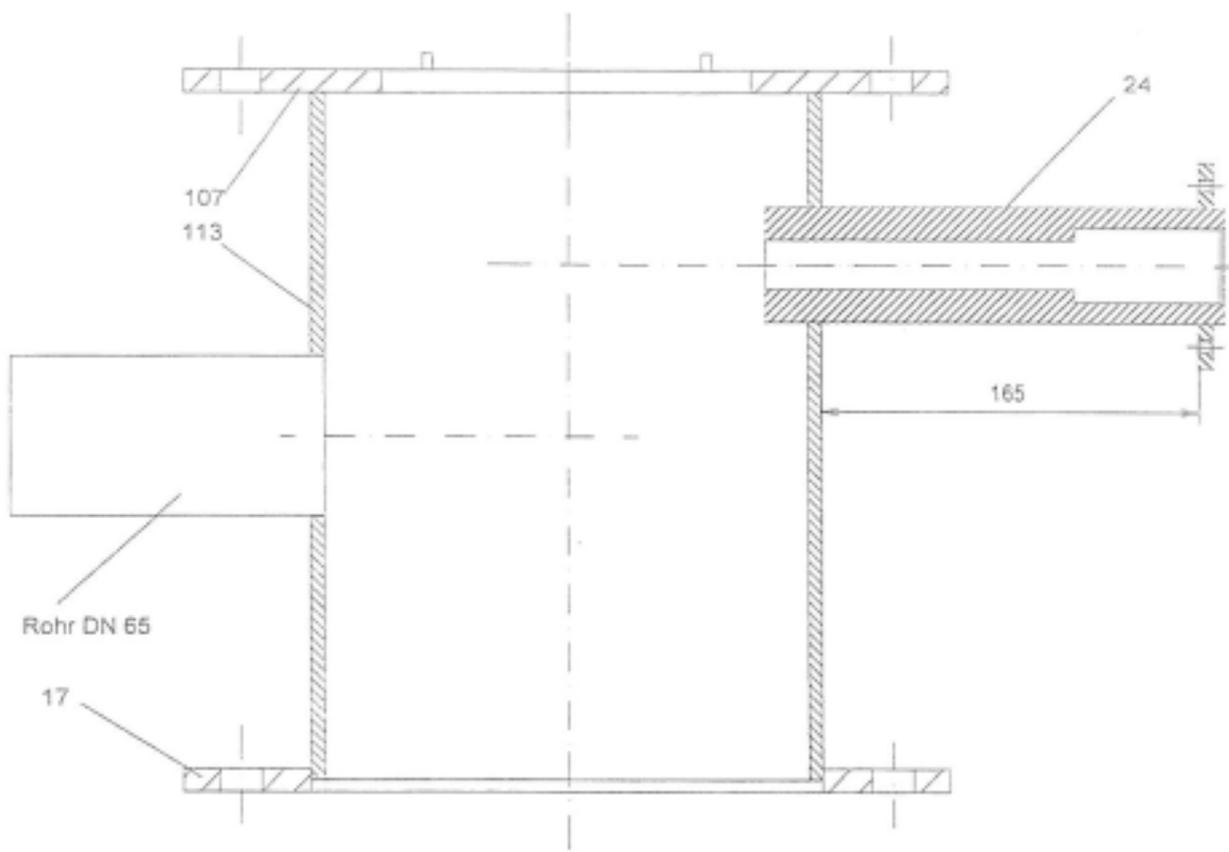
		Allgemein-toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2		
				10 CrMo 9 10		
		De fun	Alle	Zusammenbauzeichnung 8		
		Ererb	21.12.98			F. Bach
		Gepr.				
		Norm				
		IUTA		1.208		
Zust	Änderung	De fun	Werk	Blatt 13 36 Bl.		



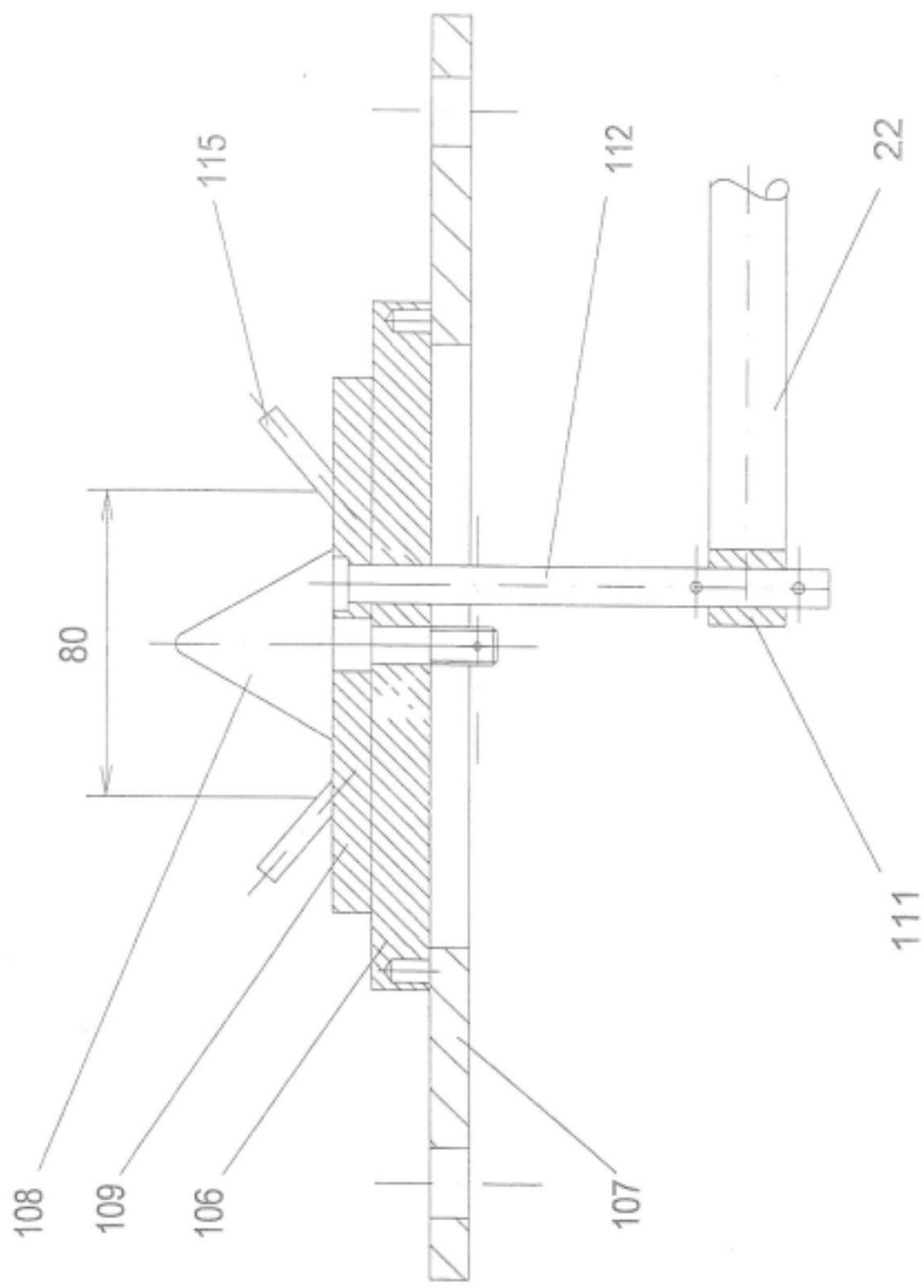
				Allgemeintoleranzen ISO 2768 - m		Maßstab 1:2	
						1.4713	
				Datum Name		Zusammenbauzeichnung 9	
				Bearb. 22.11.98 F. Rach			
				Gepr.			
				Name			
				IUTA		Blatt 23	
						1.209	
						39 A	
Zust.	Änderung	Datum	Name				



				Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab		
				Do tun	None	Zusammenbauzeichnung 10		
				Bearb.	13.12.98			W. Senger
				Gepr.				
				Norm				
				IUTA				
						1.210	Bott	
Zust.	Aenderung	Do tun	None				B	



				Allgemein- toleranzen ISO 2768 - m		Maßstab		
				Datum	Name	Zusammenbauzeichnung 11		
				Besrb.	13.12.98			W. Senger
				Gepr.				
				Norm				
				IUTA				
						1.211	Blatt	
							3	
Zust.	Aenderung	Datum	Name					



Allgemeine Angaben ISO 17018 - 8		Rechnung 14.12.92		W. Berger	
Stand	Reibung	Reibn.	Reibn.	Reibn.	Reibn.
Zusammenbauzeichnung 12			RTA		
1.212			1.212		