

**BMUB-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM**

## **Abschlussbericht**

**zum Vorhaben**

*Klärschlammreformer der Kläranlage Renningen*

*KFW-Aktenzeichen: NKa3-2142*

**Zuwendungsempfänger/-in**

*Stadt Renningen*

**Umweltbereich**

*Wasser/Abwasser, Energie*

**Laufzeit des Vorhabens**

*05/2015 bis 07/2019*

**Autor/-en**

*Hartmut Marx, Stadt Renningen*

*Dr.-Ing. Steffen Ritterbusch, Thermo-System GmbH*

**Gefördert mit Mitteln**

**des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit**

**Datum der Erstellung**

*26.06.2023*

## Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA: 90 030/13	Projekt-Nr.: 2142
Titel des Vorhabens: SolarMining - Solarunterstützte Energie- und Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm	
Autor/-en (Name, Vorname): Marx, Hartmut Ritterbusch, Steffen	Vorhabenbeginn: 13.05.2015
	Vorhabenende: 31.07.2019
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): Stadt Renningen Hauptstr. 1 71272 Renningen	Veröffentlichungsdatum: 26.06.2023
	Seitenzahl: 56
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen): Die geänderten Rahmenbedingungen für die Klärschlammverwertung stellen kleine und mittlere Kommunen vor große Herausforderungen. Die negativen Umweltauswirkungen durch Schadstoffeinträge in die Böden sowie durch lange Transportstrecken sollen verringert werden, während der im Klärschlamm enthaltene Phosphor als wertvolle Ressource wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden soll. Das vorgestellte Anlagenkonzept einer dezentralen thermischen Verwertungsanlage besteht aus einem KlärschlammReformer der Fa. Thermo-System mit 3-stufiger Rauchgasreinigung, Abwärmenutzung im Solartrockner sowie einer Stromerzeugung über ein ORC-Modul. Mit der in Renningen realisierten Anlage ist es gelungen, die thermische Verwertung von Klärschlamm für Kläranlagen zwischen 25.000 und 100.000 EW unter Schadstoffabreicherung und Rückgewinnung des Phosphors zur Düngemittelnutzung energieeffizient umzusetzen.	
Schlagwörter: Klärschlamm, dezentrale thermische Verwertung, Solartrocknung, Phosphorrückgewinnung	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: Elektronischer Datenträger:	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite:

## Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency: 90 030/13	Project–No.: 2142
Report Title: SolarMining - Solar assisted energy and phosphorous recovery from sewage sludge	
Author/Authors (Family Name, First Name): Marx, Hartmut Ritterbusch, Steffen	Start of project: 13.05.2015
	End of project: 31.07.2019
Performing Organisation (Name, Address): Stadt Renningen Hauptstr. 1 71272 Renningen	Publication Date: 26.06.2023
	No. of Pages: 56
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection	
<p>Summary (max. 1.500 characters):</p> <p>The fundamentally changing frame conditions for sewage sludge utilization are posing major challenges to small and medium-sized municipalities. While negative environmental effects caused by pollutant inputs into the soil and by long transport distances are to be reduced, the phosphorous contained in the sewage sludge is to be returned to the cycle as a valuable resource.</p> <p>The presented concept of a decentralised thermal recycling plant consists of a Thermo-System SludgeReformer with 3-stage flue gas cleaning, waste heat utilisation in the solar dryer and power generation via an ORC module. With the plant realised in Renningen, the thermal processing of sewage sludge for sewage treatment plants between 25,000 and 100,000 p.e. with pollutant removal and recovery of phosphorous for fertilizer use has been implemented in an energy-efficient manner.</p>	
<p>Keywords:</p> <p>sewage sludge, decentralized processing, solar drying, phosphorous recovery</p>	

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>6</b>
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	6
1.2	Ausgangssituation .....	7
<b>2</b>	<b>Vorhabensumsetzung .....</b>	<b>11</b>
2.1	Ziel des Vorhabens .....	11
2.2	Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten) .....	12
2.3	Umsetzung des Vorhabens .....	18
2.4	Behördliche Anforderungen (Genehmigungen) .....	20
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten .....	25
2.6	Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....	27
<b>3</b>	<b>Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung.....</b>	<b>29</b>
3.1	Bewertung der Vorhabensdurchführung.....	29
3.2	Stoff- und Energiebilanz.....	30
3.2.1	Massenbilanzen.....	30
3.2.2	Energiebilanz .....	32
3.3	Emissionsmessungen .....	34
3.4	Ascheverwertung und Phosphorrecycling .....	37
3.4.1	Produktqualität .....	37
3.4.2	Pflanzenverfügbarkeit .....	40
3.4.3	Verwertungswege und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten der Asche .....	41
3.4.4	Direkte Nutzung des Reformersprodukts nach einem Teilaufschluß mit Säure und Aufbereitung/Granulierung .....	42
3.4.5	Abgabe des Reformersprodukts an einen Düngemittelaufbereiter zur Nutzung und/oder Schwermetallabreicherung .....	43
3.4.6	Zwischenlagerung des Reformersprodukts bis zu einer späteren Aufbereitung in Eigenregie oder durch einen Dritten .....	44
3.5	Umweltbilanz .....	44
3.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	46
3.7	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren .....	47
<b>4</b>	<b>Übertragbarkeit .....</b>	<b>48</b>
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung .....	48
4.2	Modellcharakter/Übertragbarkeit .....	49
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung/Summary .....</b>	<b>50</b>

5.1	Zusammenfassung .....	50
5.1.1	Einleitung.....	50
5.1.2	Vorhabenumsetzung.....	50
5.1.3	Ergebnisse .....	50
5.1.4	Ausblick .....	51
5.2	Summary .....	51
5.2.1	Introduction.....	51
5.2.2	Project implementation .....	51
5.2.3	Project results.....	52
5.2.4	Prospects .....	52
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>54</b>
7.1	Abkürzungsverzeichnis.....	54
7.2	Abbildungsverzeichnis .....	55
7.3	Tabellenverzeichnis.....	56

# 1 Einleitung

## 1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Stadt Renningen besteht aus den zwei Teilorten Renningen und Malsheim ist mit 18.500 Einwohnern ein aufstrebender und leistungsfähiger Wirtschaftsstandort mit hoher Lebensqualität. Wirtschaftlich interessant macht Renningen insbesondere seine günstige zentrale Lage im Herzen der Technologie- und Wirtschaftsregion Stuttgart an der Schnittstelle der Entwicklungsachse Stuttgart – Leonberg – Renningen – Schwarzwald und der kleinen aber wirtschaftlich bedeutenden Entwicklungsachse Renningen – Sindelfingen – Böblingen.

Eine ausgewogene Mischung mittelständischer Betriebe zahlreicher Branchen mit qualifizierten Arbeitsplätzen, ergänzt durch mehrere international bekannte und leistungsfähige Unternehmen, haben an der stabilen Finanzkraft der Stadt Renningen einen erheblichen Anteil. Mit dem Bau eines neuen Forschungs- und Entwicklungszentrums konzentriert die Robert Bosch GmbH zukünftig ihre Grundlagenforschung in Renningen und unterstreicht damit die Qualität des Wirtschaftsstandorts nochmals eindrücklich.

Durch eine konsequente und ausgewogene kommunale Ansiedlungsstrategie und die ständige Bereitstellung neuer Gewerbeflächen ist es gelungen, das gute Beschäftigungsangebot am Ort stetig weiter zu verbessern. So bieten Renningens Unternehmen heute ca. 6.000 Arbeitsplätze.

Darüber hinaus bietet Renningen als moderner Bildungsstandort alle weiterführenden Schulen, ein vielseitiges Ganztagesbetreuungsangebot im Schulzentrum Renningen sowie ein zukunftsfähiges Bildungs- und Betreuungskonzept in den Kindertageseinrichtungen mit Ganztagesbetreuungsangeboten und Betreuungsangeboten für Kinder unter drei Jahren. Weiterhin kann Renningen auch als interessante Sport- und Freizeitstadt mit vielseitigen Möglichkeiten zur individuellen Freizeitgestaltung überzeugen. Mehr als 70 Vereine bereichern das kulturelle Leben Renningens durch ihr ehrenamtliches Engagement.

Die Kläranlage wurde 1967 in Betrieb genommen und 1977 auf ca. 25 000 EW ausgebaut. In den Folgejahren wurde die Anlage mehrfach erweitert und optimiert, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden. Im Jahr 2005 wurde sie um eine solare Trocknungsanlage der Firma Thermo-System erweitert, mit der das zu entsorgende Schlammvolumen seither um zwei Drittel verringert wird. Als letzter und konsequenter Schritt soll jetzt die energetische

und stoffliche Nutzung des Schlammes bzw. das Recycling des enthaltenen Phosphors erfolgen.

## **1.2 Ausgangssituation**

Die Verwertung bzw. Entsorgung von Klärschlämmen aus der Abwasserbehandlung befindet sich in einer tiefgreifenden Umbruchphase. Es zeichnet sich ab, dass bisher übliche Verwertungswege zukünftig gar nicht mehr oder nur noch sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen werden. So ist die Deponierung von Klärschlämmen inzwischen verboten. Auch die landwirtschaftliche und landschaftsbauliche Verwertung steht aufgrund der Risiken durch den Eintrag von organischen Schadstoffen, Schwermetallen und Pathogenen zunehmend in die Kritik und wird künftig gesetzlich stark eingeschränkt werden. Während Gehalte von Schwermetallen durch konsequente Einleiterkontrolle und Pathogenen durch entsprechende Behandlungsverfahren beherrschbar erscheinen, ist der Eintrag organischer Schadstoffe in das Abwasser und den Klärschlamm kaum kontrollierbar. Zu vielfältig sind die Quellen und zu groß ist die Anzahl an potentiell gefährlichen Stoffen. Da über die Wirkungsweise vieler organischer Schadstoffe im Boden sowie deren mögliche Verlagerung in das Grundwasser oder die Nahrungskette erst wenig bekannt ist, erscheint vielen Experten ein Verzicht auf eine bodengebundene Klärschlammverwertung unvermeidlich. Zudem ist inzwischen bekannt, dass der Phosphor als eine der wichtigsten Rohstoffkomponenten im Schlamm im Falle der überwiegend eingesetzten Fällung mit Eisensalzen kaum noch pflanzenverfügbar ist [Römer 2013]. Damit entfällt eines der wichtigsten Argumente für die direkte landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes. Die neugefasste Klärschlammverordnung („Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“) sieht dementsprechend erhebliche Einschränkungen und umfangreiche Untersuchungs- und Dokumentationspflichten bei der bodenbezogenen Verwertung vor [Bundesgesetzblatt 2017].

Allerdings fällt der Klärschlamm bundesweit auf etwa 10.000 Kläranlagen an und muss im Falle der heute üblichen, zentralen Verbrennung in Großanlagen vielfach über mehrere hundert Kilometer transportiert werden. Nach Abzug der direkt auf den Standorten der Klärwerke verbrannten Schlammengen verbleiben in Deutschland etwa 6 Mio. t entwässerter Schlämme zum Transport in zentrale Verbrennungsanlagen oder zur anderweitigen Verwertung. Dies entspricht rund 240.000 LKW-Ladungen pro Jahr.

Im Einzelfall kann die bundesweit übliche Mitverbrennung in Großkraftwerken für eine Gemeinde wie beispielsweise Füssen (Bayern) allein für den Klärschlammtransport über

100.000 LKW-Kilometer pro Jahr erfordern. Bevor dort im Jahr 2000 eine solare Trocknungsanlage gebaut wurde, die die Entsorgungsmenge um rund 70 % verringerte, war dies die einzige wirtschaftlich tragbare Lösung [Bux u. Baumann 2003]. Unterstellt man die in Baden-Württemberg in einer Studie ermittelte durchschnittliche Transportentfernung für Klärschlamm bis zu einer zentralen Verbrennungsstätte von rund 300 km, so ergeben sich deutschlandweit rechnerisch bis zu 120 Millionen LKW-Transportkilometer pro Jahr. Auch wenn die bei einer vollständigen Verbrennung aller Schlämme tatsächlich zurückzulegende Transportstrecke schon aufgrund verschiedener auf großen Klärwerken bereits bestehender Verbrennungsanlagen sowie die je nach Bundesland unterschiedlichen mittleren Transportentfernungen deutlich geringer sein dürfte, bleiben die Umweltauswirkungen trotzdem erheblich.

Der in der Gesamtbewertung wichtigste Punkt ist jedoch der Sachverhalt, dass bei der heute vielfach praktizierten Mitverbrennung von maschinell entwässerten Klärschlämmen in Kohlekraft- und Zementwerken der im Klärschlamm enthaltene Phosphor nicht wiedergewonnen werden kann. Die ab 2029 geltende Pflicht zur Phosphorrückgewinnung wird die Möglichkeiten der Mitverbrennung von Klärschlamm erheblich einschränken. Eine Abtrennung des Phosphors aus dem Klärschlamm vor der Mitverbrennung ist zwar technisch teilweise möglich, allerdings ist der technische Aufwand sowie der Einsatz an Chemikalien sehr hoch. Dabei ist die Wiedergewinnungsrate von Phosphor aus flüssigem Klärschlamm bei den heute bekannten Verfahren auf 30 bis 50 % begrenzt.

Da es sich bei Phosphor um einen knappen, endlichen und nicht ersetzbaren Rohstoff handelt, der für die Welternährung immense Bedeutung besitzt, ist eine möglichst weitgehende Rückgewinnung jedoch langfristig unverzichtbar. Dies gilt umso mehr, als die im Klärschlamm enthaltene Menge an Phosphor ausreichen würde, um 40 bis 50 % der jährlichen Phosphorimporte zu decken [Römer 2013].

Als Alternative bietet sich daher die thermische Schlammbehandlung in Monoverbrennungs- oder –vergasungsanlagen an. Danach kann der in der Asche zurückbleibende Phosphor fast vollständig zurückgewonnen werden. Bei Schlämmen aus der kommunalen Abwasserbehandlung wird dabei in der Asche eine Phosphat-Konzentration zwischen 15 und 20 % erreicht. Allerdings sind die auf dem Markt bislang verfügbaren Monoverbrennungsanlagen aus Kostengründen überwiegend nur auf großen Kläranlagen mit mindestens 200.000 EW einsetzbar. Für die große Zahl an kleinen bis mittelgroßen Anlagen gibt es am Markt bislang noch keine wirtschaftlich darstellbare und erprobte Lösung. Eine dezentrale thermische Klärschlammverwertung zu vertretbaren Preisen ist daher bis dato nicht möglich.

Ebenso gibt es bislang keine Anlagen, die dank Nutzung erneuerbarer Energien autotherm oder mit einem Überschuss an Nutzenergie betrieben werden können.

Für die aus Ressourcenschutzgründen anzustrebende thermische Behandlung des Klärschlammes in Klärschlammverbrennungsanlagen kommt erschwerend hinzu, dass die aktuell verfügbaren Kapazitäten voll ausgeschöpft sind und nur für rund ein Drittel des in Deutschland anfallenden Klärschlammes ausreichen. Soll das Ziel eines weitgehenden Ausstiegs aus der bodenbezogenen Verwertung bei gleichzeitiger Wiedergewinnung des Phosphors erreicht werden, müssen dementsprechend beträchtliche zusätzliche Kapazitäten geschaffen werden.

Der Bau von zentralen Großanlagen bedingt allerdings die oben bereits erwähnten Nachteile hinsichtlich des Transportaufwandes. Zudem ist die Standortsuche für derartige Anlagen schwierig, denn die Akzeptanz in der Bevölkerung für zentrale Müll- oder Klärschlammverbrennungsanlagen ist gering und die vielfach sehr langwierigen Genehmigungsverfahren sind politisch nur schwer durchsetzbar. Dezentral einsetzbare Verfahren bieten hier sehr große Vorteile.

Die große Herausforderung liegt entsprechend darin, die genannten technischen Fragestellungen zu lösen und gleichzeitig Investitions- und Betriebskosten in einem Rahmen zu halten, der eine wirtschaftliche Umsetzung zulässt. Dies erfordert an verschiedenen Stellen Innovationen, die deutlich über den bekannten Stand der Technik hinausgehen.

Die Stadt Renningen hat im Bereich der Kläranlage bereits in der Vergangenheit auf innovative Projekte gesetzt und in Kooperation mit Forschungseinrichtungen und Industriepartnern Technologien bereits in einer frühen Entwicklungsphase erprobt und umgesetzt. Die Meilensteine waren wie folgt:

- 1967 Inbetriebnahme des mechanisch-biologischen Klärwerks mit Rechen, Rundsandfang, Kombibecken, Belebung mit Nachklärung für 12000 Einwohnereinheiten.
- 1977 Anpassung des Klärwerks an die fortschreitende Stadtentwicklung. Neubau eines Kombibeckens für Vorklärung und Belebung für 25000 Einwohnereinheiten.
- 1988 Bau eines Faulturms. Mikroorganismen zersetzen die leicht faulenden organischen Stoffe. Der Schlamm wird hygienisiert und um ca. 25 % reduziert. Dabei entsteht verwertbares Methangas.

- 1992 Erweiterung des Betriebsgebäudes. Anpassung an den Stand der Technik.
- 1994 Erweiterung des Klärwerks aufgrund gestiegener gesetzlicher Anforderungen.
- Einbau eines Siebrechens
  - Bau eines belüfteten Sand- und Fettfangs
  - Umbau Kombinationsbecken
  - Bau eines zweiten Nachklärbeckens
  - gezielte Phosphorelimination
  - gezielte Stickstoffelimination
- 2005 Inbetriebnahme der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage. Reduktion der zu entsorgenden Klärschlamm-menge von 1200 auf 400 t pro Jahr

Neben der reinen Leistungsfähigkeit der Kläranlage im Hinblick auf Abwasserreinigung wurde von Seiten der Stadtverwaltung über die Jahre immer ein Augenmerk auf eine optimierte Klärschlamm-entsorgung und auf eine energetische Optimierung Wert gelegt.

Vor 11 Jahren entschied die Stadt Renningen, die ersten Schritte zur Mengenreduktion mit einer solaren Klärschlamm-trocknung umzusetzen. In der solaren Klärschlamm-trocknung wird der ausgefaulte Schlamm ohne Einsatz thermischer Energie allein durch Solarstrahlung von 20 - 25 %TR auf ca. 70 - 80 % TR getrocknet. Die Massenreduktion beträgt dabei ca. 2/3.

Bisher standen zur weiteren Verwertung nur die Rekultivierung, die Mitverbrennung in Zementwerken oder Kohlekraftwerken zur Auswahl. Aufgrund des Mangels regionaler Verwertungs-kapazitäten fallen bei allen Möglichkeiten lange Transportwege an. Ebenso sind die im Klärschlamm enthaltenen Wertstoffe verloren. Durch die Ankündigung des Bundesumweltministerium 2012 die „Verordnung zur Nutzung wertgebender Bestandteile von Klärschläm-men bei nicht bodenbezogener Verwertung“ / Phosphatrückgewinnungs-verordnung AbfPhosV werden die bisherigen Entsorgungswege erschwert und dadurch verteuert.

Aus dieser Ausgangslage entstand die Überlegung, nach der solaren Trocknung eine dezentrale thermische Behandlungsstufe zu realisieren. Als Projektpartner für die Umsetzung wurde die Fa. Thermo-System gewählt.

## 2 Vorhabensumsetzung

### 2.1 Ziel des Vorhabens

Mit dem Vorhaben soll das Konzept einer energieeffizienten dezentralen thermischen Klärschlammbehandlungsanlage umgesetzt und demonstriert werden. Hierbei sind insbesondere folgende Aspekte von Bedeutung:

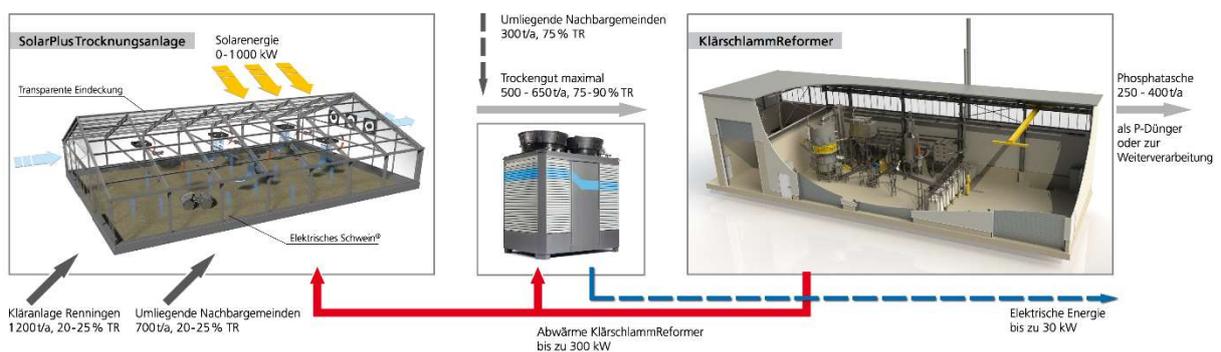
1. Der im Schlamm enthaltene Phosphor soll möglichst vollständig wiedergewonnen und für eine örtliche Wiederverwendung als Düngemittel oder – je nach Erfordernissen und Wirtschaftlichkeit – für eine externe Aufbereitung bereitgestellt werden.
2. Durch eine interkommunale Zusammenarbeit der Stadt Renningen mit benachbarten Umlandgemeinden sollen einerseits die Umweltauswirkungen der Klärschlammbehandlung minimiert, andererseits die Kosten langfristig auf einem stabilen Niveau in vertretbarer Höhe gehalten werden. Das Vorhaben soll dabei als Modellprojekt für andere ländliche Kommunen dienen.
3. Die zu entsorgende Masse an Klärschlamm soll durch solare Trocknung und Reformierung auf ein Minimum reduziert werden. Damit sollen die erforderlichen Straßentransporte auf ein unvermeidliches Minimum reduziert werden (nur mineralische Rückstände zur weiteren Nutzung).
4. Der Klärschlamm soll als regenerativer Brennstoff zur dezentralen Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie genutzt werden. Während der überschüssige elektrische Strom auf der Kläranlage eingesetzt werden soll, wird die überschüssige Wärme vollständig zur Unterstützung der Solartrocknung eingesetzt. Dies ist insbesondere in den Wintermonaten von erheblichem Vorteil und erlaubt eine deutliche Steigerung der Kapazität.
5. Der Schlamm aus Renningen und den umliegenden Gemeinden wird derzeit teilweise mitverbrannt und teilweise in der Rekultivierung verwertet. Durch die vorgesehene Maßnahme soll eine langfristig gesicherte Verwertung in Eigenverantwortung ermöglicht werden. Damit kann die Abhängigkeit der Kommunen von wenigen Großunternehmen sowie das damit zusammenhängende Kostenrisiko reduziert werden.

6. Durch Reduktion von Straßentransporten, Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Transport und Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken unter Stützfeuerung, Erzeugung erneuerbarer Energie und Wiedergewinnung von Phosphor soll ein maßgeblicher Beitrag zur Entlastung der Umwelt sowie Einsparung von Energie bei der Abwasserreinigung geleistet werden. Ferner werden Quecksilber, Arsen und Cadmium zu einem großen Teil aus dem Nährstoffkreislauf ausgeschleust.
7. Durch das Vorhaben sollen Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens unter Praxisbedingungen demonstriert und nachgewiesen werden.

Die Umsetzung und Demonstration der Realisierbarkeit des Konzeptes soll als Grundlage zur Verbreitung der Technologie an weiteren Standorten dienen, um eine technologische Alternative zu den bestehenden Entsorgungswegen für Klärwerke zwischen 25.000 und 100.000 EW aufzuzeigen, wie sie auch durch die Novellierung der Klärschlammverordnung gefordert wird.

## 2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Das auf der Kläranlage Renningen umgesetzte Konzept besteht aus einer Solaren Klärschlamm-trocknungsanlage und einem KLÄRSCHLAMMREFORMER zur thermischen Behandlung des getrockneten Schlammes. Beide Anlagenteile wurden von der Firma Thermo-System Industrie- und Trocknungstechnik GmbH, Esslingen geliefert.



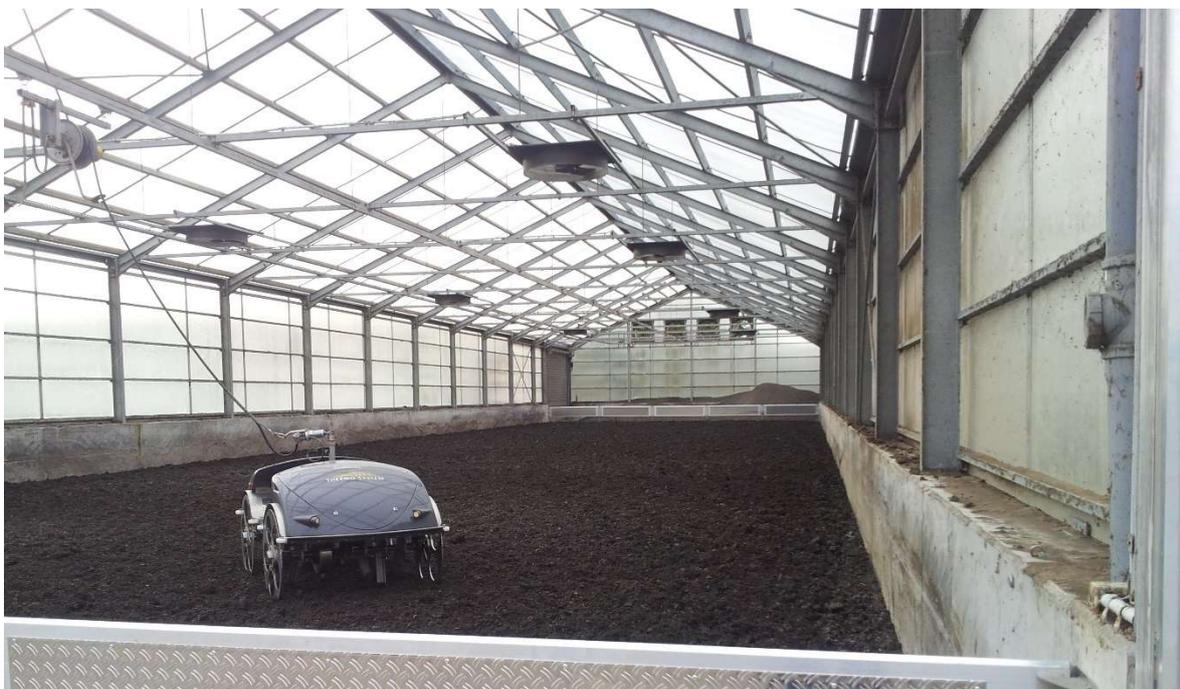
**Abbildung 1:** Konzept der Klärschlammverwertungsanlage bestehend aus Solarer Trocknung und KLÄRSCHLAMMREFORMER

Die solare Klärschlamm-trocknungsanlage besteht aus 2 Hallen mit einer transparenten Eindeckung, in denen der entwässerte Klärschlamm mit Hilfe von Solarenergie getrocknet wird. Ein Belüftungssystem sorgt für die regelmäßige Überströmung des Trocknungsguts und

die Abfuhr der feuchtebeladenen Trocknungsluft. Eine Wendemaschine, das ELEKTRISCHE SCHWEIN, wendet den Schlamm und sorgt für eine Strukturierung des Produkts.



**Abbildung 2:** Solare Klärschlamm-trocknungsanlage Renningen



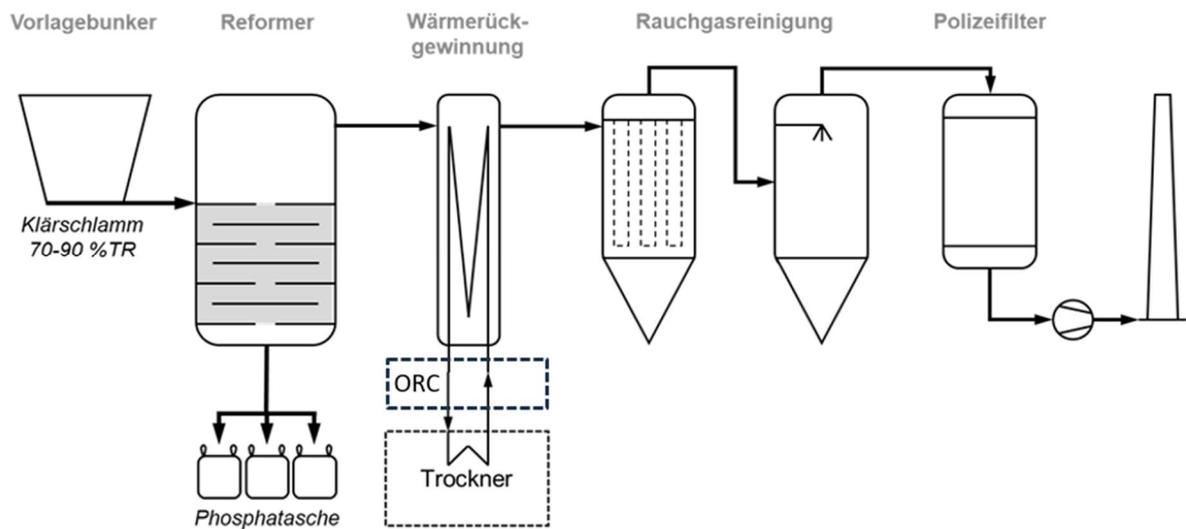
**Abbildung 3:** Solare Klärschlamm-trocknung mit ELEKTRISCHEM SCHWEIN

**Tabelle 1:** Technische Daten der Solaren Trocknungsanlage

<b>Solare Klärschlamm-trocknung</b>	
Schlammmenge vor Trocknung	1.900 t/a
TR-Gehalt vor Trocknung	20 - 25 % TR
Organikgehalt des Schlammes	45 - 60 %TR
Schlammmenge nach Trocknung	500 - 650 t/a
TR-Gehalt nach Trocknung	75 - 90 %
Trocknungsleistung	1.250 - 1.400 t/a
Trocknungsfläche	1.150 m <sup>2</sup>
Abwärmeeintrag	0 - 200 kW
Eindeckung	Polycarbonat
Trocknungsverfahren	SolarBatch
Wendetechnik	Elektrisches Schwein
Hersteller	Thermo-System

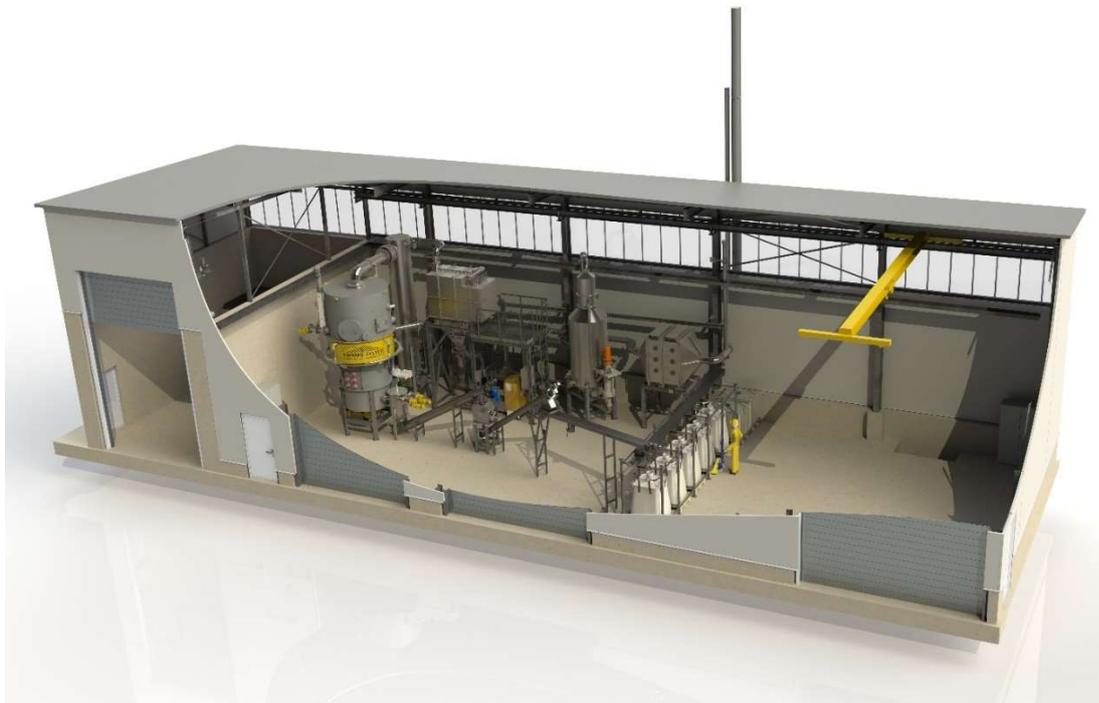
Der Prozess wird vollautomatisch gesteuert, um eine optimale Trocknungsleistung bei minimalem Energieaufwand zu erzielen. Durch die Nutzung von Abwärme aus dem KLÄRSCHLAMMREFORMER wird die Trocknungsleistung weiter erhöht. Der getrocknete Klärschlamm wird in der Trocknungsanlage zwischengelagert, bis er der KLÄRSCHLAMMREFORMER-Anlage zugeführt wird.

Die KLÄRSCHLAMMREFORMER-Anlage verfügt über einen Annahmehunker für getrockneten Klärschlamm mit einer Aufnahmekapazität von ca. 2,5 Tagen, so dass ein Betrieb über Wochenende ohne Nachbeschickung möglich ist. Aus dem Bunker wird der Schlamm mit Förderschnecken zum KLÄRSCHLAMMREFORMER transportiert, in dem die thermische Umwandlung des Klärschlammes stattfindet. Der KLÄRSCHLAMMREFORMER besteht aus einer Pyrolysezone und einer Oxidationszone für den Schlamm sowie einer Gasbrennkammer zur Verbrennung der entstehenden Pyrolysegase. Die räumliche Trennung der verschiedenen Zonen macht eine unabhängige Regelung der Prozessbedingungen möglich. Die entstehende Asche wird abgekühlt und anschließend in BigBags abgefüllt. Das Rauchgas aus dem KLÄRSCHLAMMREFORMER wird in einem Wärmeübertrager abgekühlt und durchläuft eine 3-stufige Gasreinigung bestehend aus Staubfilter, Rauchgaswäscher und Polizeifilter. Dadurch wird sichergestellt, dass die Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden.



**Abbildung 4:** Verfahrensschema des KLÄRSCHLAMMREFORMERS

Die aus dem Rauchgas in Form von Heißwasser ausgekoppelte Wärme wird über die ORC-Turbine zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt und anschließend auf niedrigerem Temperaturniveau der Trocknungsanlage zugeführt.



**Abbildung 5:** KLÄRSCHLAMMREFORMER-Halle mit Annahmehunker, Rauchgasreinigung und BigBag-Befüllstation



**Abbildung 6:** Außenansicht KLÄRSCHLAMMREFORMER-Halle



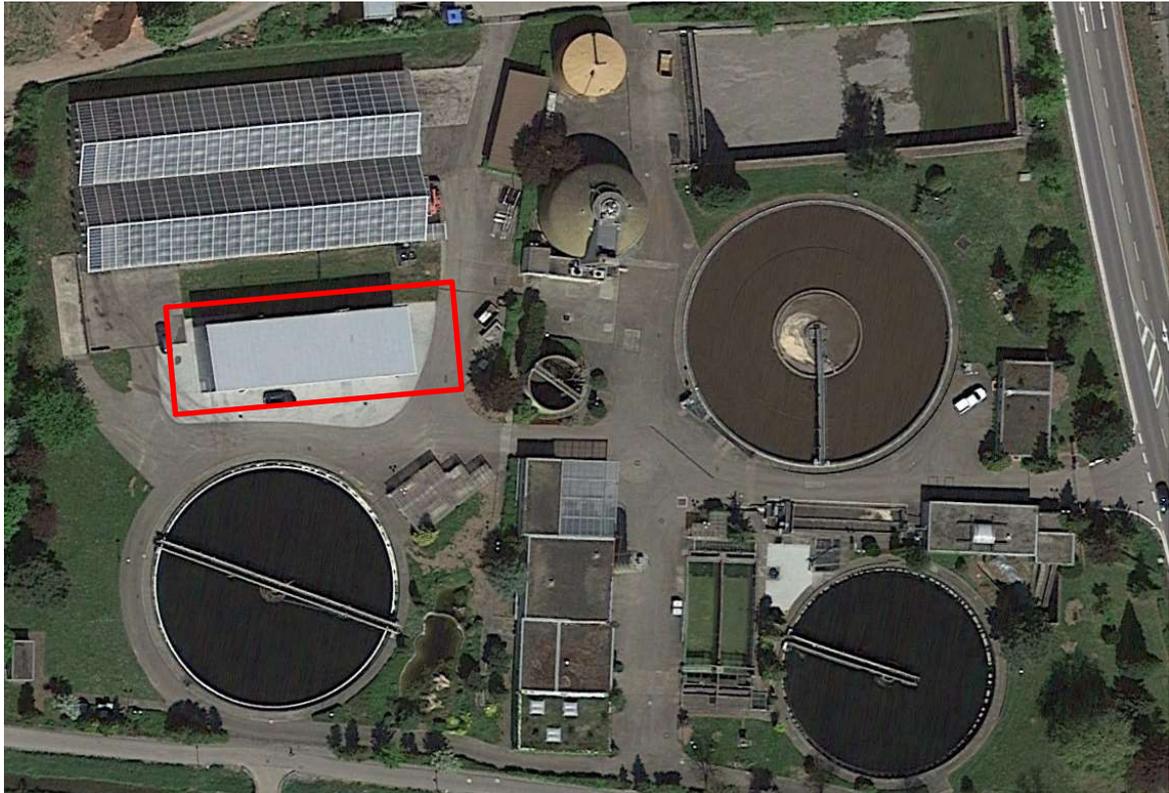
**Abbildung 7:** KLÄRSCHLAMMREFORMER mit Rauchgasreinigung

**Tabelle 2:** Technische Daten der KLÄRSCHLAMMREFORMER-Anlage

<b>KLÄRSCHLAMMREFORMER-Anlage</b>	
Schlammmenge getrocknet Input	800 - 950 t/a
TR-Gehalt	75 - 90 % TR
Organikgehalt des Schlammes	45 - 60 %TR
Aschemenge	250 - 400 t/a
Brennstoffennendurchsatz	150 kg/h
Feuerungsnennwärmeleistung	300 kW
Rauchgasreinigung	3-stufig
Elektrische Leistung ORC-Turbine	bis 30 kW
Abwärme zur Trocknungsanlage	ca. 200 kW
Gebäudefläche (mit Bunker und Erweiterungsfläche)	300 m <sup>2</sup>
Hersteller	Thermo-System



**Abbildung 8:** Kläranlage Renningen mit Solarer Trocknung vor Bau des KLÄRSCHLAMMREFORMERS (2014) [Quelle: Google]



**Abbildung 9:** Kläranlage Renningen mit KLÄRSCHLAMMREFORMER (2018) [Quelle: Google]

### 2.3 Umsetzung des Vorhabens

Aufgrund der Neuheit des anzuwendenden Verfahrens war die Projektumsetzung mit erheblichen Hindernissen und Risiken behaftet. Zwar gab es gewisse Vorkenntnisse und Erfahrungen aus einer Pilotanlage, die jedoch bezüglich der Größe nicht vergleichbar war und welche auch nicht den kompletten Verfahrensablauf abdeckte. Eine weitere Anlage, welche sich mit geringem Zeitvorsprung in der Realisierung befand, war anlagentechnisch zwar teilweise ähnlich, aber auch hier waren noch keine Betriebserfahrungen vorhanden, so dass Unsicherheiten vor allem auch bezüglich der zeitlichen Umsetzung bestanden. Dennoch haben sich alle Projektbeteiligten dazu entschlossen, das Vorhaben durchzuführen.

Die wichtigsten Meilensteine sind wie folgt dargestellt:

2004	Bau der Solaren Klärschlamm-trocknungsanlage
2005	Inbetriebnahme eines Versuchsreaktors zur thermischen Behandlung im Technikumsmaßstab
2011	Konkretisierung der Überlegungen zum Bau einer dezentral thermischen Klärschlammbehandlungsanlage

September 2013	Gemeinderatsbeschluss zur Beschaffung einer Anlage zur thermischen Behandlung von Klärschlamm bei 30 % Förderung
2014	Beantragung von Fördermitteln
März 2015	Zuwendungsbescheid des Umweltinnovationsprogramms
April 2015	Gemeinderatsbeschluss zum Bau des KlärschlammReformers Auftragsvergabe an Fa. Thermo-System
Juni 2015	Einreichung Bauantrag und Antrag auf Immissionsschutzrechtliche Genehmigung
September 2015	Baugrundgutachten
November 2015	Gemeinderatsbeschluss Vergabe Rohbauarbeiten
Dezember 2015	Änderungsbescheid UIP
Juni 2016	Änderungsbescheid UIP
Oktober 2016	Zwischenbericht Thermo-System: Anlagenkomponenten werden ab Ende Oktober bis Jahresende geliefert und bis Jahresende montiert. Verzögerungen bei der Hauptkomponente.
Dezember 2016	Änderungsbescheid UIP
	Baubeginn
April 2018	Warminbetriebnahme der Anlage, Beginn Schlammverwertung
Juni 2018	TÜV-Prüfung funktionale Sicherheit
September 2018	TÜV-Prüfung Inbetriebnahme
Mai 2019	Emissionsmessungen
2019-2022	Anlagenoptimierung
August 2022	Emissionsmessungen (Abnahmemessung)
März 2023	Genehmigung Dauerbetrieb

Im Verlauf des Projekts ergaben sich Verzögerungen im Bau der Anlage, welche einerseits auf das Fehlen geeigneter Standardtechnologien im benötigten Maßstab sowie auf mittlerweile gemachte Erfahrungen aus einer anderen Pilotanlage zurückzuführen waren. Hier haben unvorhergesehene Probleme bei eingesetzten Komponenten dazu geführt, dass diese technisch überarbeitet oder teilweise neu konzipiert werden mussten. Die wichtigsten Punkte sind im Folgenden aufgeführt:

- Sehr hoher Engineering-Aufwand für die Anlagenkomponenten, da im Bereich Rauchgaswärmeübertrager und Rauchgasreinigung nicht auf Standard-Komponenten zurückgegriffen werden konnte.
- Änderung der ersten Rauchgasreinigungsstufe aufgrund von Werkstoffproblemen, dadurch Neukonstruktion erforderlich

- Modifikation des Reaktorkonzepts aufgrund von Problemen mit Verschleiß und Aschequalität, dadurch Umkonstruktion und Umbau erforderlich
- erhöhter Aufwand und Nachrüstungen aufgrund widersprüchlicher Angaben von Prüfinstitutionen bezüglich der Einstufung des Rauchgaskessels
- schwierige Terminfindung mit Prüfinstitutionen, extrem lange Vorlaufzeiten
- Lieferverzögerungen bei der ORC-Turbine
- Komplexität der steuerungstechnischen Umsetzung und Automatisierung
- erhebliche Liefer- und Terminverzögerungen bedingt durch Corona-Krise während der Anlagenoptimierung

## **2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)**

Zur Genehmigung der Anlage zur thermischen Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage Renningen war ein Genehmigungsverfahren nach Baurecht durchzuführen. Die wasser- und immisionsschutzrechtliche Genehmigung war in das Baurechtsverfahren integriert. Die Genehmigungsaufgaben orientieren sich bezüglich der Emissionsgrenzwerte an der 17. BImSchV. Nach den inzwischen geänderten Gesetzesvorgaben wurde die Anlage nach § 67 Abs. 2 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes nach Nummer 8.1.1.4 des Anhangs zur 4. BImSchV angezeigt und genehmigt.

Folgende wesentliche Anforderungen wurden im Rahmen der Genehmigung gestellt:

- Zur thermischen Behandlung sind ausschließlich Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser (Abfallschlüsselnummer 19 08 05) zugelassen.
- Die maximale Kapazität der Behandlungsanlage ist auf 150 kg/h entsprechend ca. 300 kW Feuerungswärmeleistung sowie eine Jahresdurchsatzmenge von 1.200 t getrockneter Klärschlamm pro Jahr begrenzt.
- Es dürfen nur stabilisierte Klärschlämme angenommen werden. Die Schadstoffgehalte der zur thermischen Behandlung zugelassenen Schlämme gem. Tabelle 3 sind einzuhalten.
- Die Verbrennungsbedingungen von min. 850 °C und einer Verweilzeit von min. 2 s sind einzuhalten und gutachterlich nachzuweisen.

- Eine Beschickung des Reaktors darf erst erfolgen, wenn die Mindesttemperatur von 850 °C erreicht ist.
- Die Emissionsgrenzwerte am Kamin gem. Tabellen sind einzuhalten und über Messungen nachzuweisen.
- Die Brennkammertemperatur sowie O<sub>2</sub>, CO und NO<sub>x</sub> im Rauchgas sind kontinuierlich zu messen und als Halbstunden- und Tagesmittelwerte zu erfassen.
- Die Massenkonzentrationen der Emissionsparameter sind auf Normzustand (273,15 K; 101,3 kPa) nach Abzug des Feuchtegehaltes an Wasserdampf und einen Volumengehalt von Sauerstoff im Abgas von 11 % bezogen. Für die Stoffe, deren Emissionen durch Abgasreinigungseinrichtungen gemindert und begrenzt werden, darf die Umrechnung der Messwerte nur für die Zeiten erfolgen, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt.
- Die Ableitung der gereinigten Abgase hat min. 5 m über Dach bzw. 10 m über Boden zu erfolgen.

**Tabelle 3:** Schadstoffgrenzwerte des Klärschlammes zur thermischen Behandlung

<b>Klärschlamm (ASN: 19 08 05)</b>	
<b>Grenzwerte in mg/kgTS bzw. in Gew.-%</b>	
Quecksilber (Hg)	8,0
Cadmium (Cd)	10
Thallium (Tl)	0,5
Antimon (Sb)	30
Arsen (As)	30
Blei (Pb)	900
Chrom (Cr)	900
Kupfer (Cu)	800*
Mangan (Mn)	1500
Nickel (Ni)	200
Vanadium (V)	100
Zinn (Sn)	80
polychlorierte Biphenyle (PCB)	0,2
Pentachlorphenol (PCP)	3,0
AOX	500
Dioxine/Furane (PCDD/PCDF)	100 ng TE/kg TS
Chlor org. (Cl)	(0,5 %)
Fluor (F)	(< 0,1 %)
Schwefel (S)	(1,5 %)

**Tabelle 4:** Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 1)

<b>Grenzwerte bezogen auf Abgas im Normzustand trocken und 11 Vol.-% O<sub>2</sub></b>	
<b>Stoff</b>	<b>Halbstundenmittelwert</b>
Gesamtstaub	20 mg/m <sup>3</sup>
organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	20 mg/m <sup>3</sup>
gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff	60 mg/m <sup>3</sup>
gasförmige anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff	4 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid	200 mg/m <sup>3</sup>
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxide	400 mg/m <sup>3</sup>
Quecksilber und seine Verbindungen, angegeben als Quecksilber	0,05 mg/m <sup>3</sup>
Kohlenmonoxid	100 mg/m <sup>3</sup>
Ammoniak	15 mg/m <sup>3</sup>

**Tabelle 5:** Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 2)

<b>Grenzwerte bezogen auf Abgas im Normzustand trocken und 11 Vol.-% O<sub>2</sub></b>	
<b>Stoff</b>	<b>Tagesmittelwert</b>
Gesamtstaub	10 mg/m <sup>3</sup>
organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	10 mg/m <sup>3</sup>
gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff	10 mg/m <sup>3</sup>
gasförmige anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff	1 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid	50 mg/m <sup>3</sup>
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxide	200 mg/m <sup>3</sup>
Quecksilber und seine Verbindungen, angegeben als Quecksilber	0,03 mg/m <sup>3</sup>
Kohlenmonoxid	50 mg/m <sup>3</sup>
Ammoniak	10 mg/m <sup>3</sup>

**Tabelle 6:** Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 3)

<b>Grenzwerte bezogen auf Abgas im Normzustand trocken und 11 Vol.-% O<sub>2</sub></b>	
a) Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cadmium, Thallium und seine Verbindungen, angegeben als Thallium, <u>insgesamt</u>	0,05 mg/m <sup>3</sup> ,
b) Antimon und seine Verbindungen, angegeben als Antimon, Arsen und seine Verbindungen, angegeben als Arsen, Blei und seine Verbindungen, angegeben als Blei, Chrom und seine Verbindungen, angegeben als Chrom, Cobalt und seine Verbindungen, angegeben als Cobalt, Kupfer und seine Verbindungen, angegeben als Kupfer, Mangan und seine Verbindungen, angegeben als Mangan, Nickel und seine Verbindungen, angegeben als Nickel, Vanadium und seine Verbindungen, angegeben als Vanadium, Zinn und seine Verbindungen, angegeben als Zinn, <u>insgesamt</u>	0,5 mg/m <sup>3</sup> ,
c) Arsen und seine Verbindungen (außer Arsenwasserstoff), angegeben als Arsen, Benzo(a)pyren, Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cadmium, wasserlösliche Cobaltverbindungen, angegeben als Cobalt, Chrom(VI)verbindungen (außer Bariumchromat und Bleichromat), angegeben als Chrom	
insgesamt	0,05 mg/m <sup>3</sup>
oder	
Arsen und seine Verbindungen, angegeben als Arsen, Benzo(a)pyren, Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cadmium, Cobalt und seine Verbindungen, angegeben als Cobalt, Chrom und seine Verbindungen, angegeben als Chrom,	
insgesamt	0,05 mg/m <sup>3</sup>
und	
d) Dioxine und Furane gemäß Anlage 2 der 17. BImSchV	
insgesamt	0,1 ng/m <sup>3</sup> .

## 2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Im Schaltschrank der thermischen Behandlungsanlage ist ein Display mit Visualisierungssoftware zur Bedienung der Anlage vorhanden. Die Anlage kann von hier überwacht und gesteuert werden. Die Betriebsdaten werden gespeichert und können über die Visualisierungssoftware als Trends dargestellt und ausgewertet werden. Über eine Netzwerkanbindung und VNC-Client kann die Anlage auch von der Leitwarte der Kläranlage aus überwacht und gesteuert werden. Eine separate Auswertung der Emissionsdaten in Form von Halbstunden- und Tagesmittelwerten liefert die an die Genehmigungsbehörde zu übermittelnden Daten.

Die Steuerung und Datenaufbereitung müssen einerseits einen reibungslosen und sicheren Betrieb der Anlage ermöglichen, andererseits muss der kleinen Dimension der Anlage und damit der Wirtschaftlichkeit Rechnung getragen werden. Die Visualisierungssoftware liefert alle erforderlichen Informationen und Eingriffsmöglichkeiten. Über Fernzugang kann vom Anlagenhersteller auf die Steuerung zugegriffen werden, um das Betriebspersonal unterstützen oder Wartungsarbeiten durchführen zu können.

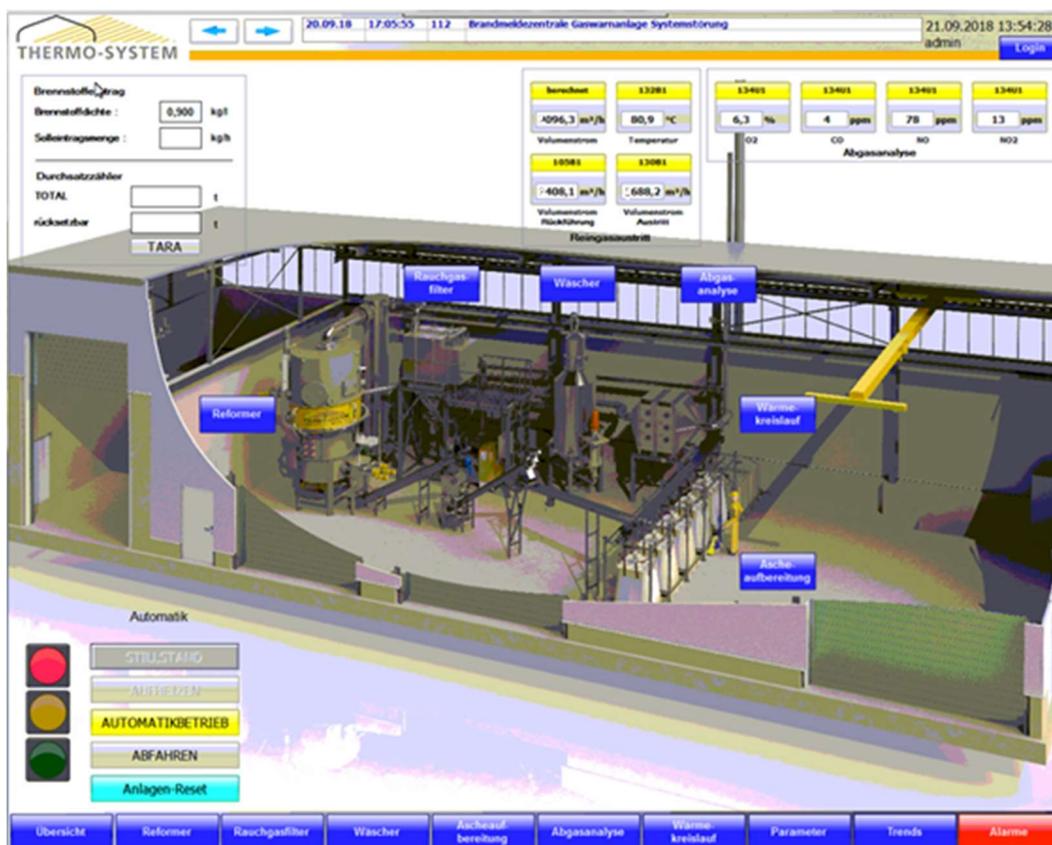


Abbildung 10: Übersichtsseite der Visualisierungssoftware

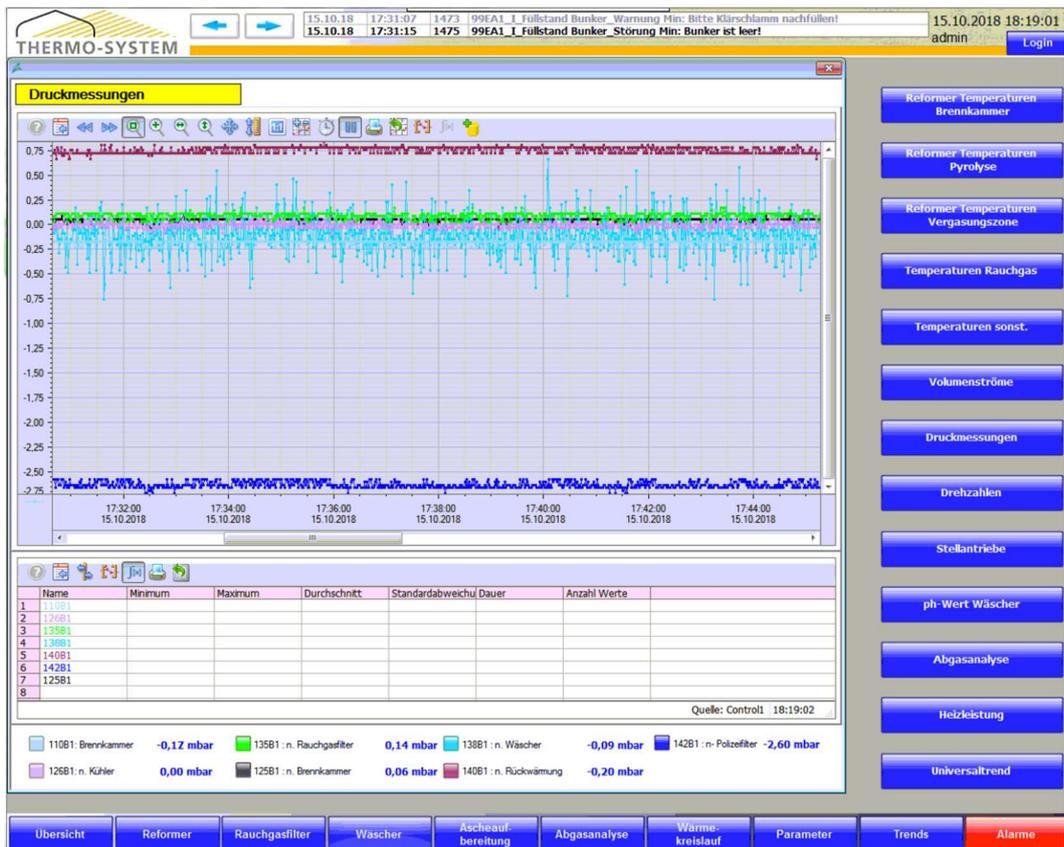


Abbildung 11: Beispielhafte Trendlinie zur Darstellung von Messdaten

**Meldanzeige**

Datum	Uhrzeit	Numm. Meldetext
1 15.10.18	17:31:15	1475 99EA1_I_Fullstand Bunker_Störung Min: Bunker ist leer!
2 15.10.18	17:31:07	1473 99EA1_I_Fullstand Bunker_Wärmung Min: Bitte Klärschlamm nachfüllen!
3 12.10.18	09:41:01	49 Verbindungsstörung SPS Reformer <-> SPS Rauchgasfilter
4 11.10.18	15:54:13	112 Brandmeldezentrale Gaswarnanlage Systemstörung
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		
44		

Anstehend: 4 Zu quittieren: 2 Ausgeblendet: 0 Liste: 4

18:10:56

Quittierung externe Geräte

Abbildung 12: Übersicht zur Anzeige von Betriebs- und Störmeldungen

## 2.6 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des Vorhabens wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt. Hierzu wurden folgende Betriebsdaten kontinuierlich aufgenommen:

### Kontinuierliche Datenerfassung durch Anlagensteuerung:

- Prozesstemperaturen im KlärschlammReformer sowie Rauchgastemperaturen über die gesamte Rauchgasstrecke
- Prozessdruck im KlärschlammReformer sowie Drücke über die gesamte Rauchgasstrecke
- Drehzahlen von Förderschnecken und Ventilatoren
- Volumenströme von Verbrennungsluft und Rauchgas
- Klappen- und Ventilstellungen
- pH-Messung Rauchgaswäscher
- kontinuierliche Abgasmessung zur Prozesssteuerung (O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>)
- Wärmemengenzähler
- Zähler Stromerzeugung ORC-Aggregat

Der Klärschlammthroughsatz bzw. die Aschemengen wurden gravimetrisch bestimmt.

Die qualitative Beurteilung des eingesetzten Klärschlammes sowie der Aschen wurde mithilfe mehrerer Einzelmessungen bzw. Analysen durchgeführt:

### Klärschlammanalysen:

- Trockenmasse
- Glühverlust
- wertbestimmende Bestandteile/Nährstoffe gem. AbfklärV/DüMV (Phosphat, Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel etc.)
- Schwermetalle gem. AbfklärV/DüMV
- organische Schadstoffe gem. AbfklärV/DüMV (AOX, PCB, PAK, PCDD/PCDF)

### Ascheanalysen:

- Trockenmasse
- Glühverlust
- wertbestimmende Bestandteile/Nährstoffe gem. DüMV (Phosphat, Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel etc.)
- Schwermetalle gem. DüMV/DepV
- organische Schadstoffe gem. DüMV/DepV (AOX, PCB, PAK, PCDD/PCDF)

- Phosphatlöslichkeit gem. DüMV
- Eluierbarkeit gem. DepV

Für die Reststoffe wurden weitere Schwermetallanalysen durchgeführt.

Ergänzend zu den kontinuierlichen Abgasmessungen wurden Emissionsmessungen gem.

17. BImSchV durchgeführt. Hierbei wurden folgende Parameter gemessen:

**Emissionsmessungen:**

- Volumenstrom
- kontinuierliche Messung (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Gesamt-C)
- diskontinuierliche Messung (Gesamtstaub, HCl, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, HF)
- filtergebundene Schwermetalle (Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Tl, V, Sn, Hg)
- filtergängige Schwermetalle (Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Tl, V, Sn, Hg)
- PCDD/F
- B(a)P

## **3 Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung**

### **3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung**

Die Stadt Renningen hat sich mit voller Überzeugung zur Durchführung des Vorhabens entschieden, um der Verantwortung einer nachhaltigen Klärschlammbehandlung langfristig gerecht zu werden. Umweltaspekte wie Verkehrsverminderung, CO<sub>2</sub>-Einsparung und die Nutzbarmachung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors waren wichtige Motive für die Durchführung des Projekts. Die öffentliche finanzielle Förderung hat entscheidend dazu beigetragen, die mit dem innovativen Verfahrensansatz verbundenen technischen, terminlichen und finanziellen Risiken zu mindern und die Investitionsentscheidung zu erleichtern.

Die terminlichen Verzögerungen wurden zwischen den Projektpartnern abgestimmt und bewusst in Kauf genommen, da hierdurch die Nutzung von Erfahrungen aus anderen Projekten und parallel laufenden Entwicklungsarbeiten einfließen konnten, um dies im Sinne einer höheren technischen Ausgereiftheit und Anlagenzuverlässigkeit nutzen zu können.

Die Erreichung der einzelnen Projektziele stellt sich wie folgt dar:

1. Phosphorwiedergewinnung:

Der im Schlamm enthaltene Phosphor findet sich nahezu vollständig (> 90 %) in der Asche in einer Konzentration von 15-20 % wieder. Die Grenzwerte der Düngemittelverordnung werden eingehalten, sofern der eingesetzte Klärschlamm den Grenzwert für Kupfer nicht überschreitet. Die Asche kann dann direkt zur Düngemittelherstellung verwendet werden.

2. interkommunale Zusammenarbeit:

Durch die Errichtung eines neuen großen Industriegebiets (Bosch-Areal) fallen zusätzliche Klärschlammengen an, welche in der Anlage mitbehandelt werden. Schlämme aus weiteren Nachbargemeinden sollen zukünftig angenommen werden.

3. Massenreduktion:

Die zu entsorgende Masse und damit die Transportkilometer konnten deutlich reduziert werden. Pro Jahr werden ca. 50.000 LKW-Kilometer eingespart.

4. energetische Nutzung des Klärschlamm:

Der Klärschlamm wird als regenerativer Brennstoff zur dezentralen Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie genutzt. Die Wärme wird in der Klärschlamm-trocknungsanlage genutzt. Die erzeugte elektrische Energie wird zur Eigenversorgung der Reformier-Anlage eingesetzt. Die Abwärme wird zur Unterstützung der Solartrocknung eingesetzt. Die Anlage kann thermisch autark betrieben werden. Elektrisch konnte zwar keine vollständige Autarkie erreicht werden, jedoch kann der elektrische Energiebedarf von Trockner und Reformier durch die Eigenstromerzeugung zu ca. 50 % gedeckt werden.

5. Unabhängigkeit vom Entsorgungsmarkt/Kostensicherheit:

Auf dem Hintergrund der derzeit extrem steigenden Entsorgungskosten für Klärschlamm bietet die dezentrale thermische Behandlung in Eigenregie Kostensicherheit durch Unabhängigkeit.

6. Durch Reduktion von Straßentransporten, Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Transport und Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken unter Stützfeuerung, Erzeugung erneuerbarer Energie und Wiedergewinnung von Phosphor wird ein maßgeblicher Beitrag zur Entlastung der Umwelt sowie Einsparung von Energie bei der Abwasserreinigung geleistet. Ferner werden Quecksilber, Arsen und Cadmium zu einem großen Teil aus dem Nährstoffkreislauf ausgeschleust.

7. Mit dem Vorhaben konnte die Funktionsfähigkeit der Technologie unter Praxisbedingungen demonstriert werden. Der Nachweis der Wirtschaftlichkeit konnte erbracht werden.

## **3.2 Stoff- und Energiebilanz**

Mit der thermischen Klärschlammbehandlungsanlage werden die angestrebten Leistungsdaten weitgehend erreicht und teilweise sogar deutlich übertroffen.

### **3.2.1 Massenbilanzen**

Mit einem Organikgehalt von ca. 55 % und einem TR-Gehalt von ca. 77 % ergibt sich bei einem Durchsatz von 150 kg/h eine Feuerungswärmeleistung von ca. 350 kW. Die produzierte Aschemenge liegt bei etwa 58 kg/h.

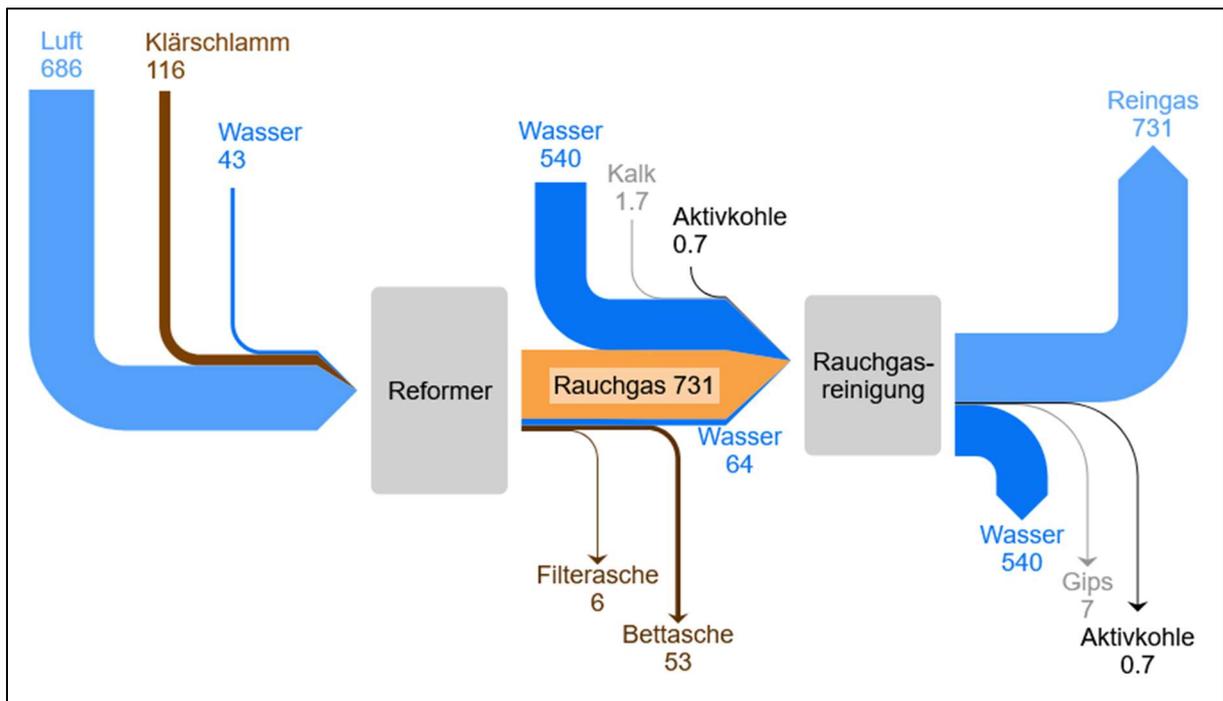
Die Versuche haben gezeigt, dass der KlärschlammReformer technisch in der Lage ist, bis zu 190 kg/h getrockneten Klärschlamm durchzusetzen, wobei dies genehmigungsrechtlich nicht vorgesehen ist.

Bislang wurden ca. 1.800 t entwässerter Klärschlamm entsprechend 500 t getrocknetem Klärschlamm in der Anlage verarbeitet und 200 t Asche produziert.

**Tabelle 7: Massenbilanzen**

	INPUT			OUTPUT					Wiederfindungsrate [%]
	KS getrocknet Massenstrom	Sonstiges Massenstrom	Summe Input	KS-Asche Massenstrom	Filterasche Massenstrom	Sonstiges Massenstrom	Summe Output		
<b>Physikalisch-chemische Parameter</b>	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	
Massenstrom (OS)	150	1235,4	1385,4	52,7	5,9	1343,0	1401,6	101%	
Trockenrückstand	116,1	687,7	803,8	52,5	5,9	739,1	797,5	99%	
Wassergehalt	33,9	549,4	583,3	0,2	0,0	603,9	604,1	104%	
Glühverlust (org. Substanz)	81,945		81,9	1,3	0,0		1,4	2%	
<b>Wertbestimmende Bestandteile</b>	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	
Gesamtstickstoff (N)	6,65		6,6	0,09	0,00	0,02	0,1	2%	
Phosphat ges. (als P2O5)	10,86		10,9	8,96	0,95	0,00	9,9	91%	
Kalium ges. (K2O)	0,30		0,3	0,58	0,07	0,00	0,7	217%	
Calcium ges. (als CaO)	11,82	1,2	13,0	7,38	0,00	2,40	9,8	75%	
Magnesium ges (als MgO)	1,37		1,4	1,32	0,15	0,00	1,5	107%	
Schwefel-Gesamt (S)	1,88		1,9	0,69	0,06	1,21	2,0	104%	
<b>Wertbestimmende Bestandteile (Düngemittel), Spurennährstoffe</b>	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	
Natrium (Na)	61,18		61,2	89,23	11,20	0,00	100,4	164%	
Bor (B)	2,44		2,4	3,78	0,37	0,00	4,2	170%	
Eisen (Fe)	7430,40		7430,4	7348,49	919,87	0,00	8268,4	111%	
Kobalt (Co)	0,68		0,7	0,79	0,08	0,00	0,9	128%	
Mangan (Mn) gesamt	29,95		30,0	32,02	0,00	0,00	32,0	107%	
Molybdän (Mo)	1,17		1,2	1,26	0,00	0,00	1,3	107%	
Kupfer (Cu)	62,81		62,8	57,74	5,65	0,00	63,4	101%	
Selen (Se)	0,30		0,3	0,17	0,03	0,00	0,2	66%	
Zink (Zn)	148,61		148,6	157,47	17,51	0,00	175,0	118%	
<b>Spurenelemente/Schwermetalle</b>	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	
Arsen (As)	0,61		0,6	0,63	0,14	0,00	0,8	125%	
Blei (Pb)	4,60		4,6	5,25	0,37	0,00	5,6	122%	
Cadmium (Cd)	0,11		0,1	0,02	0,06	0,00	0,1	72%	
Chrom (Cr)	4,22		4,2	4,99	0,44	0,01	5,4	129%	
Nickel (Ni)	2,98		3,0	3,20	0,28	0,02	3,5	118%	
Quecksilber (Hg)	0,07		0,07	0,004	0,014	0,05	0,1	94%	
Thallium (Tl)	0,02		0,0	0,01	0,01	0,00	0,0	65%	
<b>Sonstige Untersuchungsparameter</b>	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	
Chrom VI	0,00		0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	#DIV/0!	
<b>Sonstige Schadstoffe</b>	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	
AOX (Cl)	12,77		12,8	1,84	0,00	0,00	1,8	14%	
PCB	0,01		0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	1%	
PAK (Benzo(a)pyren)	0,01		0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0%	
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	
TE-WHO PCDD/F (2005)	0,50		0,5	0,13	0,00	0,00	0,1	26%	
TE-WHO dl-PCB (2005)	0,77		0,8	0,02	0,00	0,00	0,0	2%	
TE-WHO PCDD/F + dl-PCB (2005)	1,28		1,3	0,15	0,00	0,00	0,1	11%	
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	
Summe PFT (gPFOA+gPFOS)	1010,07		1010,1	0,00	0,00	0,00	0,0	0%	

Die Massenbilanzen zeigen überwiegend gute Wiederfindungsraten bei den meisten Stoffen. Aufgrund der diskontinuierlichen Probenahme und der begrenzten Anzahl an Analysen sind jedoch gewisse Unschärfen unvermeidbar. Die Wiederfindungsraten bei den organischen Schadstoffen sind erwartungsgemäß niedrig, da diese während der Verbrennung zerstört werden. Eine De-Novo-Synthese von PCDD/PCDF konnte nicht festgestellt werden.



**Abbildung 13:** Schematische Darstellung der Massenbilanz von Klärschlamm-Reformer mit Rauchgasreinigung (in kg/h; Summenabweichungen sind den nicht vollständig geschlossenen Bilanzen geschuldet)

### 3.2.2 Energiebilanz

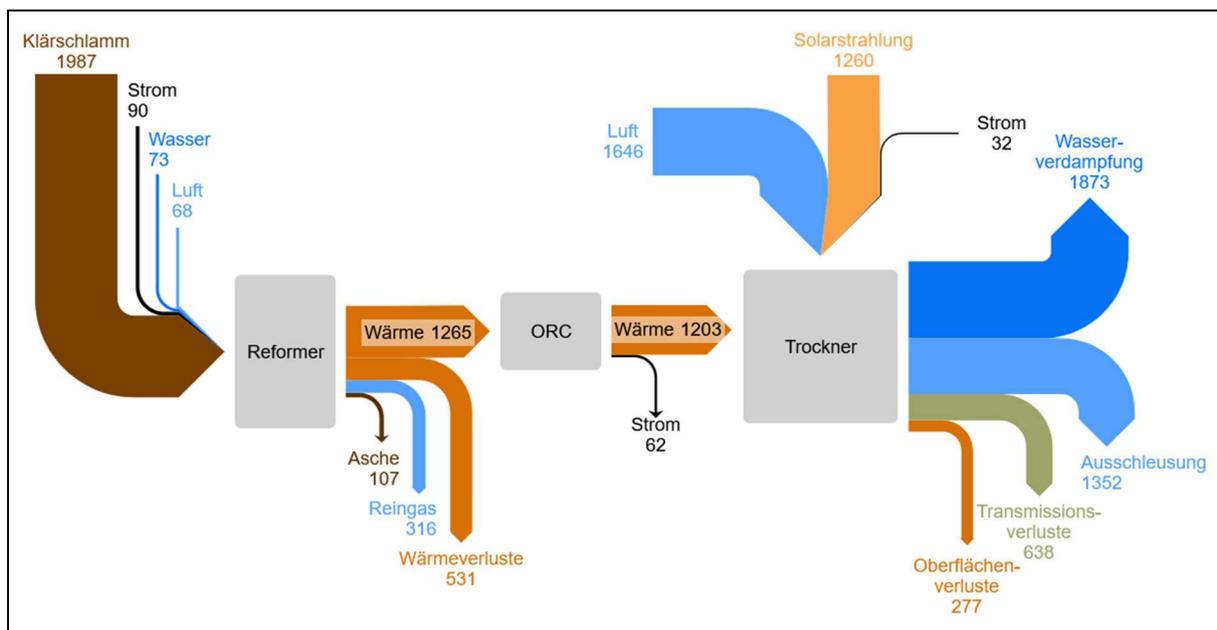
Von der Feuerungsleistung in Höhe von ca. 350 kW werden ca. 224 kW über den Heizkreis zur ORC-Turbine geleitet. Die erzeugte elektrische Nettoleistung beträgt im Durchschnitt ca. 11 kW. Dieser Wert ist von der Außentemperatur abhängig und erhöht sich im Winter auf ca. 14 kW, im Sommer liegt er bei ca. 8 kW. Der elektrische Wirkungsgrad liegt damit in der Praxis bei ca. 5 %.

Die Abwärme aus der ORC-Turbine in Höhe von 213 kW wird in Form von Warmluft in die Trocknungshalle geleitet und dort zur Erhöhung der Trocknungsleistung genutzt.

Die Solarenergie in Form der Solarstrahlung und des Trocknungspotenzials der Umgebungsluft deckt hier die Energielücke, welche bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm aufgrund des negativen Heizwerts des entwässerten Klärschlammes sowie den technischen Wirkungsgraden der Prozesse besteht.

**Tabelle 8:** Energiebilanz

	INPUT				OUTPUT				Summe
									MWh/a
<b>Reformer</b>	<b>Reformer</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	<b>Reformer</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	
		kW	h/a	MWh/a		kW	h/a	MWh/a	
	Klärschlamm getrockn	352	5646	1987	Asche	19	5646	107	
	Verbrennungsluft	12	5646	68	Heizkreis	224	5646	1265	
	elektr. Leistung	16	5646	90	Reingas	56	5646	316	
	Wäscher	13	5646	73	Wärmeverluste	94	5646	531	
<b>Summe Reformer</b>		<b>393</b>	<b>5646</b>	<b>2219</b>		<b>393</b>	<b>5646</b>	<b>2219</b>	<b>0</b>
<b>ORC-Turbine</b>	<b>ORC-Turbine</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	<b>ORC-Turbine</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	
		kW	h/a	MWh/a		kW	h/a	MWh/a	
	Heißwasser	224	5646	1265	Warmluft	213	5646	1203	
					Elektr. Leistung	11	5646	62	
<b>Summe ORC-Turbine</b>		<b>224</b>	<b>5646</b>	<b>1265</b>		<b>224</b>	<b>5646</b>	<b>1265</b>	<b>0</b>
<b>Trockner</b>	<b>Trockner</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	<b>Trockner</b>	<b>Leistung</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Energie</b>	
		kW	h/a	MWh/a		kW	h/a	MWh/a	
	Strahlungsleistung	150	8400	1260	Wasserverdampfung	223	8400	1873	
	Umgebungsluft	196	8400	1646	Transmissionsverluste	76	8400	638	
	Elektr. Leistung	4	8400	32	Oberflächenverluste	33	8400	277	
	Warmluft	213	5646	1203	Ausschleusung	161	8400	1352	
<b>Summe Trockner</b>		<b>493</b>	<b>8400</b>	<b>4141</b>		<b>493</b>	<b>8400</b>	<b>4141</b>	<b>0</b>
<b>Gesamtbilanz</b>				<b>7625</b>				<b>7625</b>	<b>0</b>



**Abbildung 14:** Schematische Darstellung der Jahresenergiebilanz von Klärschlamm-Reformer mit ORC-Turbine und solarthermischem Trockner (in MWh/a)

### 3.3 Emissionsmessungen

Mit den Emissionsmessungen im Abgaskamin der Anlage konnte die Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte gemäß Genehmigung nachgewiesen werden. Die Messungen wurden durch ein akkreditiertes Prüflabor der DEKRA durchgeführt.

Die Anlage wurde während der Messungen bestimmungsgemäß mit maximalem Durchsatz betrieben. Die Messwerte zuzüglich der Messunsicherheit lagen für alle Parameter weit unterhalb der Grenzwerte, für die Schwermetalle sogar unterhalb der Nachweisgrenze.

Die Massenkonzentrationen beziehen sich auf trockenes Abgas im Normzustand und einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 11 Vol.-%.

**Tabelle 9:** Zusammenfassung der emissionstechnischen Daten (DEKRA)

Luftdruck	971	hPa
Mittlerer Sauerstoff-Gehalt	7,4	Vol.-%
Mittlerer Kohlendioxid-Gehalt	11,8	Vol.-%
Mittlere Abgastemperatur	56	°C
Abgasfeuchte (trocken)	119,2	g/m <sup>3</sup>
Abgasfeuchte (feucht)	12,9	Vol.-%
Abgasdichte (Betriebszustand)	1,017	kg/m <sup>3</sup>
Abgasdichte (Normzustand, trocken)	1,349	kg/m <sup>3</sup>
Statischer Druck	-6	Pa
Kanalquerschnitt	0,049	m <sup>2</sup>
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	4,4	m/s
Volumenstrom (Betriebszustand)	782	m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom (Normzustand, feucht)	622	m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom (Normzustand, trocken)	542	m <sup>3</sup> /h

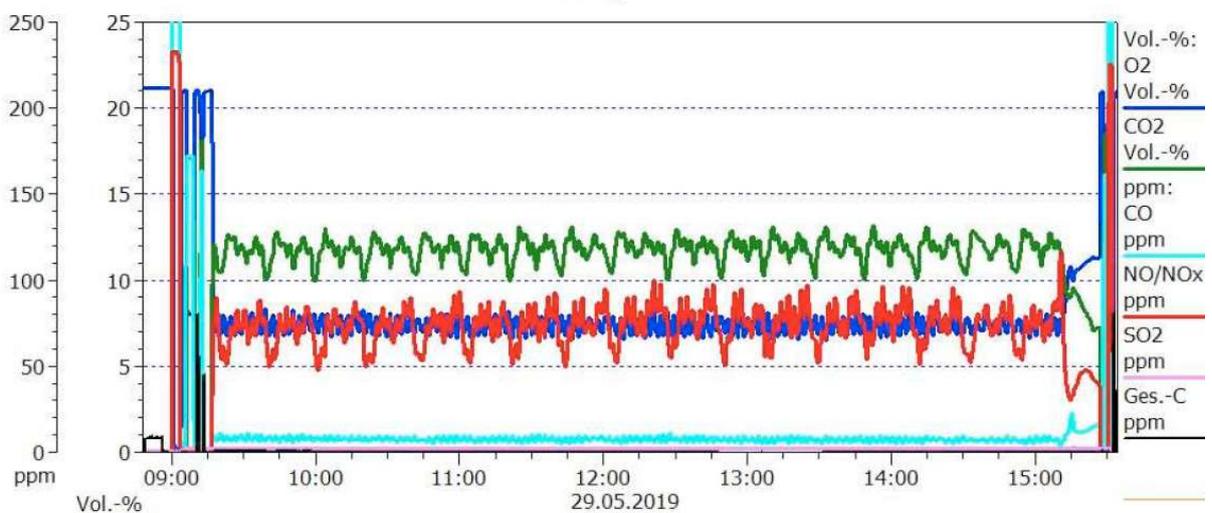
**Tabelle 10:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Emissionsmessungen (DEKRA)

Messkomponente	Max. Messwert abzüglich Messunsicherheit	Max. Messwert zuzüglich Messunsicherheit	Grenzwert		Betriebs- zustand der Anlage
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[kg/h]	[%]
Gesamtstaub	0	1	20	-	100
CO	3	12	100	-	
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	108	120	400	-	
Gesamt-C	0	2	20	-	
HCl	0	1	60	-	
HF	0	0	4	-	
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	0	2	200	-	
NH <sub>3</sub>	0	2	15	-	
Hg	< 0,01	< 0,01	0,05	-	
Σ (Cd, Tl)	< 0,01	< 0,01	0,05	-	
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	< 0,1	< 0,1	0,5	-	
Σ (As, B(a)P, Cd, Co, Cr)	< 0,01	< 0,01	0,05	-	
PCDD/F	< 0,002 ng/m <sup>3</sup>	< 0,002 ng/m <sup>3</sup>	0,1 ng/m <sup>3</sup>	-	

**Tabelle 11:** Ergebnisse der kontinuierlichen Emissionsmessungen (DEKRA)

Messung - Nr.		1	2	3	4	5	6
Start Messung	[hh:mm]	09:17	09:47	10:47	11:49	13:20	14:20
Ende Messung	[hh:mm]	09:47	10:17	11:17	12:19	14:20	14:50
Messdauer	[hh:mm]	00:30	00:30	00:30	00:30	01:00	00:30
Luftdruck	[hPa]	971	971	971	971	971	971
O <sub>2</sub>	[Vol.-%]	7,6	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4
CO <sub>2</sub>	[Vol.-%]	11,6	11,7	11,8	11,9	11,9	11,9
NO <sub>x</sub> ( NO + NO <sub>2</sub> , gerechnet als NO <sub>2</sub> ) - Massenkonzentrationen und Massenströme							
NO <sub>x</sub> - Gehalt	[ppm]	68,7	71,9	73,6	75,7	75,7	74,9
NO <sub>x</sub> - Gehalt	[mg/m <sup>3</sup> ]	140,8	147,4	150,9	155,2	155,2	153,5
NO <sub>x</sub> - Gehalt, *EB	[mg/m <sup>3</sup> ]	104,9	108,8	110,7	113,7	113,7	112,7
Massenstrom	[kg/h]	0,076	0,080	0,082	0,084	0,084	0,083
CO - Massenkonzentrationen und Massenströme							
CO - Gehalt	[ppm]	8,0	7,8	7,5	7,6	7,2	7,1
CO - Gehalt	[mg/m <sup>3</sup> ]	10,0	9,8	9,4	9,5	9,0	8,9
CO-Gehalt, *EB	[mg/m <sup>3</sup> ]	7,5	7,2	6,9	7,0	6,6	6,5
Massenstrom	[kg/h]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Gesamtkohlenstoff - Massenkonzentrationen und Massenströme							
Gesamt - C (Propanäqu.)	[ppm]	0,5	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1
Gesamt - C - Gehalt	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,9	0,6	0,2	0,0	0,0	0,2
Ges.-C-Gehalt, *EB	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1
Massenstrom	[kg/h]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabelle 12:** Verlaufsdiagramm der kontinuierlichen Emissionsmessungen (DEKRA)



Da alle Anlagenteile zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen bestimmungsgemäß und mit maximaler Durchsatzleistung betrieben wurden sowie die ermittelten Emissionswerte in den

für diese Anlagen üblicherweise vorgefundenen Konzentrationsbereichen liegen, können die Messergebnisse als plausibel angesehen werden.

### 3.4 Ascheverwertung und Phosphorrecycling

Aufgrund des hohen Phosphorgehalts der Asche ist ein Recycling der Asche anzustreben. Da sich die Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammverbrennungsaschen derzeit noch im Pilotstadium befinden und noch keine kommerzielle Anlage in Betrieb ist, welche Klärschlammverbrennungsaschen annimmt und aufarbeitet, muss über Alternativen nachgedacht werden, welche eine praktikable Verwertung der Aschen ermöglichen.

#### 3.4.1 Produktqualität

Die Ascheanalysen haben gezeigt, dass die Grenzwerte der Düngemittelverordnung eingehalten werden. Damit kann das Material in der Düngemittelindustrie verwendet oder nach entsprechender Aufmahlung und Granulierung als Düngemittel eingesetzt werden.

Die wertbestimmenden Bestandteile des Klärschlammes bleiben - mit Ausnahme des Stickstoffs - weitgehend erhalten. Insbesondere Phosphor, Kalium und Magnesium finden sich vollständig in der Asche wieder. Vom Schwefel verbleibt etwa die Hälfte in der Asche.

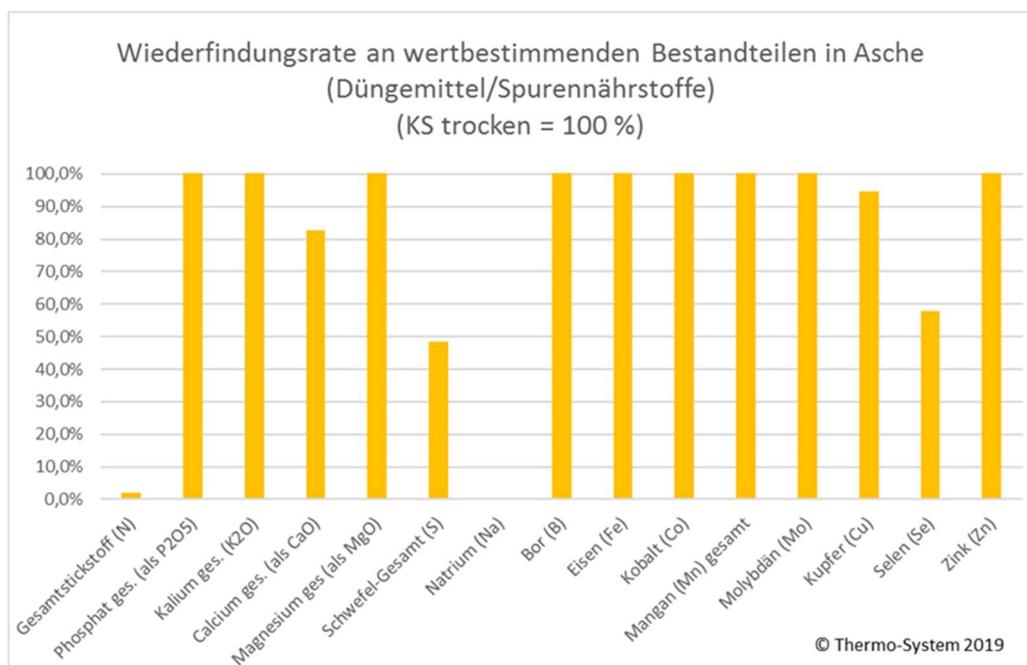


Abbildung 15: Wiederfindungsrate an wertbestimmenden Bestandteilen in der Asche

Bei den Schwermetallen findet eine Abreicherung insbesondere von Quecksilber (-95 %) und Cadmium (-80 %) statt. Die organischen Schadstoffe werden weitgehend zerstört.

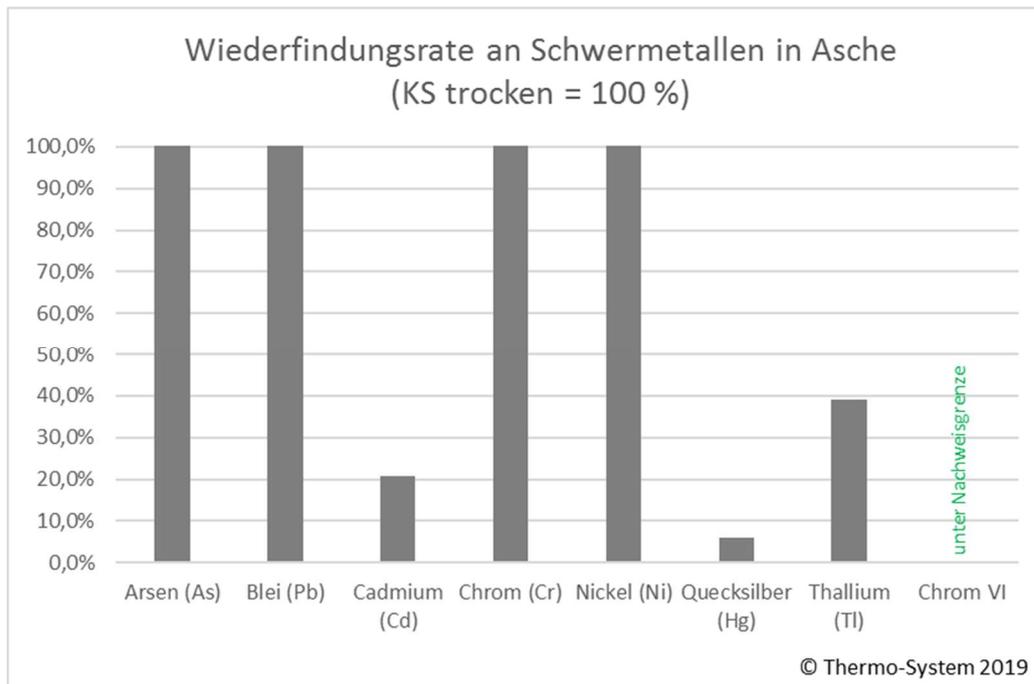


Abbildung 16: Wiederfindungsrate an Schwermetallen in der Asche

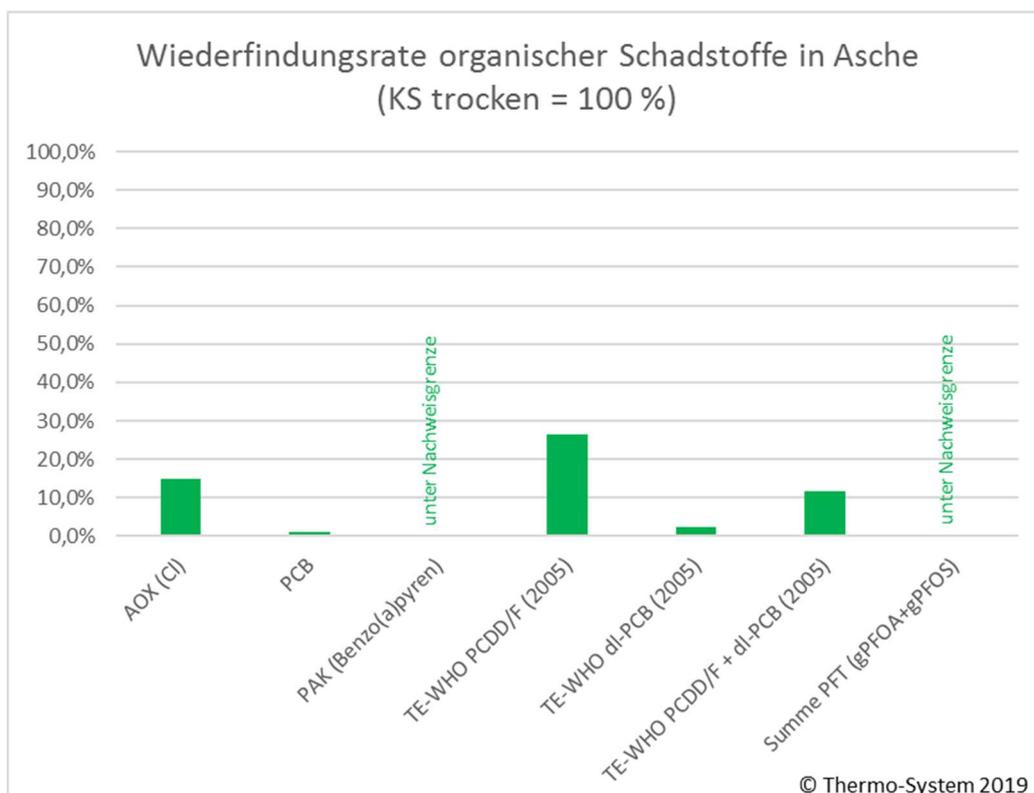
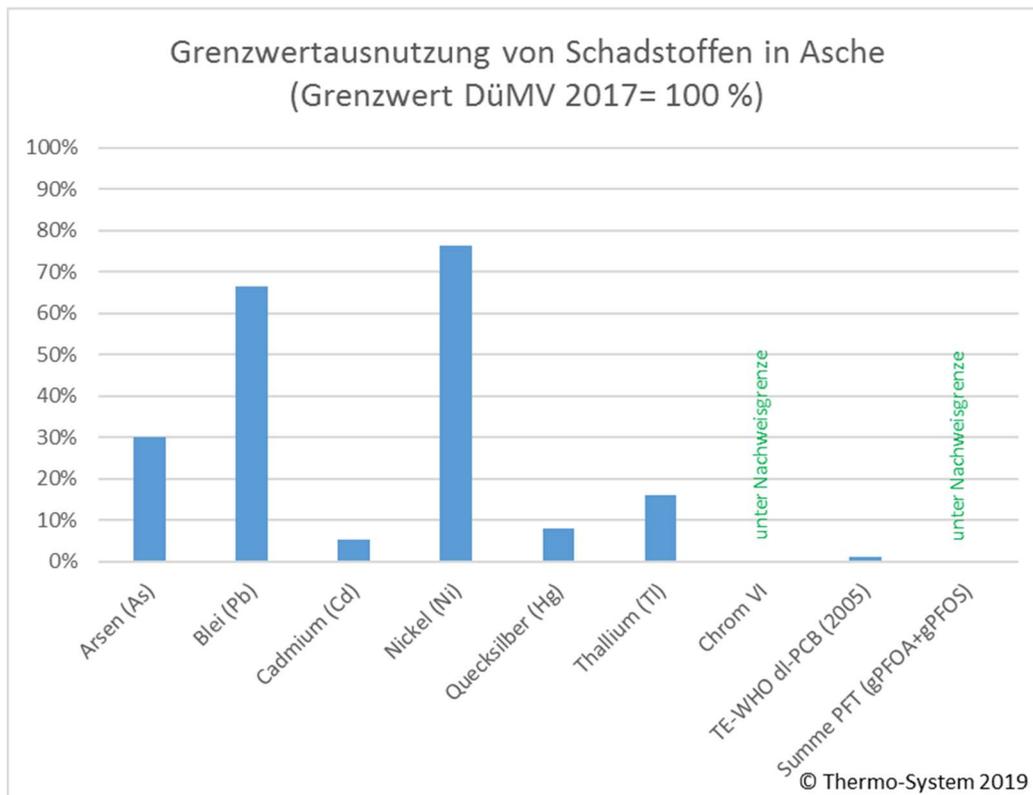


Abbildung 17: Wiederfindungsrate an organischen Schadstoffen in der Asche



**Abbildung 18:** Grenzwertausnutzung von Schadstoffen in der Asche

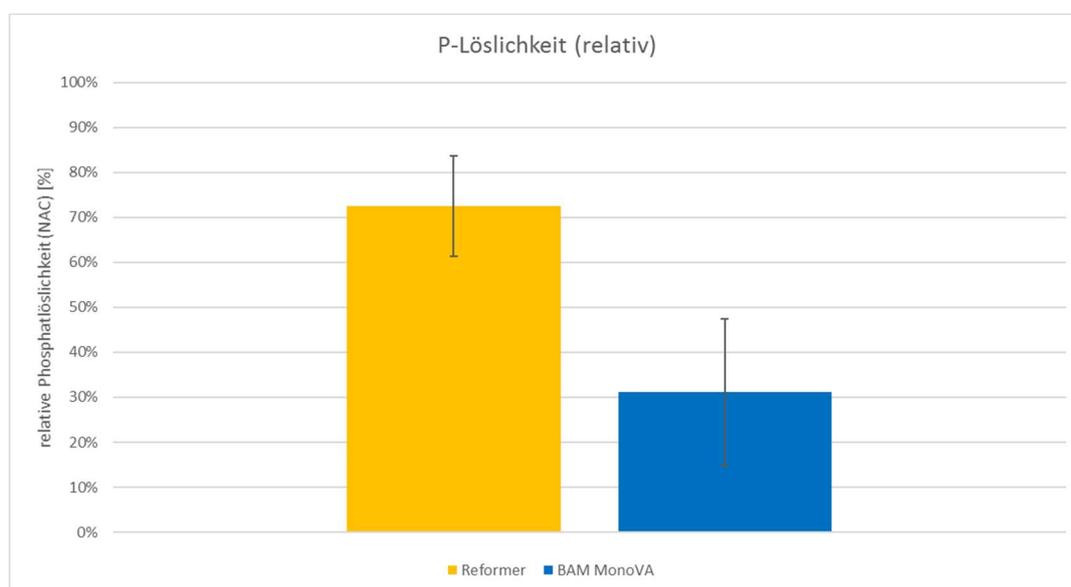
Die Schadstoffgehalte liegen überwiegend weit unter den zulässigen Grenzwerten. Nur Nickel mit einer relativen Grenzwertausnutzung von 75 % und Blei mit 67 % liegen im erhöhten Bereich. Allerdings sind die Nickel- und Blei-gehalte im Klärschlamm über mehrere Analysen hinweg stabil, so dass hier nicht mit einer Grenzwertüberschreitung zu rechnen ist. Da die absoluten Schadstoffgehalte vom jeweiligen Input-Material abhängen, sind die zu verarbeitenden Klärschlämme vorab auf die relevanten Parameter zu untersuchen und die Aschequalität abzuschätzen, um die Konformität mit der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung sicherzustellen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Asche im Vergleich zum Klärschlamm bezüglich des Schadstoffgehalts deutliche Qualitätsverbesserungen aufweist:

- weitgehende Entfernung von Quecksilber (-95 %)
- weitgehende Entfernung von Cadmium (-80 %)
- Zerstörung organischer Schadstoffe

### 3.4.2 Pflanzenverfügbarkeit

Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat ist neben der Bindungsform von zahlreichen Einflussfaktoren wie Pflanzenart, Phosphatgehalt, pH-Wert und organischem Gehalt des Bodens sowie dem Vorhandensein anderer Nährstoffe abhängig. Dementsprechend ist die Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit sehr komplex und immer im Kontext der jeweiligen Untersuchungsbedingungen zu sehen. Zur objektiven Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit wird häufig die Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit (NAC) herangezogen [Schick 2009, Kratz et al. 2010, Zeggel et al. 2015, Duboc et al. 2017]. Daher wurde dieser Parameter zur Bewertung der Phosphatverfügbarkeit gewählt.



**Abbildung 19:** Vergleich der Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeiten (NAC) von Aschen aus dem KlärschlammReformer („Reformer“) sowie von typischen Monoverbrennungsaschen („BAM MonoVA“)

Die Klärschlammverbrennungsaschen aus dem KlärschlammReformer („Reformer“), welche einen mit Eisen(III)-chlorid-Lösung chemisch gefällten Schlamm zum Ursprung haben, weisen Phosphatlöslichkeiten von 60-80 % auf. Die Klärschlammverbrennungsaschen liegen hier in einem Bereich von etwa 30 %, typische Aschen mit durchschnittlichen Phosphatgehalten sogar nur zwischen 20 und 30 % [Krüger und Adam 2014]. Dies kann durch die unterschiedlichen Verfahrensbedingungen der thermischen Behandlung erklärt werden. Die Beobachtungen zur Phosphatlöslichkeit konnten durch weitergehende Laborversuche untermauert werden. Eine weitere Erhöhung der Phosphatlöslichkeit durch Optimierung der Prozessbedingungen ist denkbar.

### 3.4.3 Verwertungswege und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten der Asche

In Deutschland werden lediglich 5 % der Aschen aus der Klärschlammverbrennung als Düngemittel wiederverwertet. Etwa zu jeweils einem Drittel landet die Asche im Bergversatz, wird deponiert oder im Deponie-, Straßen- und Landschaftsbau eingesetzt. Damit ist der enthaltene Phosphor weitgehend verloren und steht für ein Phosphorrecycling nicht mehr zur Verfügung. [Krüger und Adam 2014]

Die Verwendung von Klärschlammverbrennungsasche in der Düngemittelindustrie als Substitut für Rohphosphat stößt grundsätzlich auf Interesse, da insbesondere die Schadstoffkonzentrationen an Cadmium und Uran bei mineralischen Rohphosphaten immer weiter ansteigen, andererseits die Grenzwerte für Düngemittel strenger werden. Aufgrund der niedrigen Uran- und Cadmiumgehalte könnte Klärschlammverbrennungsasche je nach Zusammensetzung als schadstoffarmer Rohstoff zur Verringerung der Schadstoffgehalte beitragen. Allerdings scheinen in der praktischen Umsetzung der Einbindung von Klärschlammverbrennungsaschen derzeit noch technische und betriebliche Herausforderungen zu bestehen, da die Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften der Klärschlammverbrennungsaschen sich von denen des mineralischen Rohphosphats unterscheiden. Es wird daher noch einige Zeit in Anspruch nehmen, bis hier eine gesicherte Verwertung möglich ist. Langfristig ist dieser Weg aber von Interesse und sollte weiterverfolgt werden.

Eine alternative Möglichkeit der Ascheverwertung besteht in der direkten Verwendung als Düngemittel, sofern die Vorgaben der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung eingehalten werden [AbfKlärV 2017, DüMV 2017]. Aufgrund der Zusammensetzung und Herkunft sind hierfür nicht alle Klärschlämme gleichermaßen geeignet, dennoch ist dieser Weg bei schadstoffarmen Klärschlämmen aus kleinen Kläranlagen (< 50.000 EW) grundsätzlich möglich.

Wie zuvor dargelegt, eignen sich die Aschen aus dem KlärschlammReformer in Renningen aufgrund der Schadstoffabreicherung bei gleichzeitig hoher P-Verfügbarkeit für eine direkte Nutzung als Düngemittel. Die Grenzwerte der Düngemittelverordnung werden eingehalten. Neben der Einhaltung der Grenzwerte ist darüber hinaus noch eine Aufmahlung und Granulierung der Asche erforderlich [DüMV 2017]. Die so aufbereitete Asche ist direkt als Düngemittel einsetzbar.



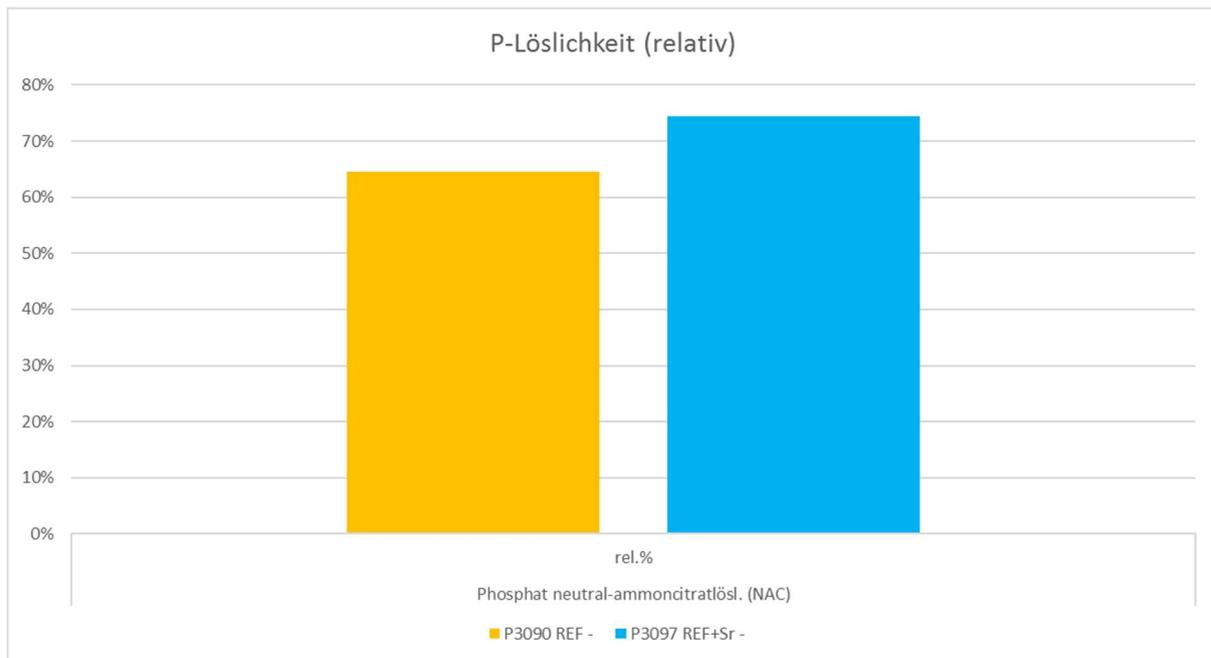
**Abbildung 20:** Klärschlamm-Reformer-Asche in granulierter Form

Allerdings sind zur Mahlung und Granulierung spezielle Maschinen erforderlich, welche typischerweise im industriellen Maßstab zur Verarbeitung von mehreren Tonnen pro Stunde eingesetzt werden. Eine Anwendung im kleinen Maßstab, wie sie für die Durchsätze des Reformers benötigt würde, ist derzeit nicht am Markt verfügbar. Es muss daher auf entsprechende Dienstleister zurückgegriffen werden.

Aufgrund des Entfalls der Notwendigkeit zur Anwendung spezieller nachgeschalteter Phosphor-Rückgewinnungsverfahren bietet die direkte Nutzung erhebliche wirtschaftliche Vorteile.

#### **3.4.4 Direkte Nutzung des Reformerprodukts nach einem Teilaufschluß mit Säure und Aufbereitung/Granulierung**

Die Vorbehandlung der Asche durch einen Teilaufschluss mit Phosphorsäure hat gezeigt, dass die P-Verfügbarkeit um ca. 10 %-Punkte gesteigert werden kann. Allerdings ist dies vermutlich größtenteils auf den zusätzlichen Phosphor der Phosphorsäure zurückzuführen, so dass die absolute Erhöhung der P-Verfügbarkeit des aschezugehörigen Phosphors vernachlässigbar ist.



**Abbildung 21:** Vergleich der P-Löslichkeiten (NAC) ohne und mit Säureteilaufschluß

Der technische und betriebliche Aufwand des Säurehandlings wäre hingegen erheblich und würde die Komplexität des Verfahrens deutlich erhöhen.

Ein Säureteilaufschluss vor Ort ist daher nicht sinnvoll.

### 3.4.5 Abgabe des Reformersprodukts an einen Düngemittelaufbereiter zur Nutzung und/oder Schwermetallanreicherung

Die Abgabe des Reformersprodukts an einen Düngemittelaufbereiter ist eine Alternative zur direkten Nutzung. Die Düngemittelhersteller interessieren sich grundsätzlich sehr für alternative Phosphatrohstoffe, die insbesondere die Schadstoffkonzentrationen (Cadmium/Uran) bei mineralischen Rohphosphaten immer weiter ansteigen, andererseits die Grenzwerte für Düngemittel strenger werden. Aufgrund der niedrigen Uran- und Cadmiumgehalte ist Klärschlammverbrennungsasche als Rohstoff grundsätzlich interessant.

Es wurden mehrere Versuche bei Düngemittelherstellern durchgeführt. Gemäß Rückmeldung der Düngemittelhersteller bestehen jedoch derzeit noch Schwierigkeiten bei der Einbindung der Materialien in die Prozesskette und die bestehenden Produktlinien, da die Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften der Klärschlammverbrennungsaschen sich von denen des mineralischen Rohphosphats unterscheiden. Aufgrund der derzeit noch kleinen Mengen an geeigneten Klärschlammverbrennungsaschen ist die Motivation der Düngemittelhersteller bisher noch gering, hier eine schnelle Lösung zu finden.

Die Düngemittelhersteller arbeiten an Möglichkeiten zur Nutzung der Recyclingphosphate, allerdings wird es noch einige Zeit in Anspruch nehmen, bis hier eine gesicherte Abnahme möglich ist. Langfristig ist dieser Weg aber sicherlich interessant.

### **3.4.6 Zwischenlagerung des Reformerprodukts bis zu einer späteren Aufbereitung in Eigenregie oder durch einen Dritten**

Die Zwischenlagerung des Reformerprodukts bis zu einer späteren Aufbereitung kann grundsätzlich sinnvoll sein, um die für eine Verarbeitung in industriellem Maßstab erforderlichen Mengen anzusammeln. Gleichzeitig steigt aufgrund der derzeitigen Marktaktivitäten mit zunehmender Lagerdauer die Zahl der möglichen Verarbeitungsoptionen. Es ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren mehrere P-Recycling-Anlagen gebaut werden.

Die Lagerung der Asche muss wettergeschützt in geeigneten Lagerhallen erfolgen. Ob sich eine solche Lagerung wirtschaftlich darstellen lässt, hängt von den später zu erzielenden Abgabepreisen ab und kann daher heute noch nicht beantwortet werden.

## **3.5 Umweltbilanz**

Gegenüber einer Verbrennung des maschinell entwässerten Klärschlammes ergibt sich mit der Anlage eine deutlich verbesserte Umweltbilanz:

### **1. Einsparung von LKW-Transporten:**

Pro Jahr kann mit der solaren Trocknung und dezentralen thermischen Behandlung eine Massenreduktion von etwa 1.600 t erreicht werden. Dies entspricht ca. 64 LKW-Transporten. Bei einer durchschnittlichen einfachen Transportentfernung von 400 km ergibt sich eine Einsparung von rund 50.000 LKW-Kilometern pro Jahr.

### **2. CO<sub>2</sub>-Einsparung:**

Die Einsparung von LKW-Transporten führt zu einer CO<sub>2</sub>-Einsparung in Höhe von ca. 130 t CO<sub>2</sub>/a (104 g CO<sub>2</sub>/tkm).

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der zentralen thermischen Behandlung entwässerter Schlämme hängen sehr stark vom Verwertungsverfahren bzw. der Kraftwerkstechnologie ab. Dieser Anteil kann daher hier nicht beziffert werden.

### 3. Phosphorrückgewinnung:

Gegenüber der derzeit üblicherweise praktizierten Mitverbrennung von Klärschlämmen, bei der der enthaltene Phosphor unwiederbringlich verloren geht, wird bei der dezentralen thermischen Behandlung eine unverdünnte Asche mit einem Phosphatgehalt von 15-20 % erzeugt. Im vorliegenden Fall werden bei einer Düngennutzung der Asche mit einem Phosphatgehalt von 16,9 % in der Asche jährlich ca. 40 - 60 t Phosphat zurückgewonnen. Dies entspricht dem durchschnittlichen mineralischen Phosphatdüngerverbrauch in Deutschland von ca. 17.000 Menschen. Aufgrund des speziellen Verfahrenskonzepts mit einer kontrollierten mehrstufigen Prozessführung in Bezug auf Temperatur und Sauerstoffverfügbarkeit besitzt die Asche aus dem Klärschlamm-Reformer eine deutlich höhere Phosphatverfügbarkeit im Vergleich zu herkömmlichen Klärschlammverbrennungsanlagen.

### 4. Schadstoffbelastung:

Die phosphorhaltige Asche weist ggf. eine geringere Schadstoffbelastung auf als ein mineralischer Phosphatdünger, insbesondere bezüglich Uran und Cadmium. Organische Schadstoffe werden im Prozess zerstört. Gegenüber der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm wird der Eintrag organischer Schadstoffe sowie der von Quecksilber, Cadmium und Arsen erheblich reduziert. Die Abgasemissionen liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte der 17. BImSchV und tragen zusammen mit den vermiedenen Transportemissionen somit zu einer Reduzierung der Schadstoffbelastung im Vergleich zur Klärschlammbehandlung in zentralen Klärschlammverbrennungs- bzw. Klärschlammmitverbrennungsanlagen bei.

### 3.6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Investitionskosten der Anlage lagen innerhalb des prognostizierten Rahmens. Bei den dargestellten Kosten sind rechnerisch noch die Investkosten des Solartrockners enthalten, obwohl dieser bereits abgeschrieben ist. Die tatsächlichen Kosten für die Kommune liegen daher entsprechend niedriger.

Die prognostizierten Durchsatzmengen konnten erreicht werden und die Schadstoffgehalte der Asche entsprechen den Anforderungen der Düngemittelverordnung. Damit sind 2 wichtige Voraussetzungen für eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gegeben.

Die geänderten Rahmenbedingungen durch die novellierte Klärschlammverordnung und die Düngemittelverordnung sowie der Wegfall von Mitverbrennungskapazitäten durch Kraftwerksstilllegungen haben innerhalb der Projektlaufzeit zu einer erheblichen Steigerung der Entsorgungspreise für Klärschlämme geführt. Bei derzeit neu abgeschlossenen Verträgen sind Entsorgungspreise zwischen 100 und 180 € pro t Klärschlamm am Markt üblich, teilweise werden aufgrund mangelnder Kapazitäten gar keine Angebote abgegeben. Auf diesem Hintergrund wirkt sich die dezentrale thermische Behandlung äußerst positiv aus, da die Abhängigkeit vom Klärschlamm Entsorgungsmarkt entfällt.

Die Betriebskosten liegen zum Teil über den prognostizierten Werten, da es teilweise zu Preissteigerungen bei Entsorgungskosten gekommen ist. Auch der Nettoertrag des produzierten Eigenstroms liegt unter den erwarteten Werten. Die gestiegenen Klärschlamm Entsorgungskosten können die Kostensteigerungen aber kompensieren. Möglicherweise können hier durch einen optimierten Einkauf zukünftig noch Einsparungen realisiert werden.

Die Kosten pro Tonne Originalsubstanz an Eigenschlamm betragen für Trocknung und thermische Behandlung demnach derzeit 106 € incl. MwSt.

Mögliche Zusatzerlöse durch eine spätere Vermarktung der Asche als Düngemittel können die Kosten ggf. noch weiter reduzieren.

**Tabelle 13:** Wirtschaftlichkeitsrechnung

		direkte Entsorgung	Solartrocknung + Reformer
<b>FINANZIERUNGSKOSTEN</b>			
Annuität Technik	€/a		86.132
Annuität Bauwerke	€/a		15.100
Finanzierungskosten gesamt	€/a		101.232
<b>VARIABLE KOSTEN</b>			
Summe Variable Kosten	€/a	144.000	118.664
<b>BEHANDLUNGSKOSTEN</b>			
Behandlungskosten	€/a	144.000	219.896
Behandlungskosten spezifisch (ohne Erträge Fremdschlammannahme)	€/tOS	120	99
Behandlungskosten spezifisch (ohne Erträge Fremdschlammannahme)	€/tTR	545	336
<b>ERTRÄGE</b>			
Erträge gesamt (Fremdschlammannahme)	€/a		92.160
<b>GESAMTKOSTEN</b>			
Gesamtkosten	€/a	144.000	127.736
	€/t OS Eigenschl.	120	106

### 3.7 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

In der Größenordnung des vorliegenden Projekts von ca. 700 tTR/a gibt es derzeit kein konventionelles Verfahren am Markt, welches als technologische Alternative dieselben Ergebnisse liefert.

Im Bereich der Pyrolyse- oder Vergasungsanlagen gibt es vereinzelt Anbieter auch im kleineren Leistungsbereich. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass bei diesen Technologien keine vollständige Verbrennung erfolgt und daher die „Asche“ einen sehr hohen Restkohlenstoffgehalt besitzt (daher oft „Kohle“ genannt), welcher einerseits die Energiebilanz verschlechtert und andererseits eine Nutzung als Düngemittel nach der Düngemittelverordnung verhindert.

Thermische Behandlungsanlagen für Klärschlamm sind am Markt ab einer Größenordnung von etwa 2.000 - 10.000 tTR/a verfügbar. Meist handelt es sich hier um Wirbelschichtverbrennungsanlagen. Einzelne Hersteller versuchen derzeit, kleinere Anlagengrößen zu entwickeln. Der verfahrenstechnische Aufwand bei Wirbelschichtverbrennungsanlagen ist jedoch erheblich, weshalb ein weiteres Downscaling an wirtschaftliche Grenzen stößt.

Im Bereich der Trocknung kommen als Alternative zur Solartrocknung grundsätzlich Bandtrockner in Frage. Diese zeichnen sich durch einen geringeren Flächenbedarf aus, haben aber einen höheren elektrischen Energiebedarf und benötigen in der Regel eine aufwändige Abluftreinigung. Bei kleinen Anlagen und niedrig entwässerten oder ausgefaulten Schlämmen reicht die eigene Energiebereitstellung in der Regel nicht aus, um den Trockner mit Hilfe von Verbrennungsabwärme ohne Zufeuerung thermisch autark zu betreiben. Beim Solartrockner wird diese Energielücke mittels Solarenergie gedeckt.

Bezüglich der Phosphatverfügbarkeit weist das KlärschlammReformer-Verfahren einen erheblichen Vorteil auf. Bei Asche aus dem KlärschlammReformer konnte eine Neutral-Ammonicitrat-Löslichkeit zwischen 60 und 80 % nachgewiesen werden. Die Löslichkeit typischer Klärschlammverbrennungsanlagen hingegen liegt bei nur ca. 30 % (Krüger und Adam, 2014).

Dies bedeutet, dass sich die Asche aus dem KlärschlammReformer grundsätzlich für eine direkte Nutzung als Düngemittel eignet, sofern eine Mahlung/Granulierung erfolgt.

## **4 Übertragbarkeit**

### **4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung**

Die Umsetzung des Projekts war eine große Herausforderung für alle Beteiligten, die jedoch aufgrund der ausgezeichneten Kooperation von Kommune, Behörden und Anlagenhersteller dennoch gut gemeistert werden konnte. Die größte Hürde war sowohl in technischer als auch terminlicher Hinsicht die Tatsache, dass für das genannte Vorhaben aufgrund des innovativen technologischen Ansatzes nur auf sehr wenige Standardkomponenten und -lösungen zurückgegriffen werden konnte, da es bisher keine vergleichbaren Anlagen in dieser Größenklasse am Markt gibt. Viele Anlagenteile mussten individuell entwickelt, gefertigt und optimiert werden. Die Verzögerungen im Projektablauf wurden daher von allen Beteiligten bewusst in Kauf genommen, um Qualitätsprobleme durch „Schnellschüsse“ zu vermeiden. Diese Strategie hat sich insofern ausgezahlt, als die Anlage trotz des innovativen Charakters sehr stabil läuft und bisher sehr selten unplanmäßig abgefahren werden musste.

Die Verwertung der Reststoffe bzw. Vermarktung der Asche wird einer weiteren Optimierung bedürfen. Die Identifikation und praktische Umsetzung möglicher Verwertungswege und Produktvarianten bietet sicherlich ein weites Feld, welches zukünftig bearbeitet werden kann. Wirtschaftliche Voraussetzung für den Zugang zu bestimmten Verwertungsoptionen ist hier

häufig das Vorhandensein größerer Aschemengen, welche sich erst nach längerer Betriebszeit oder in Kooperation mehrerer Anlagen ergeben.

## **4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit**

Die Novellierung der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung hat den Rahmen für eine Verbreitung von thermischen Klärschlammbehandlungsanlagen geschaffen. Die Ziele einer Vermeidung von unkontrollierten Schadstoffeinträgen durch Klärschlamm in die Böden und die Sicherstellung der Rückgewinnbarkeit des Phosphors als Düngemittel bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Verkehrsbelastung werden durch das untersuchte Verfahren in vorbildlicher Weise erfüllt. Das Problem der schwierigen Standortsuche, dem erhöhten Verkehrsaufkommen, der langen Planungs- und Genehmigungszeiträume sowie der Akzeptanz zentraler Klärschlammbehandlungsanlagen stellt sich hier in der Regel nicht, da eine dezentrale thermische Behandlung eigener Schlämme als integraler Bestandteil der Abwasserreinigung angesehen werden kann und dementsprechend auf eine hohe Akzeptanz bei der Bevölkerung trifft.

Das Anlagenkonzept hat Modellcharakter für alle Klärwerke im Bereich zwischen 25.000 und 100.000 EW und bietet damit einen Ansatz für Kläranlagen in einer Größenklasse, für die bisher keine Technologie zu einer eigenen thermischen Klärschlammbehandlung verfügbar war. Es wird im Einzelfall zu prüfen sein, inwieweit unter den jeweiligen Rahmenbedingungen der Einsatz der Technologie technisch möglich und wirtschaftlich oder politisch sinnvoll ist.

## **5 Zusammenfassung/Summary**

### **5.1 Zusammenfassung**

#### **5.1.1 Einleitung**

Die Rahmenbedingungen für die Klärschlammverwertung haben sich in den vergangenen Jahren grundlegend verändert. Während noch vor 20 Jahren die direkte bodenbezogene Verwertung überwog, wurde diese Praxis aufgrund der damit verbundenen Risiken für Mensch und Natur immer weiter zurückgedrängt. Heute werden die meisten Schlämme thermisch behandelt, wobei in Deutschland noch große regionale Unterschiede bestehen. Die häufig praktizierte Mitverbrennung hat einen entscheidenden Nachteil im Verlust des Phosphors, der in Mischaschen aufgrund niedriger Konzentration nicht weiter genutzt werden kann oder bei der Verwertung im Zementwerk verloren geht. Da Phosphor einerseits eine kritische Ressource darstellt, andererseits im Klärschlamm in erheblichen Mengen vorhanden ist, sollten Wege gefunden werden, wie dieser Phosphor wieder dem Kreislauf zugeführt werden kann.

#### **5.1.2 Vorhabenumsetzung**

Bereits 2004 hat sich die Stadt Renningen mit der Optimierung der Klärschlammverwertung befasst und ist mit dem Bau einer solaren Klärschlamm-trocknungsanlage einen ersten Schritt in Richtung Massenreduktion und Vorbehandlung für die thermische Behandlung gegangen. Nach mehrjähriger Vorarbeit wurde 2015 der Beschluss zum Bau einer dezentralen thermischen Behandlungsanlage auf der Kläranlage Renningen gefasst. Maßgebliche Entscheidungshilfe war hier die Fördermittelzusage aus dem Umweltinnovationsprogramm. Die thermische Behandlungsanlage besteht aus einem Klärschlamm-Reformer der Fa. Thermo-System mit 3-stufiger Rauchgasreinigung, Wärmerückgewinnung und -nutzung im Solartrockner sowie einer Stromerzeugung über ein ORC-Modul.

#### **5.1.3 Ergebnisse**

Mit der dezentralen Solartrocknung und thermischen Behandlung ist es gelungen, eine Massenreduktion um 80 - 90 % zu erreichen und damit die Transporte um ca. 50.000 LKW-Kilometer pro Jahr zu verringern. Das Phosphat aus dem Klärschlamm findet sich in aufkonzentrierter Form mit einem Gehalt von 15 - 20 % in der Asche wieder. Die organischen Schadstoffe werden zerstört, Quecksilber und Cadmium werden im Prozess nahezu vollständig entfernt. Die Grenzwerte der Düngemittelverordnung werden unter bestimmten Voraussetzungen der Qualität des eingesetzten Klärschlamm eingehalten und zum Teil weit

unterschritten. Die Asche weist eine vergleichsweise hohe Phosphatlöslichkeit von 60-80 % auf. Dementsprechend kann die Asche direkt zur Düngemittelherstellung verwendet werden. Die Wärme aus dem Prozess wird über eine ORC-Turbine zur Stromerzeugung und anschließend zur Klärschlamm-trocknung genutzt, um sowohl einen Teil des elektrischen Energiebedarfs als auch den Wärmebedarf der Reformieranlage vollständig zu decken.

#### **5.1.4 Ausblick**

Mit dem in Renningen realisierten Anlagenkonzept steht eine umweltfreundliche dezentrale Technologie zur Verfügung, mit der eine thermische Behandlung von Klärschlamm unter Schadstoffabreicherung und Nutzbarmachung des Phosphats zur direkten Düngemittelnutzung oder als Vorprodukt für die Düngemittelherstellung auf Kläranlagen zwischen 25.000 und 100.000 EW möglich ist. Eine Übertragung des Konzepts auf andere Standorte ist möglich. Hierzu sollte in erster Linie die Eignung des zu behandelnden Klärschlammes untersucht werden. Eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik in Richtung einer gezielten Schadstoffabreicherung auch für höher belastete Klärschlämme kann für die Zukunft von Interesse sein.

## **5.2 Summary**

### **5.2.1 Introduction**

The conditions for the utilization of sewage sludge have changed fundamentally in recent years. While direct agricultural exploitation prevailed 20 years ago, this practice has been pushed back due to associated risks to humans and nature. Today, most of the sludge in Germany is incinerated, although there are still large regional differences. The frequently practised co-incineration has a decisive disadvantage in the loss of phosphorus. Since phosphorus is a critical resource and sewage sludge is containing significant quantities of phosphorous, ways should be found to re-inject this phosphorus into the cycle.

### **5.2.2 Project implementation**

In 2004, the city of Renningen dealt with the optimisation of sewage sludge utilisation and took a first step towards mass reduction and pre-treatment for thermal utilisation with the construction of a solar sludge drying plant. After several years of preparatory work, the decision was taken in 2015 to build a decentralised thermal recycling plant at the Renningen

sewage treatment plant. The decision-making aid was the funding commitment from the Umweltinnovationsprogramm.

The thermal recycling plant consists of a Thermo-System solar dryer and SludgeReformer with 3-stage flue gas cleaning, heat recovery and electricity generation by means of an ORC module.

### **5.2.3 Project results**

With the implemented technology, a mass reduction of 80 to 90% is achieved, thus reducing transport by about 50,000 truck kilometers per year. The phosphate from the sewage sludge is found in concentrated form with a content of 15-20 % in the ash. The organic pollutants are destroyed, mercury and cadmium are almost completely removed in the process. The legal limit values are complied with or fell far short. The ash has a comparatively high phosphate solubility of 60-80 %. Accordingly, the ash can be used directly for fertilizer production.

The heat from the process is used via an ORC turbine for electrical power generation and then for sewage sludge drying, whereby half of the electrical energy demand of the plant and the full heat requirement can be covered.

### **5.2.4 Prospects**

With the plant concept implemented in Renningen, an environmentally friendly decentralised technology is available, which enables the thermal valorization of sewage sludge with pollutant removal and recovery of phosphate for fertilizer use at sewage treatment plants between 25,000 and 100,000 PE. A transfer of the concept to other sites is possible. For this purpose, the suitability of the sewage sludge to be treated should be investigated first. Further development of the plant technology towards a targeted removal of pollutants, even for sewage sludge with a higher contamination level, may be of interest for the future.

## 6 Literatur

- ANONYM: Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017 (AbfKlärV). Bundesgesetzblatt 2017.
- ANONYM: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln vom 26.05.2017 (DüMV). Bundesgesetzblatt 2017.
- BUX, M. u. BAUMANN, R.: Wirtschaftlichkeit und CO<sub>2</sub>-Bilanz der solaren Trocknung von mechanisch entwässertem Klärschlamm. KA Abwasser 2003, 50 (9), 1169–1177.
- DUBOC, O.; SANTNER, J.; GOLESTANI FARD, A.; ZEHETNER, F.; TACCONI, J.; WENZEL, W.W.: Predicting phosphorous availability from chemically diverse conventional and recycling fertilizers. Science of the Total Environment 599/600, 2017. S. 1160-1170
- KRATZ, S.; HANEKLAUS, S.; SCHNUG, E.: Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research 60, 2010, S. 227-240
- KRÜGER, O. u. ADAM, C.: Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsmaschinen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Umweltbundesamt Texte 49/2014.
- RÖMER, W.: Phosphordüngewirkung neuer Phosphatrecyclingprodukte. Berichte über die Landwirtschaft, Bd. 91, Heft 1, Mai 2013.
- SCHICK, J.: Untersuchungen zu P-Düngewirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelte Klärschlammaschen. Ph.D. dissertation, Technical University Braunschweig, 2009
- ZEGGEL, L.; RIEDEL, H.; MARB, C.: Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen - Abschlussbericht. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, 2015

# 7 Anhang

## 7.1 Abkürzungsverzeichnis

AbfPhosV	Phosphatrückgewinnungsverordnung
ASN	Abfallschlüsselnummer
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
EW	Einwohnerwerte
ORC	Organic Rankine Cycle
OS	Originalsubstanz
PE	people equivalent
TE	Toxizitätsequivalent
TR	Trockenrückstandsgehalt
TS	Trockensubstanzgehalt
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UIP	Umweltinnovationsprogramm
VNC	Virtual Network Client

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept der Klärschlammverwertungsanlage bestehend aus Solarer Trocknung und KLÄRSCHLAMMREFORMER .....	12
Abbildung 2: Solare Klärschlamm-trocknungsanlage Renningen .....	13
Abbildung 3: Solare Klärschlamm-trocknung mit ELEKTRISCHEM SCHWEIN .....	13
Abbildung 4: Verfahrensschema des KLÄRSCHLAMMREFORMERS .....	15
Abbildung 5: KLÄRSCHLAMMREFORMER-Halle mit Annahmehunker, Rauchgasreinigung und BigBag-Befüllstation .....	15
Abbildung 6: Außenansicht KLÄRSCHLAMMREFORMER-Halle .....	16
Abbildung 7: KLÄRSCHLAMMREFORMER mit Rauchgasreinigung.....	16
Abbildung 8: Kläranlage Renningen mit Solarer Trocknung vor Bau des KLÄRSCHLAMMREFORMERS (2014) [Quelle: Google] .....	17
Abbildung 9: Kläranlage Renningen mit KLÄRSCHLAMMREFORMER (2018) [Quelle: Google].....	18
Abbildung 10: Übersichtsseite der Visualisierungssoftware .....	25
Abbildung 11: Beispielhafte Trendlinie zur Darstellung von Messdaten.....	26
Abbildung 12: Übersicht zur Anzeige von Betriebs- und Störmeldungen .....	26
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Massenbilanz von KlärschlammReformer mit Rauchgasreinigung.....	32
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Jahresenergiebilanz von KlärschlammReformer mit ORC-Turbine und solarthermischem Trockner .....	33
Abbildung 15: Wiederfindungsrate an wertbestimmenden Bestandteilen in der Asche .....	37
Abbildung 16: Wiederfindungsrate an Schwermetallen in der Asche.....	38
Abbildung 17: Wiederfindungsrate an organischen Schadstoffen in der Asche .....	38
Abbildung 18: Grenzwertausnutzung von Schadstoffen in der Asche .....	39
Abbildung 19: Vergleich der Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeiten (NAC) von Aschen aus dem KlärschlammReformer („Reformer“) sowie von typischen Monoverbrennungsaschen („BAM MonoVA“).....	40
Abbildung 20: KlärschlammReformer-Asche in granulierter Form .....	42
Abbildung 21: Vergleich der P-Löslichkeiten (NAC) ohne und mit Säureteilaufschluß .....	43

### 7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Daten der Solaren Trocknungsanlage.....	14
Tabelle 2:	Technische Daten der KLÄRSCHLAMMREFORMER-Anlage .....	17
Tabelle 3:	Schadstoffgrenzwerte des Klärschlamm zur thermischen Behandlung .....	21
Tabelle 4:	Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 1) .....	22
Tabelle 5:	Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 2) .....	23
Tabelle 6:	Emissionsgrenzwerte im Reingas der thermischen Behandlung (Teil 3) .....	24
Tabelle 7:	Massenbilanzen .....	31
Tabelle 8:	Energiebilanz.....	33
Tabelle 9:	Zusammenfassung der emissionstechnischen Daten (DEKRA) .....	34
Tabelle 10:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Emissionsmessungen (DEKRA) .....	35
Tabelle 11:	Ergebnisse der kontinuierlichen Emissionsmessungen (DEKRA) .....	36
Tabelle 12:	Verlaufdiagramm der kontinuierlichen Emissionsmessungen (DEKRA) .....	36
Tabelle 13:	Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	47