

ZADCON GmbH

**Entwicklung von Drehrohrenbauten zur
effektiven/energieeffizienten thermischen Verwertung
von Klärschlamm**

Band I

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem
Az: 38410/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Oliver Kahe

Dessau - Roßlau
Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einheitenverzeichnis	3
2. Abbildungsverzeichnis	4
3. Tabellenverzeichnis	4
4. Begriffserläuterung:	5
5. Zusammenfassung	6
6. Einleitung	7
7. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z1	9
I. Durchführung verfahrenstechnischer Berechnungsverfahren für die Referenzanlagen.....	9
II. Erstellung von Wärmebilanzen	9
III. Erstellung von Stoffbilanzen.....	9
IV. Untersuchungen zur Energieeffizienz	9
7.1 Beschreibung des Verfahrens zur thermischen Klärschlammverbrennung.....	10
7.2 Vorgabe der Betriebsparameter	11
7.3 Berechnung der Trocknungszone.....	11
8. ERLÄUTERUNG ZUM ARBEITSPAKET AP Z2	13
I. Harmonisierung der Versuche mit den Vorgaben des Referenzmodells	13
8.1 Harmonisierung der Versuche mit den Vorgaben des Referenzmodells.....	13
9. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z3	15
I. Konstruktive Untersuchungen und Design der Trocknungszone	15
II. Auswahl geeigneter Materialien für die Drehrohreinbauten	15
III. Ermittlung der mechanischen Belastungen im Betrieb.....	15
IV. Durchführung von Lastanalysen.....	15
9.1 Konstruktive Untersuchungen und Design der Trocknungszone	16
9.2 Spezifischen Anforderungen und Werkstoffauswahl.....	17
9.3 Ermittlung der mechanischen Belastungen im Betrieb.....	18
9.4 Durchführung von Lastanalysen.....	20
10. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z4	28
I. Untersuchungen zur Montage der Einbauten (innen/außen) im Drehrohr.....	28
II. Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand.....	28
III. Fertigungsaspekte der Einbauten (Machbarkeit).....	28
IV. Schätzung von ggfs. zusätzlichen Herstellungskosten	28
10.1 Untersuchungen zur Montage der Einbauten (innen/außen) im Drehrohr.....	29
10.2 Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand.....	31
10.3 Fertigungsaspekte der Einbauten (Machbarkeit).....	33
10.4 Schätzung von ggfs. zusätzlichen Herstellkosten	34
11. Fazit	35

1. Einheitenverzeichnis

Ofendurchsatz (fertig)	[t/h]	Tonnen pro Stunde
alternativ: Aufgabedurchsatz	[t/h]	Tonnen pro Stunde
Aufgabegutfeuchte	[%]	Prozent
Endfeuchte	[%]	Prozent
spez. Wärme - Material	[kJ/(kg*K)]	
Schüttdichte des Materials	[t/m ³]	Tonne pro Kubikmeter
mittlere / max. Aufgabekorngröße	[mm]	Millimeter
Heizwert - gasförmiger Brennstoff	[kJ/m ³ N]	
Reaktionswärme	[kJ/kg]	
	[MJ/h – TS)	
spez. Wärme	[kJ/(m ³ N*K)]	
Dichte der Flüchtigen	[kg/m ³ N]	
Material-Ofeneintrittstemperatur	[°C]	Grad Celsius
Material-Ofenaustrittstemperatur	[°C]	Grad Celsius
Abgastemperatur	[°C]	Grad Celsius
Verweilzeit des Materials	[min]	Minuten
(altern.) Füllgrad	[%]	Prozent
...		
...		
...		

2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt eines Drehrohres mit Sektionaleinbauten	13
Abbildung 2: Geometrie vom Versuchsmodell	14
Abbildung 3: konstruktive Umsetzung des Versuchsmodelles - gewalzt (links) und gekantet (rechts)	16
Abbildung 4: Drehrohr mit Ausmauerung o. Einbauten	20
Abbildung 5: Drehrohr mit Ausmauerung m. Einbauten	22
Abbildung 6: Maximalwert der Biegespannung (Resultierende) Drehrohr o. Einbauten	24
Abbildung 7: Maximalwert der Biegespannung (Resultierende) Drehrohr m. Einbauten	24
Abbildung 8: Maximalwert der Torsionsspannung (Resultierende) Drehrohr o. Einbauten	25
Abbildung 9: Maximalwert der Torsionsspannung (Resultierende) Drehrohr m. Einbauten	25
Abbildung 10: Sicherheit gegen Fließen Drehrohr o. Einbauten.....	26
Abbildung 11: Sicherheit gegen Fließen Drehrohr m. Einbauten	26
Abbildung 12: Sicherheit gegen Dauerbruch Drehrohr o. Einbauten	27
Abbildung 13: Sicherheit gegen Dauerbruch Drehrohr m. Einbauten	27
Abbildung 14: Drehrohrwand mit Verschraubungslöcher	32
Abbildung 15: Verschraubungsleisten im Drehrohr.....	32

3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgabe der Betriebsparameter.....	11
Tabelle 2: Berechnung der Trockenzone.....	12
Tabelle 3: Belastungen und Sicherheiten für die Referenzanlage ohne Einbauten.....	21
Tabelle 4: Belastungen und Sicherheiten für die Referenzanlage mit Einbauten.....	23
Tabelle 5: Radialkräfte für Los- u. Festlager.....	23

4. Begriffserläuterung:

Seite – X: Kraftschluss (Reibschluss):

Kraftschlüssige Verbindungen setzen eine Normalkraft z. B. die Gewichtskraft auf die miteinander verbindenden Flächen voraus. Ihre gegenseitige Verschiebung ist verhindert, solange die durch die Haftreibung bewirkte Gegenkraft nicht überschritten wird. (Quelle: Wikipedia)

Seite – X: Stoffschluss:

Stoffschlüssige Verbindungen werden alle Verbindungen genannt, bei denen die Verbindungspartner durch atomare oder molekulare Kräfte zusammengehalten werden. Sie sind gleichzeitig nicht lösbare Verbindungen, die sich nur durch Zerstörung der Verbindungsmittel trennen lassen. (Quelle: Wikipedia)

Seite – X: Erosiv (Erosionskorrosion):

Ist ein Werkstoffabtrag infolge von mechanischem Oberflächenabtrag (Erosion) und Korrosion. Laut Definition wird diese Art der Korrosion durch einen erosiven Angriff auf die Schutzschicht ausgelöst. Bevorzugt unterliegen Rohrleitungen und Anlageteile dieser besonderen Form der Korrosion, die von Flüssigkeiten oder einem Zweistoffsystem wie Wasser/Dampf mit höherer Geschwindigkeit und/oder abrasiven Teilchen durchströmt werden. (Quelle: Wikipedia)

Seite – X: Trail and Error Methode (Versuch und Irrtum):

Den besten Weg zur Lösung eines Problems zu finden, indem man verschiedene Wege beschreitet und so nach und nach Fehler und Fehlerquellen ausschaltet. (Quelle: Duden)

5. Zusammenfassung

Bei der thermischen Entsorgung von Klärschlamm, kann bei der Referenzanlage rein rechnerisch, durch die Entwicklung der neuen Einbauten der benötigte Energiebedarf und die daraus entstehende CO₂-Belastung für die Umwelt um ca. 12% eingespart werden.

Das Design der Einbauten selbst ist fertigungstechnisch einfach und ohne spezielle Fertigungsstätten möglich. Durch die verhältnismäßig geringen Abmessungen, der Verschraubung untereinander und mit der Drehrohrwand ist eine einfache Montage bzw. Demontage gewährleistet. Dadurch ist es auch nachträglich möglich, Drehrohre mit den neuen Einbauten zu versehen und im Schadensfall einzelne Teile auszutauschen.

Betrachtet man das Ganze von der wirtschaftlichen Seite, dann ist bei Neuanlagen mit einer schnellen Amortisierung der Mehrinvestition zu rechnen. Die Mehrkosten, durch die Fertigung der Einbauten, liegen bei ca. 60.000 Euro. Das macht ca. 4% der Gesamtkosten für die Fertigung des Drehrohrs der Referenzanlage aus. Bei Bestandsanlagen sind die Kosten deutlich höher. Hier muss erst durch ein Gutachten geprüft werden, welche weiteren Umbauarbeiten durch die Mehrbelastung der Einbauten notwendig sind. Jeder weitere Umbau und die damit verbundene Stillstandszeit der Anlage kostet den Betreiber zusätzliches Geld und macht das Vorhaben wirtschaftlich uninteressant.

Diese verfahrenstechnische Anpassung hat gezeigt, dass mit „geringem Aufwand“ eine deutliche Einsparung des Energiebedarfes und Verringerung der Umweltbelastung möglich ist. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert weitere Untersuchungen im Bereich der thermischen Entsorgung von Klärschlamm durchzuführen. Denkbar wäre die Kopplung von Trocknung und Verbrennung in einem Drehrohr als einstufigen Prozess oder die Implementierung der thermischen Klärschlammverwertung in bestehende Prozesse zur Nutzung des Gastromes infolge einer Kreislaufführung.

ZADCON GmbH, Dessau (Geschäftsführender Gesellschafter Dipl.-Ing. Oliver Kahe)
Bearbeitung des Teilprojektes **Verfahrenstechnologie** und Koordination des Kooperationsprojektes

Hochschule Anhalt, Köthen (Fachbereich Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik, Apparate- und Anlagentechnik, Prof. Dr.-Ing. Fabian Herz)
Bearbeitung des Teilprojektes **Untersuchung der Bewegungsdynamik durch die innovativen neuen Einbauten**

Gefördert durch die DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt Az: 38410/01

6. Einleitung

Seit 03. Oktober 2017 ist die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung mit den Artikeln 1 bis 31 in Kraft getreten. Mit der Verordnung wird die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen integraler Bestandteil der Kreislaufwirtschaft und zugleich die bisher praktizierte bodenbezogene Verwertung deutlich eingeschränkt. Um den Zielen eines nachhaltigen Umwelt- und Ressourcenschutzes stärker als bisher gerecht zu werden, wurden mit der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung die bisher geltenden Anforderungen an die bodenbezogene Klärschlammverwertung zum Zweck einer weiteren Verringerung des Schadstoffeintrags in den Boden verschärft sowie der Anwendungsbereich der Klärschlammverordnung auch auf Maßnahmen des Landschaftsbaus ausgedehnt.

Als zentrales Element sieht die Verordnung erstmals umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen, nach Abschluss der abwassertechnischen Behandlung, und Klärschlammverbrennungssaschen vor, die Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen und von Klärschlammverbrennungsanlagen ab dem Jahr 2029 einzuhalten haben. Die Pflicht zur Rückgewinnung von Phosphor greift in den Fällen, in denen der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm oder mehr je Kilogramm Trockenmasse aufweist.

Aufgrund der Vielzahl an Schadstoffen im Klärschlamm findet eine stetige Abkehr von der direkten stofflichen Verwertung (z.B. in der Landwirtschaft) hin zur thermischen Entsorgung statt. Betrachtet man die letzten Jahre, so ist deutschlandweit die thermische Entsorgung des Klärschlammaufkommens in den Jahren von 1991 bis 2019 von ca. 9% auf 76% gestiegen.

Um die Umweltgerecht entsorgen von Klärschlamm zu gewährleisten, wird derzeit auf zwei verschiedene verfahrenstechnische Varianten gesetzt. Das Wirbelschichtverfahren und der Einsatz der Drehrohrtechnologie in Form von Trommelreaktoren. Diese sind wichtige Apparate der Verfahrenstechnik, da in ihnen eine Vielzahl von Prozessen zur thermischen Behandlung feiner und granularer Materialien durchgeführt werden können.

Die bisher eingesetzte Technologie kann deutlich verbessert werden, da ein erhebliches energetisches Einsparpotenzial vorhanden ist. Dessen Umsetzung in Form von innovativen technischen Lösungen für den Einsatz der Drehrohrtechnologie ist das umweltrelevante Ziel dieser Untersuchung. Die Überlegung ist, durch vergleichsweise „einfache“ und kostengünstige Maßnahmen signifikante die Umwelt zu entlasten. Dabei soll die Entwicklung einer neuen innovativen Form von Drehrohreinbauten, den Energiebedarf und die damit verbundene Umweltentlastung um 6% bis 10% senken.

Die übergeordnete Zielstellung ist die Erhöhung der Energieeffizienz, dazu muss man die Prozesse besser verstehen und beschreiben können.

Für die erfolgreiche Umsetzung des Projektes sind verfahrenstechnische Untersuchungen, Dimensionierung mittels statischer Berechnungsverfahren, Erstellung von Wärmebilanzen und Stoffbilanzen geplant. Auf Basis und in enger Wechselwirkung der Kooperationspartners im Umgang mit den Laborergebnissen der Versuchsanlage, soll die erreichbare Energieeffizienz bewertet werden, die zu neuen Entwürfen für die Trocknungszone mit innovativen neuen Einbauten führen. Das Design dieser Trocknungszonen muss dann bezüglich der technischen Realisierbarkeit überprüft werden.

Wie werden die Einbauten untereinander und mit der Drehrohrwand befestigt. Halten sie den mechanischen Belastungen stand. Welche Auswirkung haben die zusätzlichen Belastungen auf ein bereits vorhandenes Drehrohr und ist das Design fertigungstechnisch wie konstruiert umsetzbar. All das sind Fragen, welche im Laufe des Projektes untersucht werden sollen. Um die gewonnenen Entwicklungsergebnisse in die Praxis übertragen zu können, dient ein bereits vorhandenes Drehrohr zur Klärschlammverbrennung als Referenzanlage. An diesem lassen sich auch zusätzliche Fertigungskosten für Unternehmer und Anlagenbetreiber abschätzen.

Parallel wird ein mathematisches Modell entwickelt mit dem erstmalig die transversale Bewegungsdynamik des Klärschlammes in Drehrohren beschrieben werden kann. Es soll dabei helfen zukünftig Drehrohre mit Sektionaleinbauten verfahrenstechnisch präzise und sicher auszulegen, um so eine effizientere Trocknung und anschließende Verbrennung des Klärschlammes zu gewährleisten.

ARBEITSPAKET 1 – DBU – ZADCON

7. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z1

Zielstellung: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Steigerung der Energieeffizienz

Zu diesem Thema sind folgende Punkte zu untersuchen:

I. Durchführung verfahrenstechnischer Berechnungsverfahren für die Referenzanlagen

Als Referenzanlage wird ein Drehrohrofen mit implementierter Trocknungszone für die Klärschlammverbrennung herangezogen. Die Trocknungszone wird mit und ohne Einbauten durch Berechnungsverfahren simuliert und die Ergebnisse gegenübergestellt. Es wurde im ersten Drittel des Drehrohres, welches der Trocknungszone entspricht, eine Kombination von Schnecken- und Hubschaufeleinbauten (konventionelle Bauform) eingebaut. Die Hubschaufeln sollten den Klärschlamm im Drehrohr anheben und vermischen. Diese Konfiguration führte im Betrieb jedoch zu Problemen. Es konnten „Anbackungen“ und eine schlechte Durchmischung beobachtet werden. Weiterhin folgte in der Verbrennungszone ein schlechter Ausbrand von Organik, die Zusammensetzung des Ascheanteils war nicht wie gewünscht.

Daraus folgte die Überlegung, die Geometrie der Einbauten zu verändern. Man begann über eine wabenartige Geometrie nachzudenken und dann diese zu realisieren. Mit dieser trial and error - Methode, welche zu einer deutlichen Verbesserung des Prozesses führte, konnte eine zufriedenstellende Lösung erzielt werden. Basierend auf diesen Erfahrungen ist es das Ziel, bereits im Vorfeld die ideale Geometrie von Einbauten für den jeweiligen Klärschlamm-Trocknungsprozess ermitteln zu können, um eine Übertragbarkeit oder ein scale up auf andere Anlagen erreichen zu können. Dies ist heute verfahrenstechnisch nicht geklärt.

II. Erstellung von Wärmebilanzen

Die Wärmebilanz wird mittels einer Berechnungssoftware für Drehrohtrockner erstellt. Hier werden die Eingangsparameter festgelegt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt einmal ohne Einbauten und einmal mit Einbauten. Die Untergliederung der Wärmebilanz erfolgt für jeden Fall, sowohl mit als auch ohne Einbauten.

III. Erstellung von Stoffbilanzen

Die Stoffbilanz wird mittels einer Berechnungssoftware für Drehrohtrockner erstellt. Hier werden die Eingangsparameter festgelegt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt einmal ohne Einbauten und einmal mit Einbauten. Die Untergliederung der Wärmebilanz erfolgt für jeden Fall, sowohl mit als auch ohne Einbauten. Die Berechnung der Stoff- sowie der Wärmebilanz sind ähnlich.

IV. Untersuchungen zur Energieeffizienz

Die Energieeffizienz wird anhand der Ergebnisse aus den Punkten II. und III. beschrieben. Hier werden die Ergebnisse der Berechnungen einmal ohne und einmal mit Einbauten verglichen und diskutiert.

7.1 Beschreibung des Verfahrens zur thermischen Klärschlammverbrennung

Klärschlammverbrennung ist eine Hochtemperatur-Wärmebehandlungstechnologie, die alle organischen Substanzen, Krankheitserreger und andere Stoffe vom Schlamm durch Verwendung von Hochtemperaturoxidationsverbrennungsreaktion mit der überschüssigen Luftversorgung bei 850°C bis 1.100°C oxidiert, pyrolysiert und am Ende zerstört. Die organischen Bestandteile der Oxidationsreaktion (Verbrennungsreaktion) erzeugen gasförmige Substanzen wie CO₂ und H₂O und anorganische Bestandteile. Im weiteren Prozess kommt es zu Asche / Schlacke-Bildung und anderer feste Inert Materialien.

Eine selbstgängige Verbrennung kann durch die Trockenrückstände erreicht werden. Nach Payer stellt dazu die technische Lösung einer Klärschlammverbrennungsanlage mittels Drehrohrofen und der Wärmerückführung zur vorherigen Trocknung eine preiswerte technische Lösung dar, wenn ab etwa 60% organische Substanz im Schlamm enthalten ist. In solcher Situation sind zusätzliche Brennstoffe nur beim An- und Abfahren der Anlage notwendig, um zu jeder Zeit eine Verbrennungstemperatur von 800°C bis 900°C im Verbrennungsraum zu halten.

Klärschlammverbrennung hat folgende Vorteile:

- geringer Raumbedarf, schnelle Verarbeitungszeit, hohe Verarbeitungskapazität, signifikante Schlammengenreduzierung und Kapazitätsreduzierung von mehr als 90%.
- Die Asche nach der Verbrennung kann je nach Schwermetallgehalt direkt oder nach der Verwendung von Schwermetallchelatlösungsmitteln auf die Deponie kommen und kann auch als Baumaterial oder Straßenpflaster verwendet werden.
- Durch Verwendung von Verbrennungsschlamm kann man weitestgehend "vermindern, stabilisieren und dekontaminieren". Das ist die gründlichste Methode der Schlammbehandlungen, die in den entwickelten Ländern weit verbreitet ist.

Bevor der feuchte Klärschlamm dem Drehrohrofen zugeführt wird, wird dieser zuerst im Drehrohrtrockner durch Rauchgase getrocknet. Es entsteht partiell getrockneter Schlamm, welcher noch einen gewissen Restfeuchtegehalt enthält. Dadurch wurde jedoch die Trockensubstanz erhöht. Zusätzliche Brennstoffe werden im laufenden Betrieb nur beim An- und Abfahren der Anlage benötigt. Dies steigert um ein Vielfaches die Kosteneffizienz gegenüber anderen Verfahren.

Um die benötigte Energie in das System einzubringen, wird zum Beispiel Erdgas mit Verbrennungsluft vermischt und dann in einem Erdgasbrenner verbrannt. Das Rauchgas wird als Trockenmittel direkt zum Drehrohrtrockner weitergeführt. Im Gleich- oder Gegenstrom wird der zu trocknende Klärschlamm in den Drehrohrtrockner eingeführt. Im Drehrohrtrockner wird der Wasserinhalt als Wasserdampf abgezogen und der getrocknete Klärschlamm wird zum Drehrohrofen zugeführt. Im Ofen wird die organische Substanz im Klärschlamm verbrannt. Das Abgas aus dem Ofen wird einer Nachverbrennung in der Nachbrennkammer zugeführt. Danach wird das Abgas von der Asche gereinigt und in zwei Teile geteilt. Ein Teil wird zum Trockner zurückgeführt. Ein anderer Teil wird zum Kamin zugeführt. Nach der Trocknung ist zurückgeführte Abgas aus dem Ofen bereits abgekühlt, wird weiter runter gekühlt, um das Kondensat zu entnehmen. Danach wird es zum Ofen geleitet, wo das Ammonium verbrannt wird. Anschließend wird es gereinigt.

7.2 Vorgabe der Betriebsparameter

1. Aufgabematerial		entwässertes kommunales Klärschlamm	
2. Ofendurchsatz (fertig)	[t/h]		
3. alternativ: Aufgabedurchsatz	[t/h]	6	
4. Aufgabegutfeuchte	[%]	80%	(68 – 83 %)
5. Endfeuchte	[%]	10%	
6. spez. Wärme - Material, bei 20°C	[kJ/(kg*K)]	1,6	(geschätzt)
7. Schüttdichte des Materials	[t/m ³]	1,1	(geschätzt)
8. mittlere / max. Aufgabekorngröße	[mm]	30	(geschätzt)
9. Welcher Brennstoff soll verwendet werden		Heißgas	
10. Heizwert - gasförmiger Brennstoff	[kJ/m ³ N]	(36.000 (EG - nur zum Anfahren))	
11. Reaktionswärme	[kJ/kg]	10.000 – 12.500 trocken (=15.625 MJ/h - TS)	
12. Flüchtige Anteile im Material (z.B. CO ₂)		Organik	
13. Anteile	[%]	50 – 60	
14. spez. Wärme	[kJ/(m ³ N*K)]	_____	
]	-	
15. Dichte der Flüchtigen	[kg/m ³ N]	_____	
		-	
16. Material-Ofeneintrittstemperatur	[°C]	20	
17. Material-Ofenaustrittstemperatur	[°C]	110	
18. Abgastemperatur	[°C]	95 bis max. 150°C	
19. Verweilzeit des Materials	[min]	_____	
		-	
20. (altern.) Füllgrad	[%]	_____	
		-	
21. Neigt das Gut zur Ansatzbildung, ist es abrasiv, korrosiv, rieselfähig:			

Tabelle 1: Vorgabe der Betriebsparameter

7.3 Berechnung der Trocknungszone

Die Größe zur Beschreibung der Wirksamkeit von Einbauten ist die Wasserverdampfungszahl. Sie wird gemessen in kg/m³·h. Je größer der Wert der Verdampfungszahl, desto besser verläuft der Trocknungsprozess. Wenn man nun mehr feuchtes Gut durch den Trockner durchsetzen kann, so benötigt man jedoch auch mehr Brennstoff. Um zu zeigen, dass ein Trockner mit geeigneten Einbauten effizienter trocknet, muss man sich den spezifischen Brennstoffverbrauch in kJ/kg Wasser ansehen. Die Dimensionen des Trockners bleiben dabei konstant.

Wenn Einbauten konstruiert wurden und zum Einsatz kommen sollen, so müssen diese auf die Wasserverdampfung geprüft werden. Eine Trommel ohne Einbauten hat eine Verdampfungszahl um die 50kg/m³·h. Anhand der Einbauten aus unserem Praxisbeispiel oben haben wir Einbauten mit 110kg/m³·h zur Verfügung.

Es ergibt sich bei der spezifischen Brennstoffersparnis ein Einsparungspotential von ca. 12%. Dies folgt aus: $1 - (3.510/3.980) \text{ kJ/kg Wasser} = 12\%$ (**Tabelle 2**).

Berechnungsergebnisse		o. Einbauten	m. Einbauten	
	Verdampfungszahl	55	110	kg/h·m ³
	Durchmesser	3	3	m
	Länge	6	6	m
	Trommelvolumen	42,4	42,4	m ³
Eingabewerte	Aufgabedurchsatz	6	6	t/h
	Aufgabefeuchte	80	80	%
	Endfeuchte	67	10	%
	Schüttdichte	1,1	1,1	g/cm ³
	max. Korngröße	30	30	mm
	spez. Wärmekapazität	1,6	1,6	kJ/kg·K
	Heizwert	36.000	36.000	KJ/m ³
	Eintrittsgastemperatur	900	900	°C
Gasdurchsätze	Rauchgasvolumenstrom	2.920	5.100	Nm ³ /h
	Frischluftvolumenstrom	4.110	7.160	Nm ³ /h
	bei Betriebszustand	4.410	7.690	m ³ /h
	Trocknereintrittsvolumenstrom	7.030	12.300	Nm ³ /h
	bei Betriebszustand	30.200	52.700	m ³ /h
	Abgasvolumenstrom	11.100	20.100	Nm ³ /h
	bei Betriebszustand	15.500	28.200	m ³ /h
Temperaturen	Trocknereintrittsgastemperatur	900	900	°C
	Trockneraustrittsgastemperatur	115	115	°C
	Abgastemperatur	110	110	°C
	Taupunkttemperatur	74	74	°C
	Differenz Abgas- Taupunkttemp.	36	36	°C
Stoffbilanz	Aufgabedurchsatz	6	6	t/h
	Trocknerdurchsatz	3,64	1,33	t/h
	Trockensubstanzdurchsatz	1,2	1,2	t/h
	verdampfte Wassermenge	2,36	4,67	t/h
	Brennstoffmenge	238	455	Nm ³ /h
	spez. Brennstoffbedarf	3.980	3.510	kJ/kg Wasser
Wärmebilanz	Wasserverdampfung	6.360	12.600	MJ/h
	Materialerwärmung	120	100	MJ/h
	Restwassererwärmung	610	0	MJ/h
	Abgaserwärmung	1.690	3.100	MJ/h
	Wandverluste	640	600	MJ/h
	Gesamtwärmebedarf	9.410	16.400	MJ/h
		2.614	4.556	kW

Tabelle 2: Berechnung der Trockenzone

ARBEITSPAKET 2 – DBU – ZADCON

8. ERLÄUTERUNG ZUM ARBEITSPAKET AP Z2

Zielstellung: Begleitende Untersuchungen zum Bewegungsverhalten des Schüttguts

I. Harmonisierung der Versuche mit den Vorgaben des Referenzmodells

Um die Harmonisierung der Versuche zu gewährleisten, wird ein vorhandener Drehrohrofen als Referenzmodell für ein Versuchsmodell genutzt, um praxisnahe Versuche durchführen zu können. Die Kenndaten des Drehrohrohrs dienen als Basiswerte (Ausgangswerte) für die experimentelle Versuchsanlage. Von dieser werden die Entwicklungsergebnisse aus dem Labor auf die Referenzanlage übertragen, um Praxisnahe Ergebnisse zu erhalten.

8.1 Harmonisierung der Versuche mit den Vorgaben des Referenzmodells

Als Referenzanlage/-modell dient ein vorhandener Drehrohrofen ohne Einbauten mit implementierter Trocknungszone für die Erstellung eines Versuchsmodells im Labormaßstab (1:9) als Vorlage.

Die Drehrohrofen-Kenndaten sind wie folgt:

- lichter Innendurchmesser D_i = 2,95m
- Länge L = 20m
- Neigung \angle = $1^\circ \cong 0,57^\circ$
- Drehzahl n = $1,8 \text{ }^1/\text{min}$

Bei der Geometrie der neuen Innovativen Einbauten, welche das Bewegungsverhalten und die Wärmeübertragung des Schüttgutes optimieren, wurde sich am Aufbau einer Sektionaltrommel (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) orientiert, welche in Trommelreaktoren verbaut werden. Hierbei wird das Schüttgut über den Trommelquerschnitt in Sektionen unterteilt. Dadurch wird eine bessere Durchmischung und eine Erhöhung des Wärmeübergangs der Schüttung realisiert.



Abbildung 1: Querschnitt eines Drehrohres mit Sektionaleinbauten

Es wurde ein horizontal gelagertes experimentelles Versuchsmodell (Abb 2), in dem die zu untersuchende neuartige Form der Einbauten bereits eingearbeitet ist, gefertigt. Zusätzlich hat es eine visuelle Zugänglichkeit an der Stirnseite, um die schüttungsinternen Effekte sichtbar zu machen. Weiterhin können verschiedene Prozesskennwerte wie, Trommel-, Sektions-, Betriebs- und Materialparameter zur Bestimmung des transversalen Bewegungsverhaltens von Klärschlamm angepasst werden.

- Trommelparameter: Durchmesser, Länge und Neigungswinkel, Drehzahl
- Sektionsparameter: Anzahl, Anordnung Form,
- Betriebsparameter: Schüttgutdurchsatz, Drehzahl und Gasdurchsatz,
- Materialparameter: Korngröße, Korngrößenverteilung, Kornform, Fließfähigkeit, Schüttwinkel, Dichte, spezifische Wärmekapazität Wärmeleitfähigkeit.

Da die Wechselwirkungen dieser Prozessparameter nicht bekannt und industriell nicht messbar sind, ist die Auslegung solcher Drehrohreinbauten bisher nur empirisch möglich.

Mit Hilfe des Versuchsmodells, lassen sich die verschiedenen Parameter des Drehrohrs aus der Praxis nachstellen, welche die Entwicklung eines mathematischen Modells erleichtern. Mit diesem Modell sollen erstmalig die **transversale** Bewegungsdynamik des Klärschlammes in Drehrohren mit Sektionaleinbauten beschreibbar gemacht werden. Die Ergebnisse werden dann auf die Referenzanlage übertragen. Dies erleichtert die konstruktiven Untersuchungen von Designs, Fertigung, Kosten und Stabilität der Sektionaleinbauten.

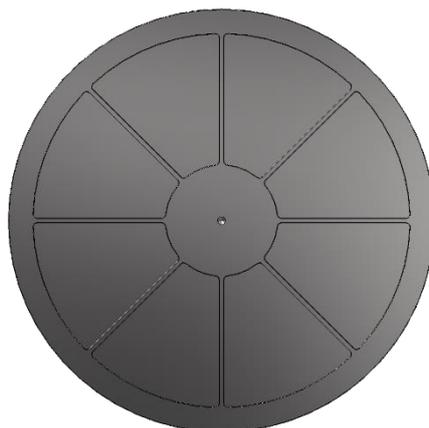


Abbildung 2: Geometrie vom Versuchsmodell

ARBEITSPAKET 3 – DBU – ZADCON

9. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z3

Zielstellung: Entwicklung der neuen Trocknungszone mit den innovativen Einbauten
Zu diesem Thema sind folgende Punkte zu untersuchen:

I. Konstruktive Untersuchungen und Design der Trocknungszone

Bei der konstruktiven Untersuchung wird geprüft, inwieweit sich das Versuchsanlagendesign der Drehrohreinbauten im Bereich der Trocknungszone, konstruktiv in die Praxis umsetzen lässt. Für diese Untersuchung werden das Design und die Abmaße der Versuchsanlage auf eine vorhandene Referenzanlage übertragen. Mit Hilfe einer 3D-Konstruktionssoftware werden die neuen Drehrohreinbauten konstruiert und in ein vorhandenes Modell der Referenzanlage verbaut. Diese Herangehensweise erleichtert die Ermittlung einzelner konstruktiver Parameter, wie z.B. das Gewicht und die Abmaße der konstruierten Einbauten, welche für nachfolgende Betrachtungen benötigt werden.

II. Auswahl geeigneter Materialien für die Drehrohreinbauten

Es soll geprüft werden, welche Materialien für die Drehrohreinbauten im Bereich der Trocknungszone in Frage kommen. Bevor ein Werkstoff in die nähere Auswahl kommt, müssen die spezifischen Anforderungen an die Einbauten ermittelt werden. Dabei sind Faktoren, wie die mechanische Belastung, Temperatur, Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit zu berücksichtigen.

III. Ermittlung der mechanischen Belastungen im Betrieb

Im ersten Schritt wird gezeigt, wie die Ermittlung der mechanischen Belastungen unter der Berücksichtigung verfahrenstechnischer und konstruktiver Einflüsse erfolgt. Wie sie auf das Drehrohr wirken, sich gegenseitig beeinflussen und wie man ihnen entgegenwirken kann.

IV. Durchführung von Lastanalysen

Eine Durchführung von Lastanalysen ist für jedes Drehrohr notwendig. Aus diesem Grund wird diese für die Referenzanlage ohne und mit Einbauten erläutert. Die Ergebnisse werden analysiert und miteinander verglichen, um zu ermitteln welche zusätzlichen Belastungen auf das Drehrohr wirken.

9.1 Konstruktive Untersuchungen und Design der Trocknungszone

Bei der Konstruktion des neuen Designs (Abb.2) der Einbauten, sollen die Abmaße und das Design des Versuchsmodells auf das Drehrohr der Referenzanlage angepasst werden. Wichtig ist es, dass die Geometrie nicht weit von der des Modells abweicht, um eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse in die Praxis zu erleichtern. Für die konstruktive Umsetzung der einbauten waren verschiedenen Vorüberlegungen notwendig wie:

- Einsatzbereich (Neu- oder Bestandsanlagen)
- Einsatzbedingungen (Feuchtigkeits-/Temperaturbelastung)
- einfache Fertigung (Kostenminimierung)
- Befestigung (Montage/Demontage)
- Belastungen (durch das Schüttgut)
- Funktionsweise (Durchmischung, Verringerung der Anbackungen)
- ...

Die beiden in der **Abb 8** dargestellten Varianten unterscheiden sich nur unwesentlich in ihrer Geometrie und in der Art der Fertigung. Wobei die linke dargestellte Variante gekantet und die rechte gewalzt wird. Bei beiden wurde darauf geachtet die Verbindungsstellen untereinander und mit der Drehrohrwand so schlicht wie möglich zu halten um Anbackungen des Klärschlammes an den Einbauten zu verringern. Diese wirken wie eine Dämmschicht bei der Wärmeübertragung an den Klärschlamm und beeinträchtigt den Trocknungsprozess. Durch die Erhöhung der Trocknereintrittsgastemperatur kann dieser Beeinträchtigung entgegengewirkt werden. Was zwangsläufig zu einer nicht gewünschten Erhöhung des Energiebedarfs und der Kosten führt.

Im späteren Verlauf soll die Auswahl des Werkstoffes, die Art der Fertigung und die Montage der Einbauten noch näher betrachtet werden.

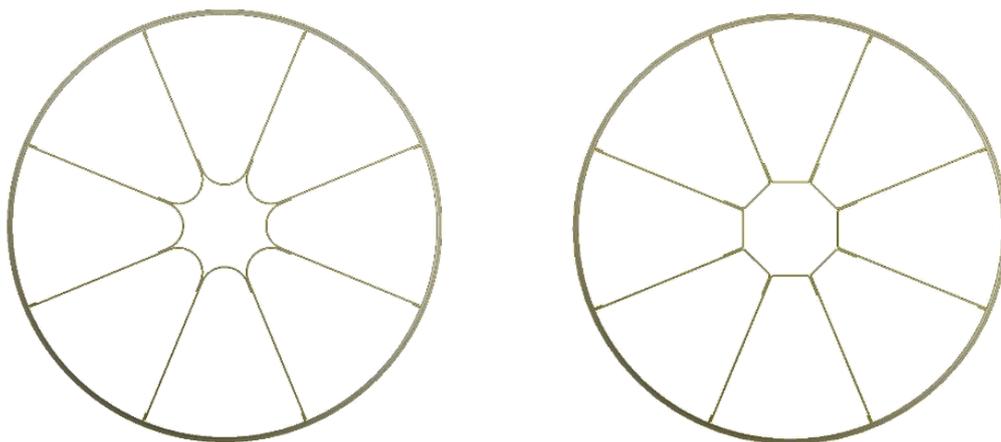


Abbildung 3: konstruktive Umsetzung des Versuchsmodelles - gewalzt (links) und gekantet (rechts)

9.2 Spezifischen Anforderungen und Werkstoffauswahl

Um die spezifischen Anforderungen für den Werkstoff zu ermitteln, muss die Klärschlammverbrennung im Bereich der Trocknungszone etwas genauer betrachtet werden. Hier wird der Rohklärschlamm mit einem Wasseranteil von 80%, bei einer Temperatur von 115°C (Einlaufkammer) aufgegeben und bis **450°C** (Ende Trockenzone) vorgetrocknet. Aufgrund seiner unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung und seines hohen Wasseranteils, weist er erosive Eigenschaften auf. Daraus ergeben sich die folgenden spezifischen Anforderungen für die Auswahl des Werkstoffes:

- Korrosionsbeständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Schweißbarkeit
- Verformbarkeit
- Verschleißfestigkeit
- gute Mechanische Eigenschaften (hohe Dehngrenze u. Zugfestigkeit)
- ...

Die für diesen Einsatzfall an den Werkstoff gestellten Anforderungen, ist ein Edelstahl mit der Werkstoff-Nr.: 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) optimal geeignet. Er hat eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit, ist bis 550°C verwendbar, lässt sich ausgezeichnet schweißen und gut schmieden. Für die Drehrohreinbauten unserer Referenzanlage ist der Werkstoff die beste Wahl. Für neue Drehrohre oder Drehrohre aus Bestandsanlagen, ist die Auswahl des Werkstoffes für die Drehrohreinbauten neu zu betrachten. Mit der falschen Werkstoffauswahl kann es zu Problemen bei der Verarbeitung der Werkstoffe untereinander kommen, was wiederum zu einem Kostenanstieg führt.

9.3 Ermittlung der mechanischen Belastungen im Betrieb

Für die Ermittlung der mechanischen Belastung müssen wir die Einflüsse kennen, welche von innen und außen auf das Drehrohr wirken. Da wären zum einen die verfahrenstechnischen und zum anderen die konstruktiven Einflüsse, welche sich auch gegenseitig beeinflussen.

Bei der Ermittlung der verfahrenstechnischen Einflüsse muss man zu Beginn die Frage stellen: „Welches Medium soll im Drehrohr verarbeitet werden?“ Die Antwort hierzu lautet: „Klärschlamm“. Um Klärschlamm trocknen und verbrennen zu können, müssen bestimmte verfahrenstechnische Voraussetzungen erfüllt werden.

Anhand der nachfolgenden Angaben/Anforderungen an die Klärschlamm-trocknung/-verbrennung lässt sich das Drehrohr dimensionieren:

- Aufgabefeuchte
- Trocknereintrittsgastemperatur von 900°C
- Trockneraustrittsgastemperatur von 115°C
- Füllungsgrad
- Verweilzeit im Drehrohr
- Durchsatz
- Schüttdichte
- ...

anschließend können die folgenden Parameter für eine Vordimensionierung entnommen werden:

- Lichter Innendurchmesser
- Länge der Trocken- und Verbrennungszone (gleich Gesamtlänge)
- Neigung des Drehrohrs
- Ausmauerung ja/nein (abhängig von Temperatur und Aggregatzustand)
- Einbauten ja/nein
- ...

Die am Anfang erwähnte Abhängigkeit der konstruktiven von den verfahrenstechnischen Einflüssen und umgekehrt, zeigt sich zu Beispiel bei der Auswahl der Werkstoffe der Referenzanlage. Im Bereich der Trockenzone wird der Rohklärschlamm mit einem Wasseranteil von 80% aufgegeben. Diese hohe Aufgabefeuchte erhöht die Korrosionsgefahr. In der Verbrennungszone herrschen Temperaturen von ca. 900°C, was die Auswahl der Werkstoffe für das Drehrohr deutlich minimiert. Bei so hohen Temperaturen verlieren viele Werkstoffe ihre Festigkeit und ihre Belastbarkeit nimmt deutlich ab. Die Verwendung einer Feuerfestauskleidung schützt den Werkstoff vor den hohen Temperaturen, was wiederum die Belastbarkeit erhöht. Die Feuchtigkeit des Klärschlammes würde diese beschädigen. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Werkstoffe können Einflüsse von außerhalb sein, wie z.B. der Aufstellungsort. Steht das Drehrohr im Freien oder einer Halle, in einen Erdbebengebiet oder in Küstennähe, wobei die salzhaltige Luft die Korrosion stark beschleunigen kann. Diese und noch andere Faktoren beeinflussen die mechanischen Belastungen und müssen mitberücksichtigt werden.

Bei unserer Referenzanlage treten mechanische Belastungen auf durch:

- das Eigengewicht des Drehrohres mit seinen Komponenten wie Zahnkranz, Rippen, Bandagen, Rohrschüsse, ...
- die Feuerfestverkleidung im Bereich der Verbrennungszone
- das Klärschlammgewicht, welches abhängig ist vom Füllungsgrad und Durchsatz (nimmt durch die Trocknung ab)
- das Eigengewicht der Einbauten

Anhand der ermittelten Parameter lassen sich die mechanischen Belastungen die die Biegung, Torsion bzw. Verdrehung, die „Sicherheit gegen Fließen und Dauerbruch“ berechnen. Biegt sich das Drehrohr zu stark durch kann es zu Problemen bei der Abdichtung angrenzender Bauteile kommen. Die Feuerfestauskleidung kann reißen oder es treten zu hohe Abnutzungserscheinungen zwischen Zahnkranz und Ritzel auf. Bei der Übertragung der Kräfte durch Torsion vom Getriebe auf die einzelnen Rohrschüsse des Drehrohres sollen Beschädigungen vermieden werden. Mit der „Sicherheit gegen Fließen“ soll sichergestellt werden, dass die Bauteile unter der Belastung nicht versagen bzw. sich irreparabel verformen. Bei der „Sicherheit gegen Dauerbruch“ wird bei fortlaufender, wechselnder Belastung die Haltbarkeit der Bauteile sichergestellt. Daher ist dieser Nachweis entscheidend für die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Bauteile.

9.4 Durchführung von Lastanalysen

Um eine Lastanalyse durchführen zu können, ist eine vorherige verfahrenstechnische Auslegung notwendig. Mit dieser werden die Dimensionen des Drehrohrs, wie der lichte Innendurchmesser, Länge und Neigung, Drehzahl des Drehrohrs, mögliche Ausmauerungen sowie Einbauten ermittelt.

In Abhängigkeit des lichten Manteldurchmessers werden die Manteldicken für einzelnen Ofenschüsse (Einlauf-, Übergangs-, Laufring-, Zahnkranz- und Auslaufschuss) bestimmt. Anhand dieser Daten kann ein Mengengerüst mit einzelnen Komponenten erstellt werden.

Diese Angaben basieren auf Erfahrungswerten und sind abhängig von

- Material des Ofenmantels
- Temperatur des Ofenmantels
- Länge und Durchmesser des Ofens
- Eigenschaften des aufzugebenden Gutes
- vorhandenen Ausmauerungen
- vorhandenen Einbauten

Nach der 3D-Modellierung des gesamten Drehrohrs, mit allen seinen zusätzlichen Komponenten, wie Lauf-ringstationen, Bandagen, Stützringen, Antrieb (Zahnrad und Befestigung), Ausmauerung und Einbauten, und deren Werkstoffzuordnung, ist es möglich, alle benötigten Daten zur Durchführung einer Lastanalyse anzeigen zu lassen. Dies gilt für Neuanlagen. Bei unserer Referenzanlage ohne Einbauten (Abb 9) sind die für Lastanalyse erforderlichen Daten bereits vorhanden und können direkt in die Berechnungs-Software eingepflegt werden.

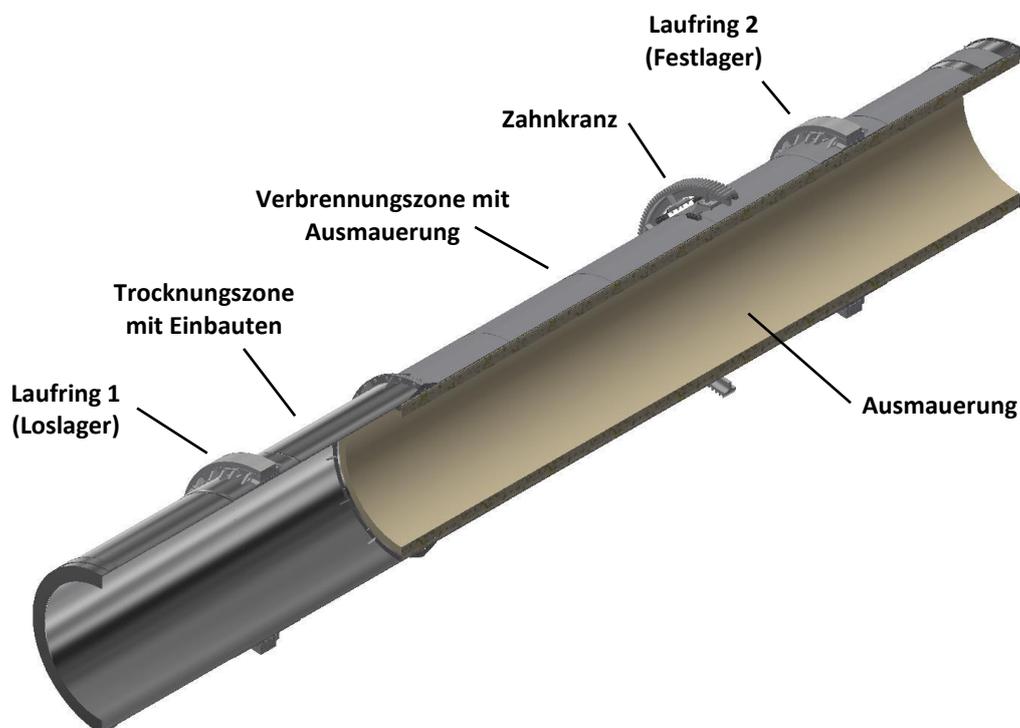


Abbildung 4: Drehrohr mit Ausmauerung o. Einbauten

Hier werden in einer von der Berechnungs-Software vorgegebenen Eingabemaske Bedingungen festgelegt, wie beispielsweise:

- Position der einzelnen Laufingstationen (als Fest- und Loslager)
- Werkstoff
- Dimensionen der einzelnen Drehrohrsegmente
- Art der Beanspruchung (dynamisch oder statisch)
- und die einzelnen Belastungen (Gewichtskräfte, Radialkräfte, Streckenlasten)
- ...

Anhand dieser Eingabedaten der Referenzanlage erhält man Angaben z.B. zur Biegespannung, Torsionsspannung sowie zur „Sicherheit gegen Fließen und Dauerbruch“ an den jeweils kritischen Stellen.

Die Ergebnisse zur Berechnung der Biege- und Torsionsspannung werden mit den für den Werkstoff zulässigen Spannungen verglichen. Die Sicherheitsfaktoren gegen Fließen und Dauerbruch werden als firmeninterne Richtlinie, bei größer 6 angesetzt. Ist dies der Fall, dann ist gewährleistet, dass es zu keinem Ermüdungsbruch oder Gewaltbruch durch Biegung, Torsion und Zug/Druck kommt. Wenn der Sicherheitswert unter 6 liegt, müssen die Geometrie oder der Werkstoff des Drehrohrs angepasst und neu berechnet werden. Das gilt auch, wenn die zulässige Biege- oder Torsionsspannung überschritten wird. Aus der nachfolgenden **Tabelle 3** ist ersichtlich, dass unsere Referenzanlage den Belastungen standhält.

Art der Belastung	Kritische Stelle	Betrag	Vergleichswert/Sicherheit
Result. max. Biegespannung	x = 8900 mm	$\sigma_{bmax} = 8,013 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{bzul} = 140 \text{ N/mm}^2$
Result. max. Torsionsspannung	x = 13700 mm	$\tau_{tmax} = 0,289 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{tzul} = 85 \text{ N/mm}^2$
Result. max. Durchbiegung	x = 10171,429 mm	$y_{max} = 0,443 \text{ mm}$	
Sicherheit gegen Fließen	x = 10057,143 mm	$S_F = 10,855$	S_F größer 6
Sicherheit gegen Bruch	x = 8900 mm	$S_D = 7,719$	S_D größer 6

Tabelle 3: Belastungen und Sicherheiten für die Referenzanlage ohne Einbauten

Im weiteren Verlauf werden die Belastungsanalysen für die anderen Komponenten durchgeführt. Es fehlen noch die Berechnung für:

- Laufing/-rollen
- die Druckrolle
- die Antriebsleistung
- Zahnrad u Ritzel
- die Lager der Laufrolle, Druckrolle und vom Ritzel
- die Achsen der Laufrolle, Druckrolle und vom Ritzel

Um die mechanischen Belastungen des Drehrohrs mit Einbauten (Abb 10) zu berechnen, werden in der Eingabemaske der Berechnungs-Software, die Eingabedaten der Referenzanlage um die zusätzlichen Belastungen der Einbauten ergänzt und neu berechnet. Dabei handelte es sich im Bereich der Trocknungszone um ein Mehrgewicht von ca. 8t, was einer zusätzlichen Belastung für das Drehrohr von ca. 8kN entspricht.

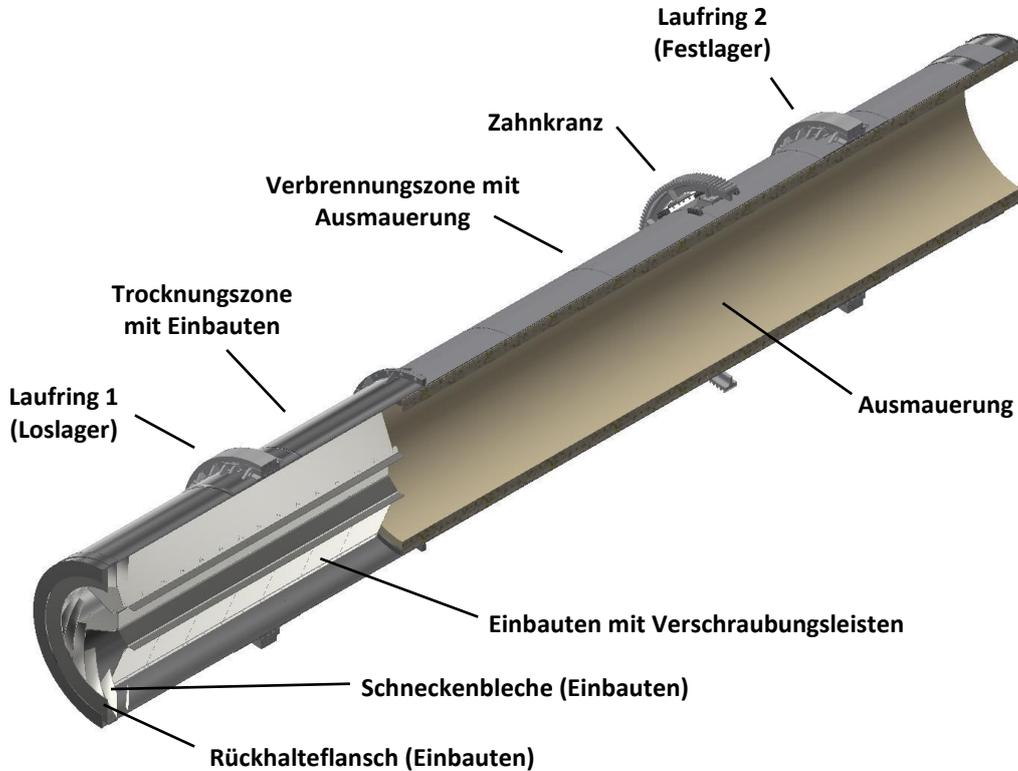


Abbildung 5: Drehrohr mit Ausmauerung m. Einbauten

In der folgenden **Tabelle 4** sind die Belastungen und Sicherheiten für das Drehrohr mit Einbauten dargestellt. Bei einem Vergleich der berechneten Werte mit den Werten aus **Tabelle 3** ist festzustellen, dass sich die Ergebnisse unwesentlich unterscheiden. Durch die Einbauten verringert sich die resultierende max. Biegespannung und die resultierende max. Durchbiegung, bei gleichbleibender resultierende max. Torsionsspannung. Die „Sicherheiten gegen Fließen und Dauerbruch“ erhöhen sich. Daraus kann man Schlussfolgern, dass durch die Einbauten die Steifigkeit des Drehrohrs minimal erhöht wird. Die Werte aus **Tabelle 3** und **Tabelle 4** werden auch noch einmal graphisch in Abb 11 bis Abb 18 dargestellt.

Art der Belastung	Kritische Stelle	Betrag	Vergleichswert/Sicherheit
-------------------	------------------	--------	---------------------------

Result. max. Biegespannung	x = 8900 mm	$\sigma_{bmax} = 7,887 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{bzul} = 140 \text{ N/mm}^2$
Result. max. Torsionsspannung	x = 13700 mm	$\tau_{tmax} = 0,289 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{tzul} = 85 \text{ N/mm}^2$
Result. max. Durchbiegung	x = 10171,429 mm	$y_{max} = 0,436 \text{ mm}$	
Sicherheit gegen Fließen	x = 10057,143 mm	$S_F = 10,992$	S_F größer 6
Sicherheit gegen Bruch	x = 8900 mm	$S_D = 7,842$	S_D größer 6

Tabelle 4: Belastungen und Sicherheiten für die Referenzanlage mit Einbauten

Durch das zusätzliche Gewicht der Einbauten im Bereich der Trocknungszone kommt es zu einer Veränderung der Gewichtsverteilung des gesamten Drehrohrs, welches von den Laufringen getragen wird. Damit verändern sich auch die Belastungen an den Laufringen 1 (Loslager) und 2 (Festlager) wie in **Tabelle 5** dargestellt.

	Loslager	Festlager	Gesamte Belastung
Drehrohr o. Einbauten	421,4 kN	808,8 kN	1.230,2 kN
Drehrohr m. Einbauten	482,6 kN	806,3 kN	1.288,9 kN

Tabelle 5: Radialkräfte für Los- u. Festlager

Am Laufring 1 nimmt die Belastung um ca. 14,5% (ca. 61,2kN) zu und am Laufring 2 um ca. 0,3% (ca. 2,5kN) ab. Die Gesamtbelastung nimmt um ca. 4,8% zu, was ca. 58,7kN entspricht. Im nachfolgenden Schritt werden die Laufringe und Laufrollen ausgelegt. Zur Berechnung wird der Wert der größten Belastung herangezogen. Das ist bei der Referenzanlage das Festlager mit 808.8kN. Da sich die Belastungen an diesem Lager durch die Einbaut verringert ist eine Nachrechnung nicht erforderlich. Dies gilt für die Referenzanlage. Bei Bestandsanlagen kann eine Neuauslegung der Komponenten erforderlich sein.

Grafische Darstellung der Maximalwerte der Biegespannung (Resultierende) für das Drehrohr mit und ohne Einbauten.

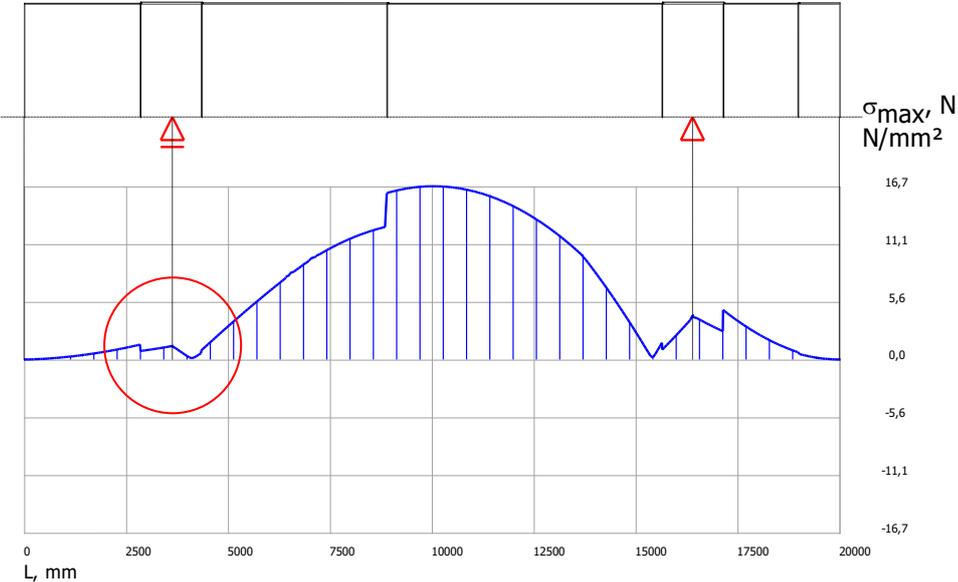


Abbildung 6: Maximalwert der Biegespannung (Resultierende) Drehrohr o. Einbauten

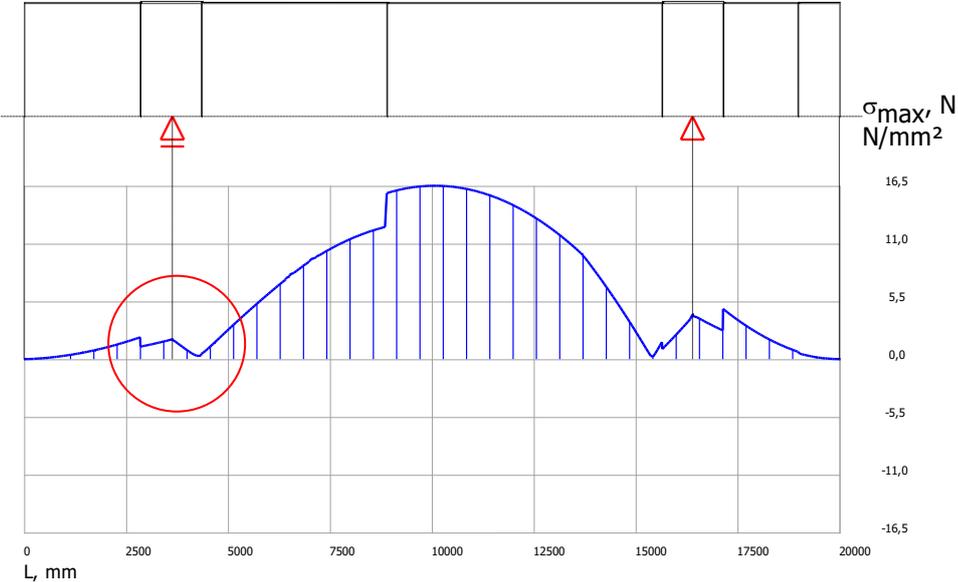


Abbildung 7: Maximalwert der Biegespannung (Resultierende) Drehrohr m. Einbauten

Grafische Darstellung der Maximalwerte der Torsionsspannung (Resultierende) für das Drehrohr mit und ohne Einbauten.

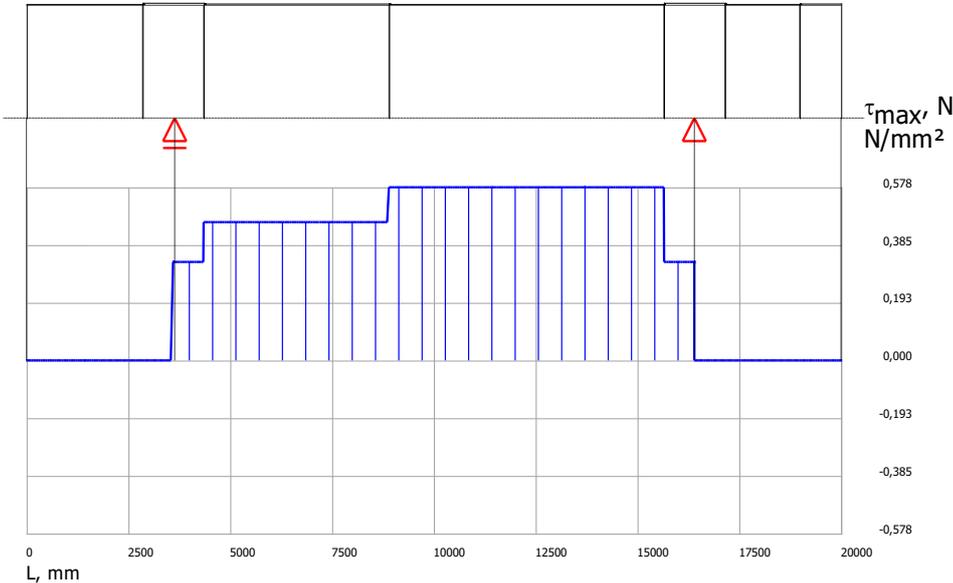


Abbildung 8: Maximalwert der Torsionsspannung (Resultierende) Drehrohr o. Einbauten

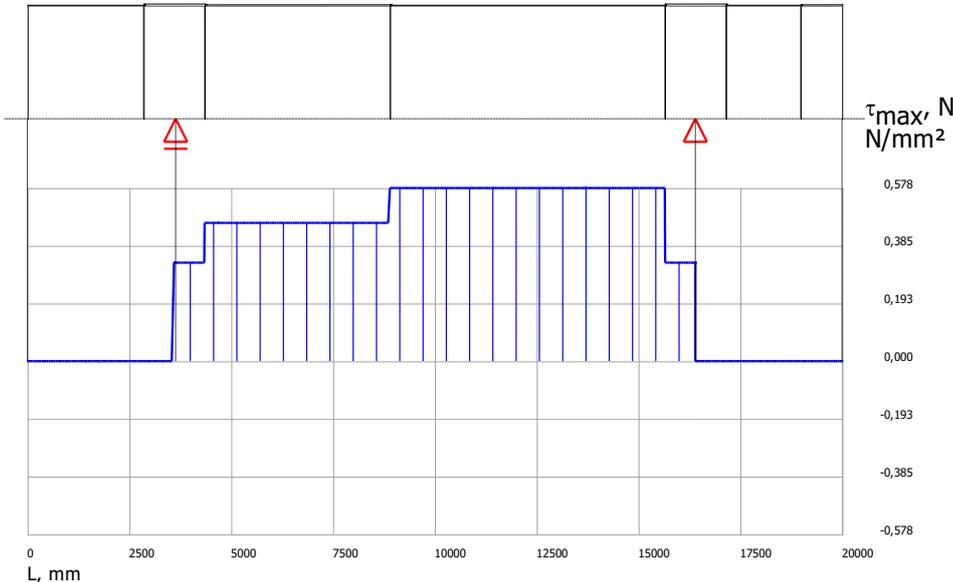


Abbildung 9: Maximalwert der Torsionsspannung (Resultierende) Drehrohr m. Einbauten

Grafische Darstellung der Sicherheit gegen Fließen für das Drehrohr mit und ohne Einbauten.

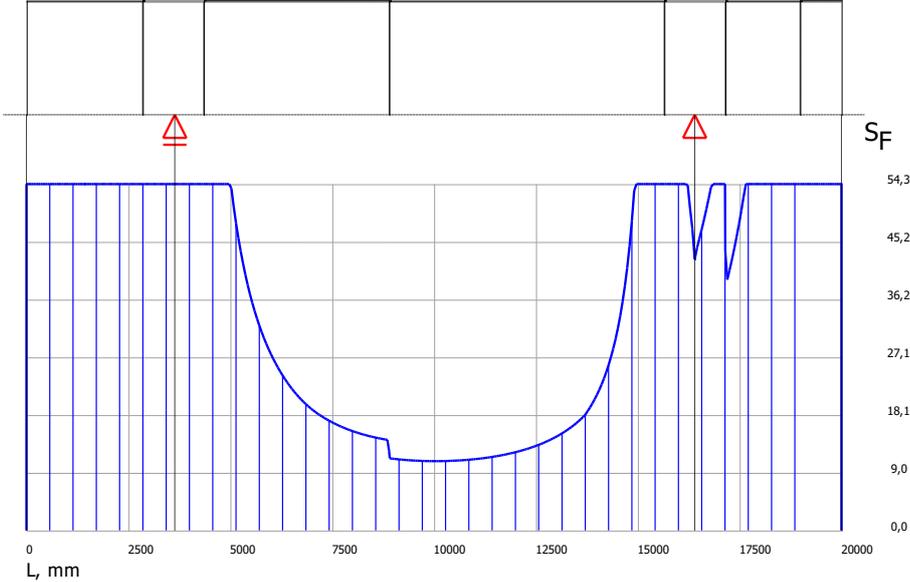


Abbildung 10: Sicherheit gegen Fließen Drehrohr o. Einbauten

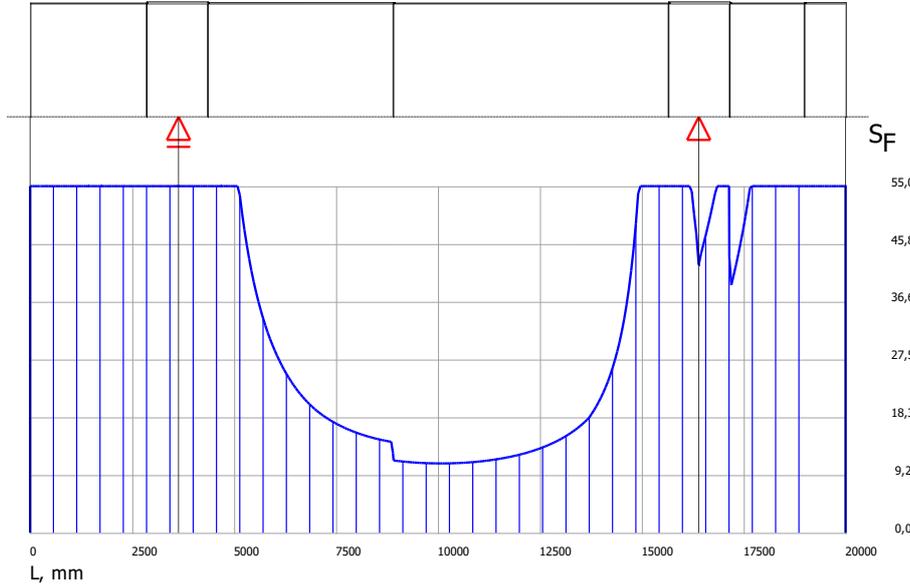


Abbildung 11: Sicherheit gegen Fließen Drehrohr m. Einbauten

Grafische Darstellung der Sicherheit gegen Dauerbruch für das Drehrohr mit und ohne Einbauten.

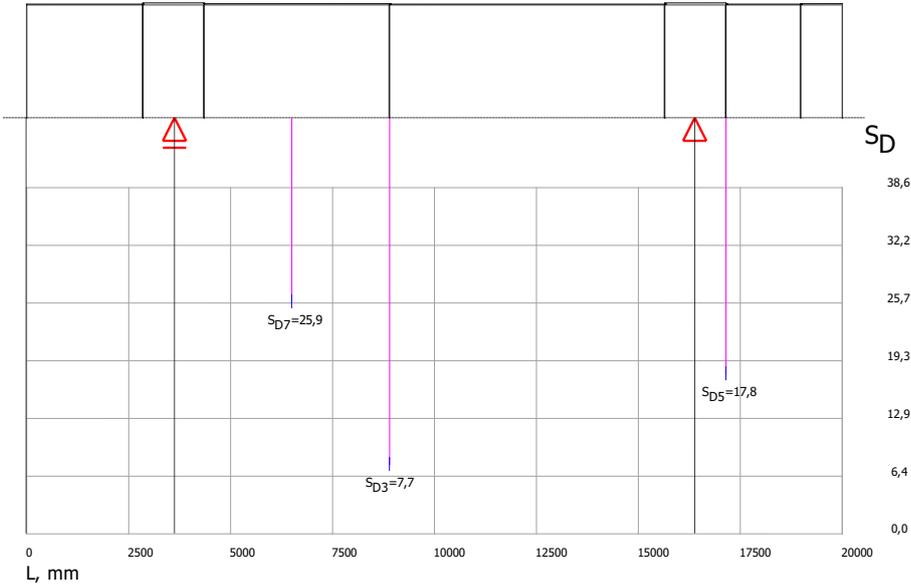


Abbildung 12: Sicherheit gegen Dauerbruch Drehrohr o. Einbauten

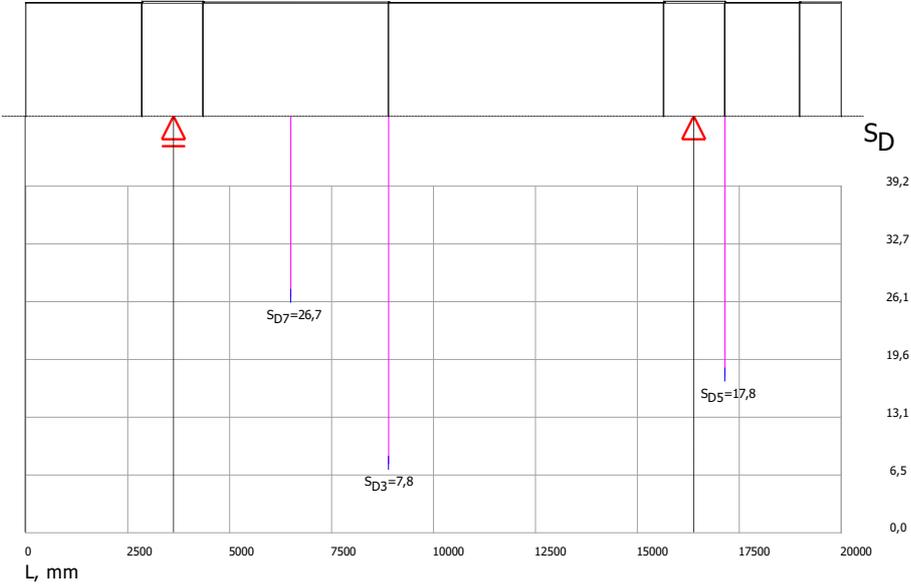


Abbildung 13: Sicherheit gegen Dauerbruch Drehrohr m. Einbauten

ARBEITSPAKET 4 – DBU – ZADCON

10. Erläuterung zum Arbeitspaket AP Z4

Zielstellung: Untersuchungen zur technischen Realisierbarkeit

Zu diesem Thema sind folgende Punkte zu untersuchen:

I. Untersuchungen zur Montage der Einbauten (innen/außen) im Drehrohr

Unter verschiedenen Gesichtspunkten soll untersucht werden, wie die Einbauten im Drehrohr untereinander befestigt werden können. Dafür werden zwei unterschiedliche Befestigungsmöglichkeiten, das Verschrauben und Verschweißen untersucht, ihre Vor- und Nachteile untereinander verglichen und ausgewertet.

II. Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand

Für die Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand bieten sich zwei Möglichkeiten an, welche untersucht werden sollen. In Frage kommen dafür das Verschrauben und Verschweißen. Das Aufzeigen der jeweiligen Vor- und Nachteile soll eine Entscheidung erleichtern.

III. Fertigungsaspekte der Einbauten (Machbarkeit)

Hier soll untersucht werden, ob die konstruktive Lösung der Einbauten fertigungstechnisch realisierbar ist. Dafür müssen verschiedene Aspekte wie die Kosten, Fertigung, Montage und Einsatzbereich betrachtet werden.

IV. Schätzung von ggfs. zusätzlichen Herstellungskosten

Es soll ermittelt werden, welche zusätzlichen Kosten durch die Herstellung der Einbauten entstehen und wie hoch diese im Verhältnis zu den Gesamtkosten der Referenzanlage sind. Dafür werden die Gesamtkosten, der vorhandenen Referenzanlage aus dem **Jahr 2019**, mit den Herstellungskosten für die Einbauten nach heutigem Stand betrachtet. Weitere Kosten für den Transport und die Montage werden anhand von Erfahrungswerten nur geschätzt. Zusätzliche Kosten für ein neues und ein nachzurüstendes Drehrohr mit Einbauten könnten entstehen. Dabei ist zu prüfen, ob es sinnvoll ist, die Einbauten in vorhandene Drehrohre nachzurüsten oder ob sich der Einbau nur für den Bau von neuen Drehrohren lohnt.

10.1 Untersuchungen zur Montage der Einbauten (innen/außen) im Drehrohr

Hier sollen zwei Montagevarianten, das Verschrauben (Kraftschluss) und Verschweißen (Stoffschluss), der Einbauten im Drehrohr betrachtet werden.

➤ **Vor- und Nachteile des Verschraubens der Einbauten untereinander**

Vorteile:

- leichte Montage/Demontage
- einzelne Bereiche separat austauschbar
- geringer Werkzeugaufwand
- weniger Fachpersonal (Schweißer)
- bessere Positionierung der Einbauten möglich
- ausgleichen der Fertigungstoleranzen möglich
- ...

Nachteile:

- hoher Zeitaufwand beim verschrauben
- höhere Anbackungen an den Verschraubungspunkten möglich
- keine Dichtheit der Verschraubung
- ...

➤ **Vor- und Nachteile des Verschweißens der Einbauten untereinander**

Vorteile:

- geringer Zeitaufwand bei der Montage
- kein Eingriff in die Statik des Drehrohrs
- Gewährleistung der Dichtheit im Drehrohr
- weniger Zubehör/Teile
- ...

Nachteile:

- schwere Demontage mit Hilfsmitteln wie Trennschleifer oder Schweißbrenner
- einzelne Bereiche nur schwer austauschbar
- reißen der Schweißnähte durch unterschiedliche Wärmeeinträge im Betrieb möglich
- Fachpersonal notwendig (Schweißer)
- zusätzliche Schutzausrüstung notwendig
- ...

Bei der Betrachtung der Vor- und Nachteile für die beiden Varianten zur Befestigung der Einbauten, ist die Variante der Verschraubung untereinander am besten geeignet. Dies hat aus unserer Sicht gravierende Vorteile, wie z.B. der Kostenfaktor für Bestandsanlagen. Bei Vorhandenen Drehrohren ist die Zugänglichkeit in und um das Drehrohr herum oft sehr schwer. Bei solch ungünstigen Voraussetzungen lassen sich die Einbauten mit deutlich weniger Aufwand nachrüsten. Bei unserem Referenzdrehrohr mit einem Innendurchmesser $D_i = 2,95\text{m}$ lassen sich die Einbauten mit den Abmaßen $380 \times 1170 \times 920\text{mm}$ (B x H x T) und einem Gewicht von ca. 95kg gut im inneren des Drehrohrs zu transportieren und verbauen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Austausch der Einbauten bei einem Schadensfall. Hier können einzelne Einbauten durch eine einfache Demontage und auch kostengünstiger als bei verschweißten Einbauten, getauscht werden.

10.2 Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand

Zum einen gibt es die Möglichkeit der Verschraubung und zum anderen die des Verschweißens der Einbauten mit der Drehrohrwand. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile, welche nachfolgend aufgelistet sind.

➤ **Vor- und Nachteile des Verschraubens der Einbauten an der Drehrohrwand**

Vorteile:

- leichte Montage/Demontage
- Geringer Werkzeugaufwand
- weniger Fachpersonal (Schweißer)
- ...

Nachteile:

- hoher Aufwand beim Bohren der Löcher (beim Nachrüsten)
- Hoher Zeitaufwand beim Verschrauben
- Abdichten der Schraublöcher (sonst Austritt von Wasser o. Stäuben möglich)
- Eingriff in die Statik der Drehrohrwand
- ...

➤ **Vor- und Nachteile des Verschweißens der Einbauten an der Drehrohrwand**

Vorteile:

- geringer Zeitaufwand
- kein Eingriff in die Statik der Drehrohrwand
- kein Austritt von Medien (Wasser, Staub)
- ...

Nachteile:

- schwere Montage/Demontage mit Hilfsmitteln wie Trennschleifer oder Schweißbrenner
- reißen der Schweißnähte durch unterschiedliche Wärmeeinträge im Betrieb möglich
- Fachpersonal notwendig (Schweißer)
- zusätzliche Schutzausrüstung notwendig
- ...

Um die Einbauten an der Drehrohrwand zu befestigen, ist das Verschweißen die beste Wahl. Das Hauptkriterium, welches ausschlaggebend für die Auswahl war, ist die Gewährleistung der Dichtheit des Drehrohrs. Ein weiteres Kriterium war die Möglichkeit der Nachrüstung bzw. des einfachen Umbaus von Bestandsanlagen. Hier ist der Aufwand für das Einbringen der Verschraubungslöcher in die Drehrohrwand Abb 19 zu aufwendig und zu zeitintensiv. Dies würde zu längeren Stillstands Zeiten der Anlage führen, was wiederum zu zusätzlichen Kosten für den Anlagenbetreiber bringt. Die Schwächung der Drehrohrwand und den damit verbundenen deutlichen Eingriff in die Statik durch die hohe Anzahl der umlaufenden Bohrungen entlang des Drehrohrs, sollte man nicht vernachlässigen.

Bei der Variante des Verschweißens als Befestigungsmöglichkeiten der Einbauten an der Drehrohrwand, werden nicht die Einbauten selbst verschweißt, sondern nur sogenannte Verschraubungsleisten Abb 20.

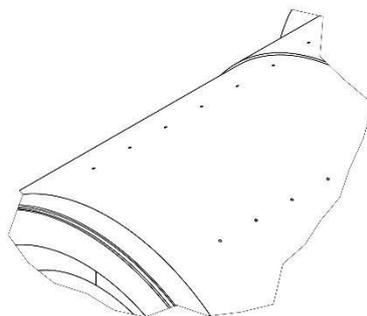


Abbildung 14: Drehrohrwand mit Verschraubungslöcher

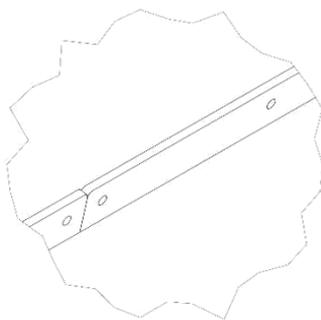


Abbildung 15: Verschraubungsleisten im Drehrohr

10.3 Fertigungsaspekte der Einbauten (Machbarkeit)

Durch die Wahl einfacher Fertigungsprozesse können Kosten und Zeitaufwand bei der Fertigung und Montage reduziert werden. Aus diesen Gründen wurde bereits in der Entwurfsphase auf eine Einfachheit der Konstruktion geachtet. Die Einbauten können aus Standardblechtafeln gelasert und im nachfolgenden Arbeitsschritt auf einer herkömmlichen Abkantbank gekantet werden. Das gilt allerdings nicht für die Schneckenbleche, diese werden im nachfolgenden Arbeitsschritt gewalzt bzw. gezogen. Diese Einfachheit der Fertigung und die geringe Anzahl an Arbeitsschritten hat den Vorteil, dass keine Spezialwerkstätten mit großem Maschinenpark benötigt werden, was die Auswahl eines Fertigungsbetriebes und Fertigungsort deutlich erleichtert.

Hinzu kommt die geringe Anzahl der unterschiedlichen Bauteile und eine relativ große Stückzahl, welche je nach Drehrohr variiert. Ein weiterer Pluspunkt ist die geringe Baugröße der Einbauten. Diese erleichtert die Handhabung bei der Probemontage und dem späteren Einbau in das Drehrohr. Damit fallen keine zusätzlichen Kosten für teure Spezialtransporte an.

10.4 Schätzung von ggfs. zusätzlichen Herstellkosten

Um eine genaue Schätzung der zusätzlichen Herstellungskosten vornehmen zu können, werden die Gesamtkosten für die Fertigung des Drehrohrs ohne Einbauten der Referenzanlage betrachtet sowie die Fertigungskosten der Einbauten selbst. So lässt sich für dieses Beispiel der prozentuale Mehraufwand bestimmen. Die angefallenen Gesamtkosten des Drehrohrs beliefen sich im Jahr 2019 auf ca. 1,22 Mio. Euro, was nach einem Aufschlag von 30% im Jahr 2024 eine geschätzte Summe der Gesamtkosten von 1,58 Mio. Euro ergibt. Der Aufschlag von 30% ist zurückzuführen auf die Coronakrise, dem Krieg in der Ukraine und den damit verbundenen Folgen, wie der Anstieg der Energiekosten.

Zur Ermittlung der Herstellungskosten für die Einbauten selbst, wurden mit den notwendigen Fertigungszeichnungen, die Preise für die Fertigung bei ansässigen Fertigungsunternehmen angefragt. Die Einbauten mit Zubehör aus Edelstahl (1.4571) sind in der Trockenzone des Drehrohrs mit einem lichten Innendurchmesser von 2,95m auf einer Länge von ca. 6,5m und einem zusätzlichen Gewicht von ca. 8,0t verbaut. Das entspricht einem Mehrgewicht für das Drehrohr von ca. 6,8%. Die Herstellungskosten in unserem Fall liegen bei ca. 55.000 – 60.000 Euro. Somit belaufen sich die zusätzlichen reinen Herstellungskosten für die Einbauten, in Abhängigkeit zu den gestiegenen Gesamtkosten von 1.64 Mio. Euro auf ca. 4%.

Dies sind nur die zusätzlichen Kosten für die Herstellung. Der Mehraufwand für Folgearbeiten wie z.B. Montage und Transport, sind hier noch nicht berücksichtigt. In dieser Betrachtung handelt es sich um eine Neuanlage. Durch die Konstruktion der Einbauten ist es auch möglich, diese in bestehende Drehrohre zu verbauen bzw. nachzurüsten. Wenn dies der Fall ist, kann der Anteil der zusätzlichen Kosten deutlich höher liegen, da hier zusätzlich zur Fertigung noch andere Kosten anfallen wie:

- Transport zum Standort des Drehrohres
- Montage/Einbau vor Ort
- Stillstandszeit der Anlage (Produktionsausfall)
- Nachberechnungen der zusätzlichen Belastung (je nach Auslegung und Zustand des Drehrohrs)
- Erneuerung einzelner Komponenten durch eventuelle Mehrbelastungen

Diese Mehrkosten unterscheiden sich je nach Art und Zustand des Drehrohrs und müssen für jedes Drehrohr separat betrachtet werden. Erst dann lässt sich eine eindeutige Aussage über die Höhe der Mehrkosten treffen.

ARBEITSPAKET 5 – DBU – ZADCON

11. Fazit

In diesem Projekt sollte durch die Entwicklung einer neuen Form von Drehrohreinbauten der spezifische Energiebedarf reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden für eine Referenzanlage, verschiedene verfahrenstechnische Berechnungen durchgeführt. Ein Versuchsmodell mit der neuen Geometrie der Einbauten dient zur Optimierung und Anpassung der Versuchsparameter. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem man die transversale Bewegungsdynamik des Klärschlammes in Drehrohren mit Sektionaleinbauten beschreiben kann. Bei den anschließenden konstruktiven Untersuchungen wie der Fertigung, Montage und statischer Berechnungen der Einbauten wurden auch die damit verbundenen Kosten mit betrachtet werden.

Durch dieses Forschungsprojekt hat sich gezeigt, dass für Drehrohre mit dem neuen Design der Einbauten im Gegensatz zu Drehrohren ohne Einbauten eine Einsparung des Energiebedarfes von bis zu 12% möglich ist. Dies führt zu einer geringeren Belastung der Umwelt durch den Ausstoß von CO₂.

Bei der Betrachtung der Referenzanlage als neue Anlage entstehen durch die Einbauten zusätzliche Investitionskosten, in Form der Fertigungskosten von ca. 4%, was ca. 60.000 Euro entspricht. Die Verringerung des Energiebedarfes und des CO₂ Ausstoßes verringern auch die Energiekosten und die Ausgaben für die CO₂ Steuer, welches eine schnellere Amortisierung der Investitionskosten zur Folge hat. Das gilt aber nur für Neuanlagen. Bei Referenzanlagen ist die Nachrüstung der Einbauten mit deutlich höheren Kosten verbunden. Um diese zu ermitteln, sollte vorab ein Gutachten zur Rentabilität des Vorhabens erstellt werden.

Grundsätzlich ist zu sagen, der Einsatz der neuartigen Einbauten lohnt sich für Unternehmen und Umwelt. In welcher Höhe muss von Fall zu Fall neu betrachtet werden, da jedes Drehrohr einzigartig und speziell ist. Mit Hilfe des entwickelten mathematischen Modells und Versuchen im Labormaßstab, können Drehrohre präziser und sicherer für die jeweilige Anwendung ausgelegt werden. Infolgedessen können Risiken für die Unternehmen und Folgen für die Umwelt und deren Belastung minimiert bzw. besser abgeschätzt werden.

Mit dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass eine Einsparung des Energiebedarfes bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm mit einfachen Mitteln möglich ist. Da diese Prozesse noch nicht ausreichend erforscht sind, ist sich daraus schließen, dass es noch weiteres Potenzial vorhanden ist, welches näher untersucht werden sollte. So wäre in einem weiterführenden Projekt, die Kopplung von Trocknung und Verbrennung in einem Apparat als einstufiger Prozess und die Implementierung der thermischen Klärschlammverwertung in bestehende Prozesse zur Nutzung des Gasstromes infolge einer Kreislaufführung möglich.