BORN | ERMEL | Ingenieure

Thermische Verfahren der Klärschlammbehandlung

DPP Forum 2018 Frankfurt/Main

Jörn Franck

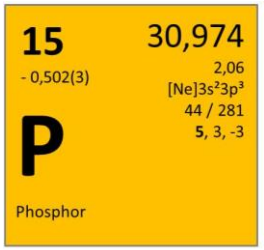
19. September 2018

Inhalt

- **Einführung und Rahmenbedingungen**
- Technologien der thermischen Klärschlammverwertung
- Zwei Praxisbeispiele
- Zusammenfassung und Ausblick

Worum es geht…

- **Phosphor-Recycling**
  - Vorgaben gemäß AbfKlärV
  - Klärschlämme höherwertig verwerten soweit technisch und wirtschaftlich möglich
  - Rückführung der Rezyklate in den Wirtschaftskreislauf



- **Umweltaspekte**
  - Überdüngung (Nitrat im Grundwasser)
  - Schwermetalle
  - persistente organische Verbindungen und/oder andere Schadstoffe (Mikroplastik)

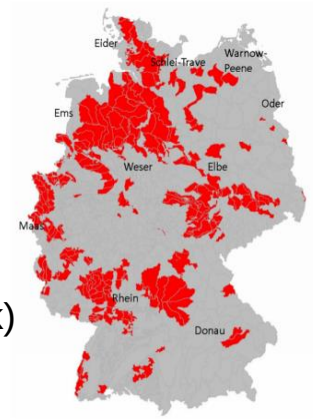


Abbildung 1. Grundwasserkörper in Deutschland, die den guten chemischen Zustand aufgrund zu hoher Nitratkonzentrationen (> 50 mg/l) verfehlen (SRU, 2015)

- **Hygieneaspekte**
  - Medikamentenreste (KA und/oder Massentierhaltung)
  - resistente Bakterienstämme
  - Aufnahme über Umwelt/Nahrungsmittel

Süddeutsche Zeitung
SZ.de Zeitung Magazin

6. Februar 2018, 08:34 Uhr Multiresistete Keime

Krankheitserreger am Badestrand

In Flüssen und Seen wurden antibiotikaresistente Keime nachgewiesen. (Foto: Daniel Karmann/dpa)

- Biologen haben in verschiedenen Flüssen und Seen Keime entdeckt, die gegen mehrere Antibiotika resistent sind, auch gegen besonders starke.
- Die Ursache dafür liegt möglicherweise in der Tiermedizin.
- Das Bundesinstitut für Risikobewertung empfiehlt, Konsequenzen daraus zu ziehen.

Worum es geht…

275.000 Landwirtschaftliche Betriebe

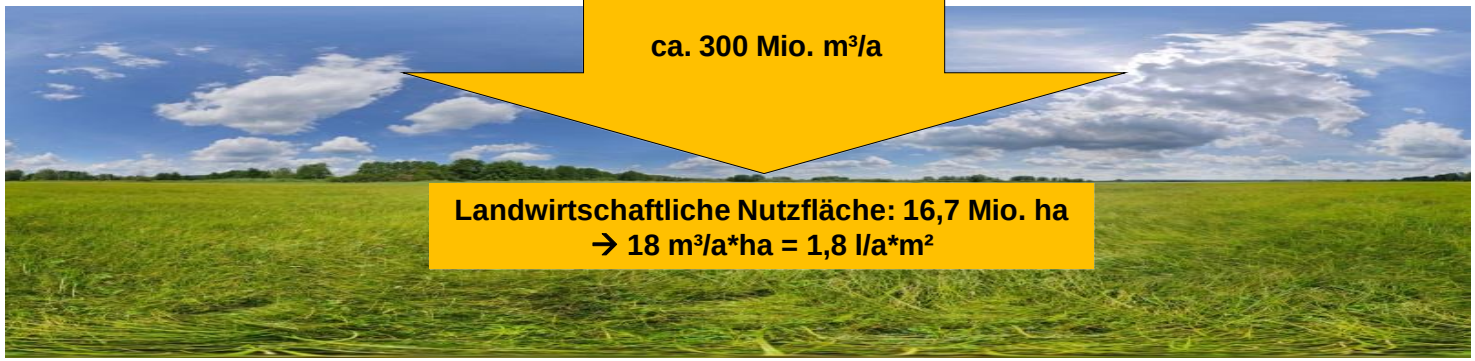
22,9 Mio. Schweine
12,1 Mio. Rinder
12,1 Mrd. Eier

ca. 208 Mio. m³/a Gülle

ca. 26,4 Mio. m³/a Klärschlamm

ca. 64 Mio. m³/a Gärreste

ca. 300 Mio. m³/a



Landwirtschaftliche Nutzfläche: 16,7 Mio. ha
→ 18 m³/a*ha = 1,8 l/a*m²

KS-Entsorgung 2015 / 2016 in Deutschland

Klärschlammentsorgung aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen 2016

	Direkte Klärschlamm-entsorgung insgesamt [1]	Davon					
		stoffliche Verwertung				thermische Entsorgung	sonstige direkte Entsorgung
		zusam-men	in der Landwirt-schaft [2]	bei landschafts-baulichen Maßnahmen	sonstige stoffliche Verwertung		
Trockenmasse in 1000 Tonnen							
2016	1 773,2	624,0	423,5	169,4	31,1	1 142,9	6,3
2015	1 803,1	651,4	427,7	190,1	33,5	1 148,7	3,0
Veränderung gegenüber 2015 in %							
2016	– 1,7	– 4,2	– 1,0	– 10,9	– 7,2	– 0,5	110,0
Anteil in %							
2016	100	35,2	23,9	9,6	1,8	64,5	0,4
2015	100	36,1	23,7	10,5	1,9	63,7	0,2

Klärschlamm in den Bundesländern 2016

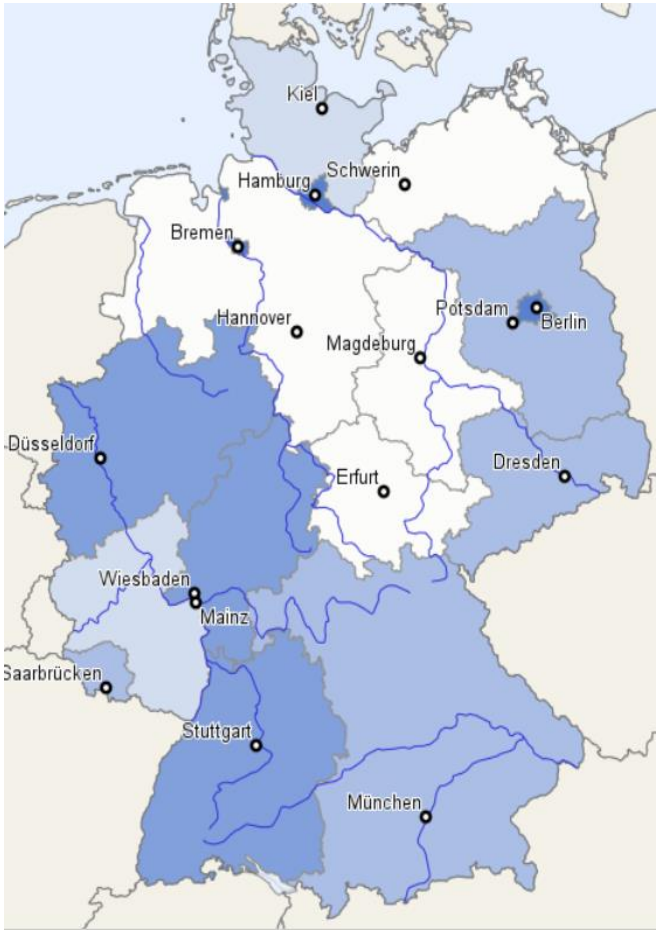
Bundesländer	*Stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft*	*Stoffl. Verwertung b.landschaftsbaulichen Maßnahm.*	*Sonstige stoffliche Verwertung*	*Thermische Entsorgung*	*Deponie*	*Sonstige direkte Entsorgung*	*Insgesamt*	*% therm.*
Baden-Württemberg	2.032	6.206	36	211.452	-	3.797	223.523	95
Bayern	41.387	53.167	1.136	194.304	-	312	290.306	67
Berlin	-	-	-	50.871	-	-	50.871	100
Brandenburg	13.772	13.413	1.696	45.134	-	-	74.015	61
Bremen	5.635	1.478	-	12.918	-	-	20.031	64
Hamburg	-	-	-	50.619	-	-	50.619	100
Hessen	52.369	12.868	2.369	88.676	-	-	156.282	57
Mecklenburg-Vorpommern	23.109	2.286	1.009	8.104	-	-	34.508	23
Niedersachsen	80.999	14.410	6.968	41.424	-	150	143.951	29
Nordrhein-Westfalen	57.884	5.502	2.818	317.137	-	-	383.341	83
Rheinland-Pfalz	55.343	808	3.862	26.149	-	-	86.162	30
Saarland	5.089	4.781	-	9.152	-	-	19.022	48
Sachsen	11.530	20.266	3.649	34.663	-	-	70.108	49
Sachsen-Anhalt	15.625	17.179	5.414	17.889	-	1.668	57.775	31
Schleswig-Holstein	51.821	30	693	22.712	-	366	75.622	30
Thüringen	6.902	17.045	1.414	11.689	-	-	37.050	32
Insgesamt	**423.497**	**169.439**	**31.064**	**1.142.893**	**-**	**6.293**	**1.773.186**	**64**

Alle Angaben bezogen auf Trockenmasse

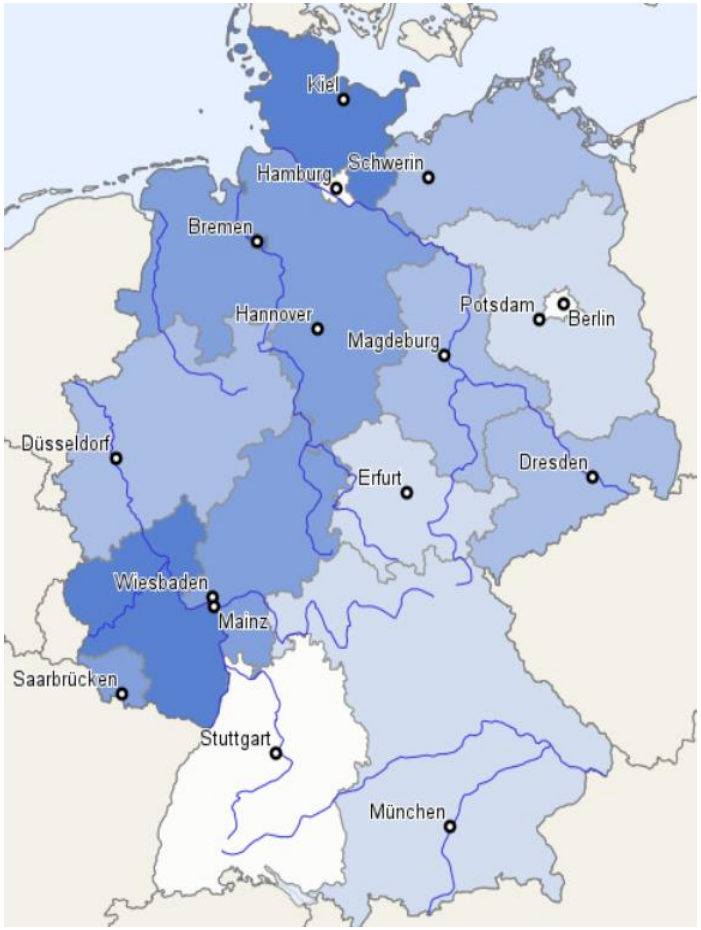
Entwicklung der Klärschlammentsorgung in Deutschland
Quelle: Destatis 2018

Klärschlamm in den Bundesländern 2016

- **Thermische Entsorgung**



- **Landwirtschaftl. Entsorgung**



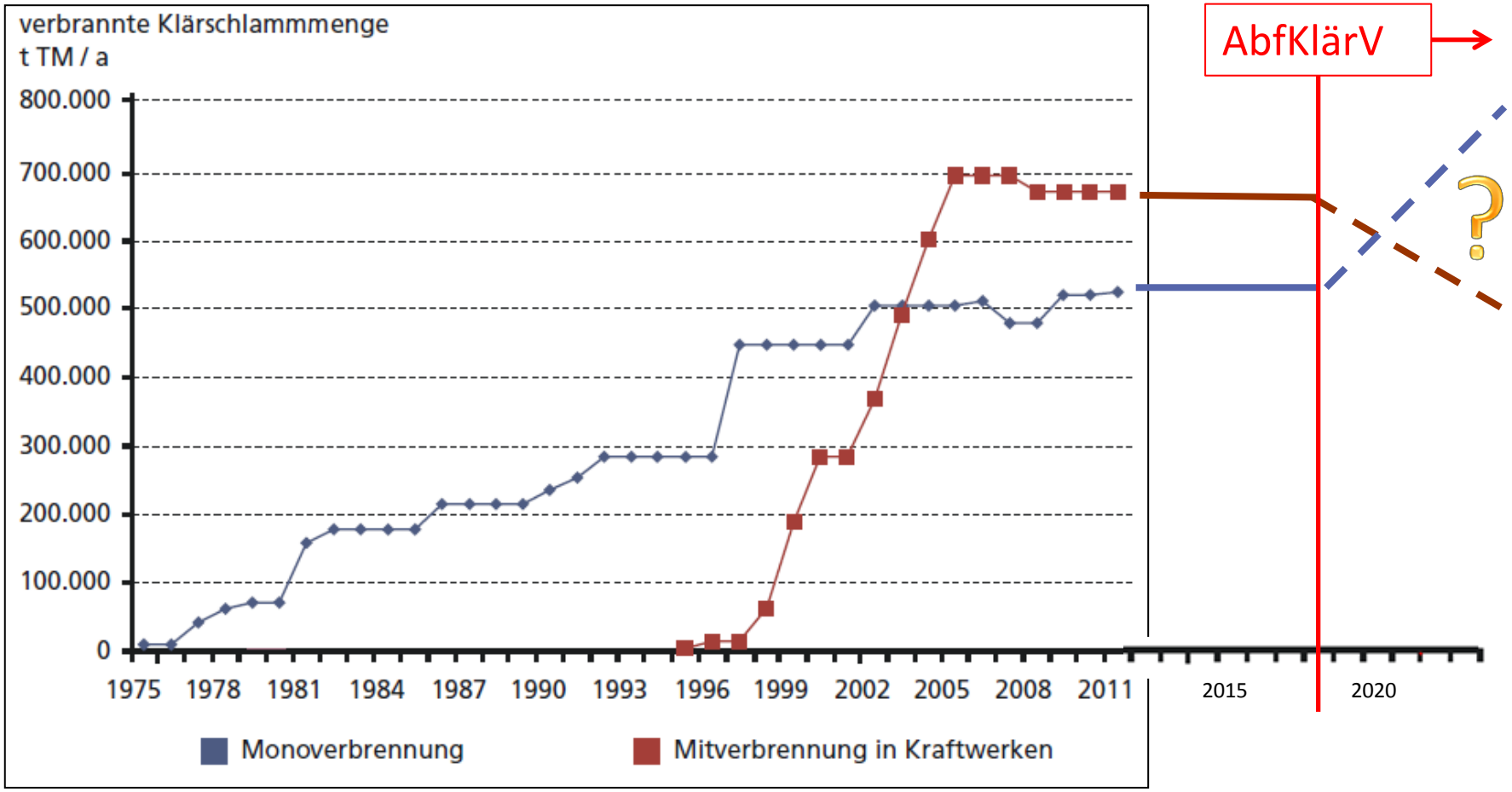
Inhalt

- Einführung und Rahmenbedingungen
- **Technologien der thermischen Klärschlammverwertung**
- Zwei Praxisbeispiele
- Zusammenfassung und Ausblick

Thermische Klärschlammbehandlung

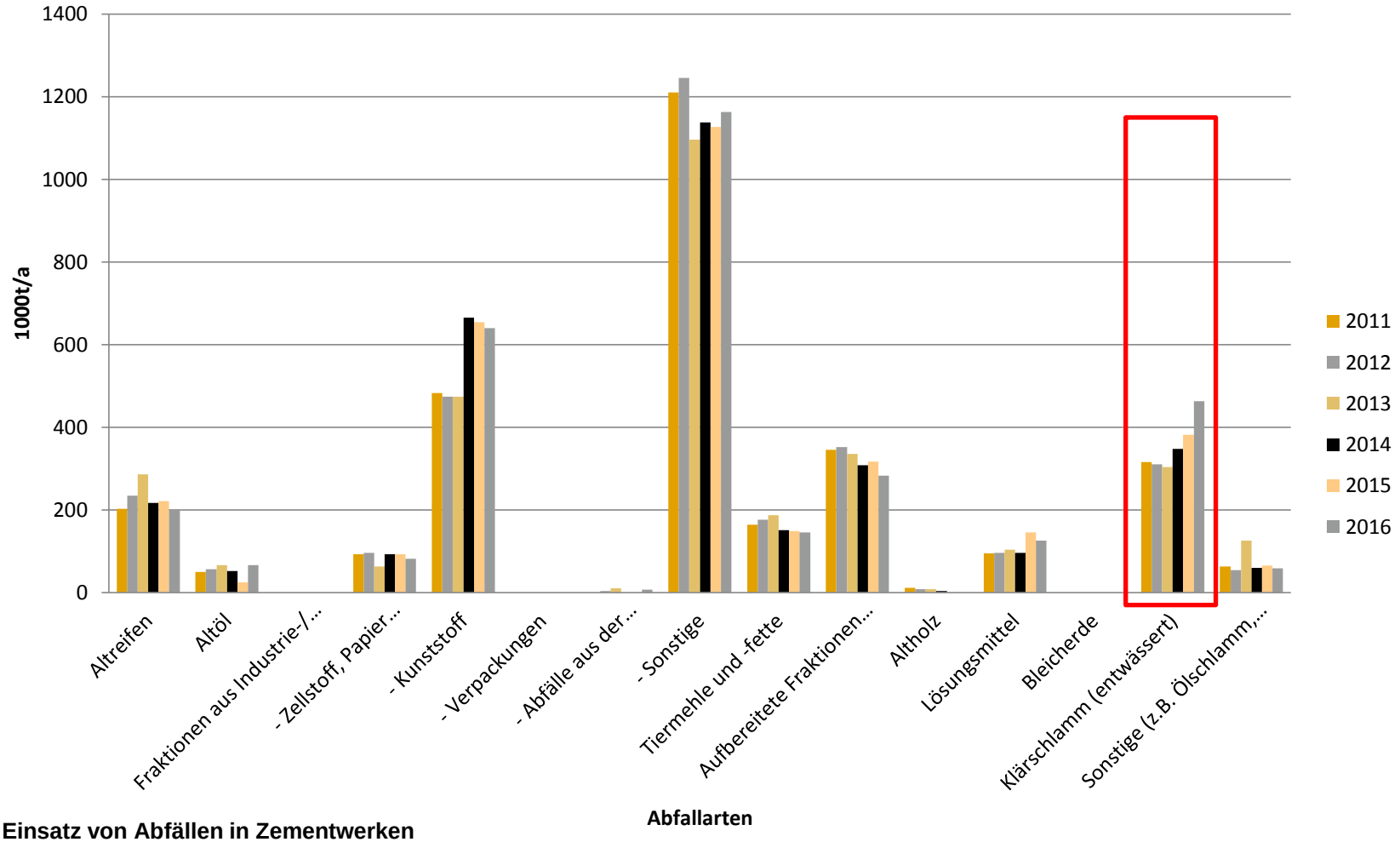
- **Thermische Klärschlamm-behandlung**
  - **Mono-Behandlung**
    - **Verbrennungs-verfahren λ > 1** → Wirbelschichttechnologie ca. 90%
    - **Vergasungs-verfahren λ > 0** → Erzeugung von qualitativ hochwertigem Produktgas durch Umwandlungsprozesse
    - **Pyrolyse-verfahren λ = 0** → Thermochemische Spaltung organischer Verbindungen ohne zusätzlichen Sauerstoff
  - **Mitbehandlung**
    - **Kohlekraftwerke** → Staubfeuerung, zirkulierende Wirbelschicht
    - **Zementwerke** → Drehrohrofen
    - **Abfallbehandlung** → Rostfeuerung

Mono- vs. Mitverbrennung im Kraftwerk



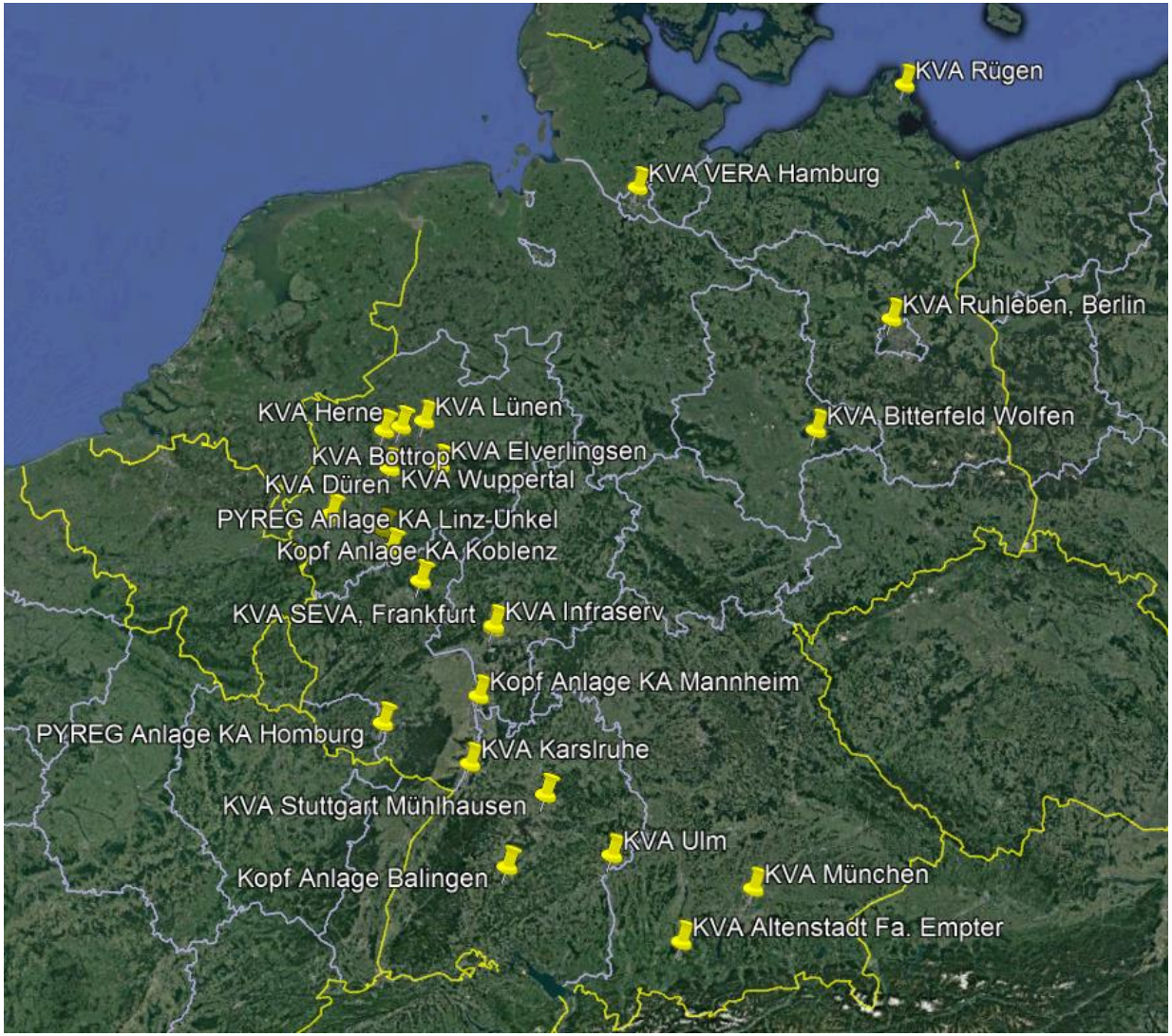
Entwicklung der Klärschlamm-Mono- und -Mitverbrennung in Deutschland
Quelle: Wiechmann, B.: Klärschlammbehandlung in Mono- und Mitverbrennungsanlagen – Stand und Perspektiven, UBA, 9/2013

Mitverbrennung im Zementwerk

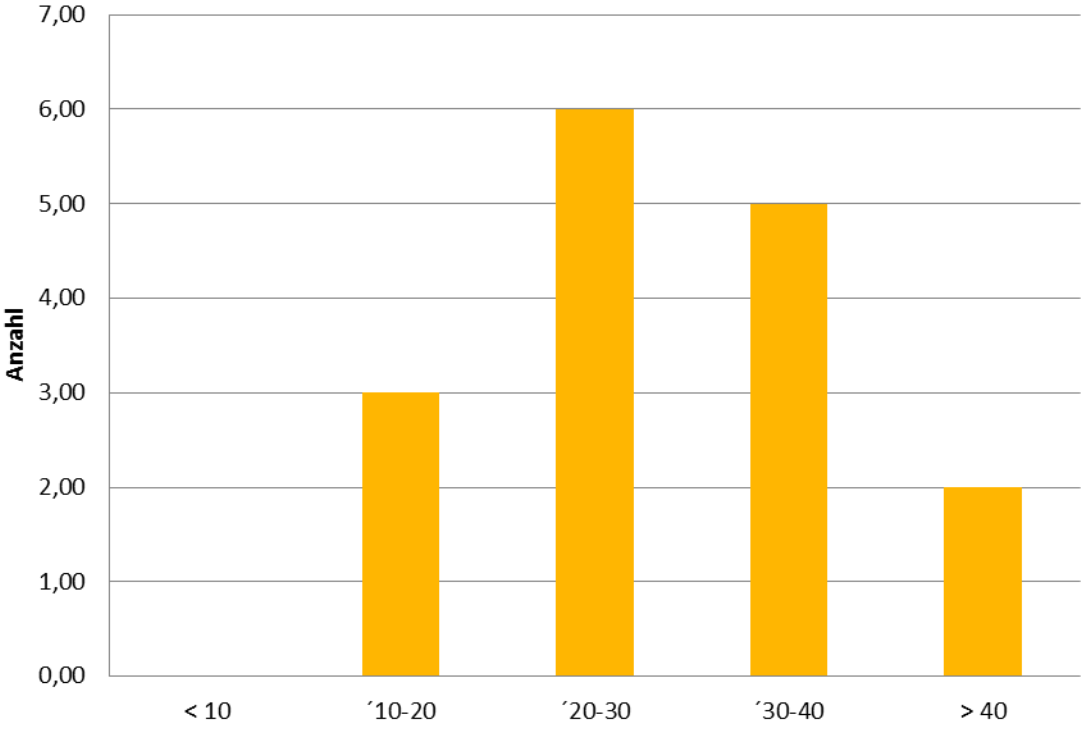


Einsatz von Abfällen in Zementwerken
Quelle: VDZ Zement, 2017

Bestandsanlagen thermische KS-Behandlung



Bestand Mono-Klärschlammbehandlung



0%	19%	38%	31%	13%

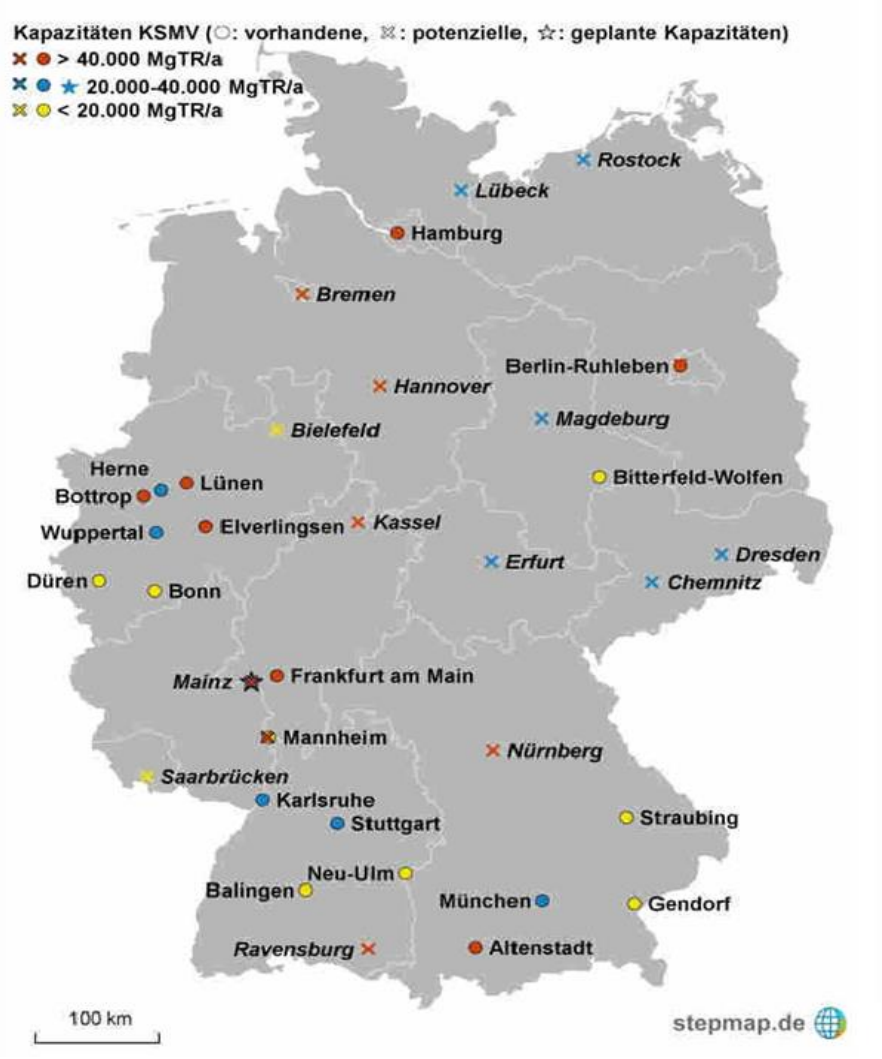
81 % > 20 Jahre

44 % > 30 Jahre

WS-Bestandsanlagen	*Jahr der Inbetriebnahme*
Berlin-Ruhleben	1985
Bitterfeld-Wolfen (GKA)	1997
Bonn	**1981**
Bottrop	1991
Düren	**1975**
Elverlingsen-Werdohl*	2002
Frankfurt am Main*	**1981**
Gendorf (Infraserv)	2006
Hamburg*	1997
Herne*	1990
Karlsruhe*	1982
Lünen	1997
München*	1997
Stuttgart*	2007
Neu-Ulm*	1979
Wuppertal	**1977**
Mittleres Alter	***28 Jahre***

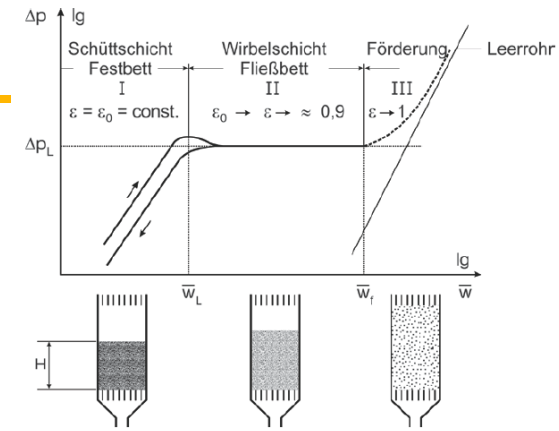
* Planung Neubau/Umbau/Sanierung

Bestand und Projekte für Mono-Klärschlammbehandlung

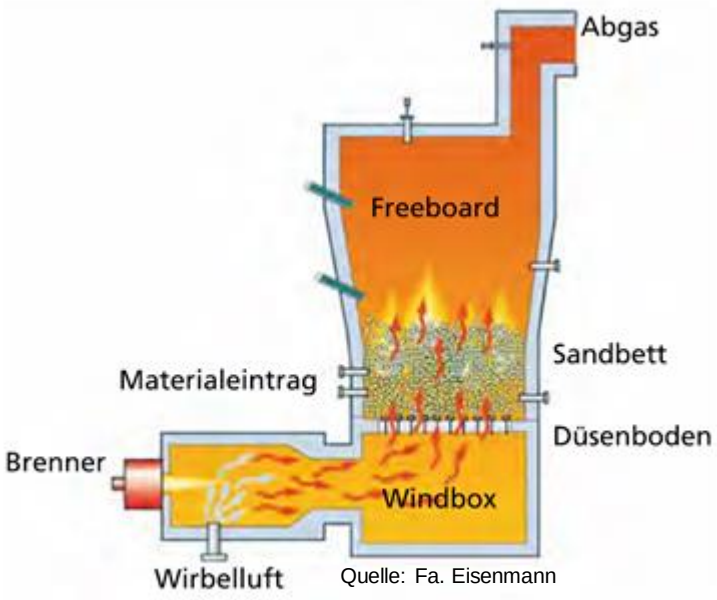


Wirbelschichtfeuerung

- **Für Klärschlammverbrennung am weitesten in Deutschland verbreitet**
- **Klärschlammanforderung: Heizwert von 4.000 - 4.500 kJ/kg (ca. 40 - 50 % TR)**
- **Autotherme Verbrennung (ohne Zusatzbrennstoff)**
- **Temperaturen etwa 850 - 950 °C**
- **Lambda λ > 1**
- **Asche gelistet gemäß Anhang 2 DüMV**
- **Referenzen:**
  - 21 Anlagen, Deutschland
  - 2.000 - 90.000 t_{TR}/a



: Druckverlust Δp und Gasgeschwindigkeit ω in der Wirbelschicht [Stieß, 2008]



Quelle: Fa. Eisenmann

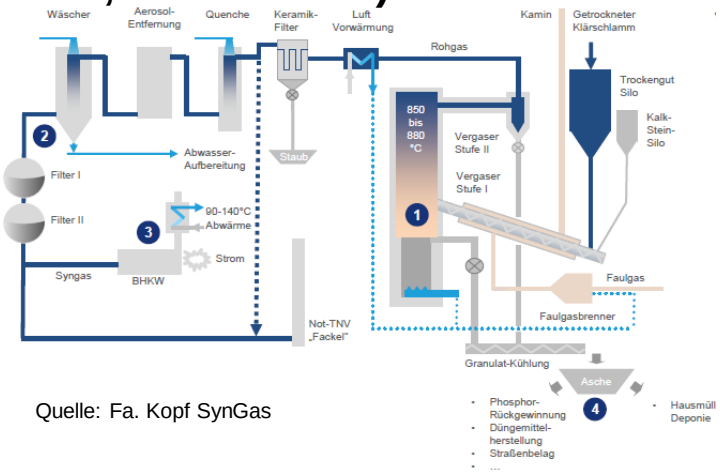
Schmelzverfahren

- **Umwandlung von brikettiertem Klärschlamm zu verglastem Material**
- **Kupolofen aus Metallerzeugung**
- **Temperaturen etwa 2.000 °C**
- **Synthesegasnutzung möglich**
- **Eisen- und phosphathaltige Schlacke**
- **Listung gemäß Anhang 2 DüMV**
- **Referenzen:**
  - Pilotanlage Nürnberg
  - Ähnliches Prinzip:
    Großtechnische Anlagen in Japan, Fa. Kubota

Quelle: Stadt Nürnberg, 2016

Vergasungsverfahren

- **Umwandlung von festen, kohlenstoffhaltigen Verbindungen in Gasphase/Synthesegas (CO, H_2, C_XH_Y)**
- **Klärschlamm, mind. 90 % TR**
- **Vergasung, begrenzte Luft- bzw. O_2-Menge**
- **Synthesegasnutzung bspw. in BHKW**
- **Asche *nicht* gelistet gemäß Anhang 2 DüMV,**
  (nur, wenn t ≥ 1.450 °C und keine Stoffe gem. Nr. 8.3, Anl. 2 DüMV)
- **Referenzen:**
  - Balingen, in Betrieb (2.300 t_{TR}/a)
  - Mannheim, in Betrieb (5.000 t_{TR}/a)
  - Koblenz in Bau (4.500 t_{TR}/a)



Quelle: Fa. Kopf SynGas

HTC-Verfahren (Hydrothermale Carbonisierung)

- **Umwandlung von feuchter Biomasse (Klärschlamm, entwässert) zu kohleähnlichem Produkt**
- **Temperaturen 180 - 250 °C, Drücke 10 - 40 bar**
- **„Kohleschlamm“ nach Behandlung, auf 75 % TR entwässerbar**
- **Ähnlich hohe Heizwerte wie Braunkohle. (Erdölähnliche Produkte, Humus, Steinkohle möglich)**
- **Prozesswasser, hohe organische Belastung**
- **HTC-Kohle, Schwermetallsenke**
- **P-Produkt/Kohle *nicht* gelistet (Anhang 2, DüMV)**
- **Referenzen:**
  - Pilotanlage für Klärschlamm
  - Karlsruhe/Kaiserslautern
  - Großtechnische Anlage in Jining/China

Quelle: Fa. Terra Nova

Entwicklungsstufen n. DIN 3460 - angewendet auf thermische Verfahren

Entwicklungs-stufe	Kriterium	Vorgabe	Verfahren					
			Station. Wirbel-schicht	Rost-feuerung	Schmelz-Verfahren	Vergasung	Pyrolyse	HTC-Verfahren
1	Anlage/Verfahren	Tests im Labormaßstab, Massen- und Energiebilanzen Kernanlage						
	Eingangs-/ Ausgangsstoffe	Beschreibende Analyse Eingangs- / Ausgangsstoffe (Qualität, Quantität)						
	Marktchancen	Einschätzung Marktchance Großanlage (Basis Laborergebnisse)						
	Scale-up	Darstellung Möglichkeiten & Risiken Scale-up, Planung Versuchsanlage						
2	Anlage/Verfahren	Stationärer Betrieb, Versuchsanlage Massen- und Energiebilanzen Kernanlage						
	Eingangs-/ Ausgangsstoffe	Analyse Eingangs- /Ausgangsstoffe (Qualität, Quantität), Möglichkeiten & Grenzen Eingangsstoffe						
	Marktchancen	Abschätzung der Marktchancen einer Großanlage						
	Scale-up	Rahmenbedingung Scale-up, weitere Verfahrensschritte, Planung Technikumsanlage						
	Betrieb	Abschätzung möglicher Betriebsprobleme (Korrosion, Erosion, …)						
3	Anlage/Verfahren	Stationärer Betrieb, Technikumsanlage (längere Zeit),Emissionsmessung						
	Eingangs-/ Ausgangsstoffe	Prüfung der prozesstypischen Stoffe auf ihre Umweltrelevanz und Nutzbarkeit						
	Marktchancen	Darlegung der Marktchancen einer Großanlage						
	Scale-up	Technische und wirtschaftliche Interpretation Mess- und Analysenergebnisse bzgl. Großanlage, Größe Apparate, Materialien, Bau- und Betriebskosten Großanlage, Kosten pro Tonne Abfall						
	Betrieb	Einschätzung Laufzeit, Anlagenverfügbarkeit und Standzeit einer zu konzipierenden Großanlage						
4	Anlage/Verfahren	Betrieb großtechnische Anlage in bestimmungsgemäßem Betrieb über ein bis zwei Jahre, Bestätigung der Massen- und Energiebilanzen, Emissionswerte						
	Eingangs-/ Ausgangsstoffe	Nachweis der Eignung für geplante Eingangsstoffe, Möglichkeiten Produktvermarktung						
	Marktchancen	Validierung der Investitions- und Betriebskosten (Business-Plan)						
	Betrieb	Nachweis der Verfügbarkeit und Laufzeit						
5	Anlage/Verfahren	Großtechnische Anlage im bestimmungsgemäßem Betrieb über mehrere Jahre, Beurteilung der Umweltrelevanz von Verfahren und Anlage						
	Eingangs-/ Ausgangsstoffe	Nachweis der Entsorgung der Einsatzstoffe, Nachweis der Vermarktung prozesstypischer Produkte						
	Marktchancen	Nachvollziehbare Darstellung der Investitions- und Betriebskosten über mehrere Jahre						
	Betrieb	Optimierung Effizienz, Verfügbarkeit, Laufzeit						

Franck et. Al: Verfahrens zur thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrecycling, *Müll und Abfall 5/2018*

Abgasreinigungstechnologien

- **Verfahren**
  - 1- bzw. 2-stufige Wäscher, Kalk oder Natronlauge basiert
  - Quasi-trockene Verfahren, Kalk basiert
  - Trockene Verfahren Kalk oder Na-Bicarbonat basiert
- **Anforderungen an die Emissionen, Abscheideleistung**
- **Betriebssicherheit**
- **Betriebsmittelverbrauch, Energiebedarf**
- **Reststoffquantität und -qualität**
- **Wirtschaftlichkeit**
- **Platzbedarf, Aufstellungskonzept**

Berlin	Feuerung und Kessel	Aktivkohle-zugabe	E-Filter	SO_2-Wäscher, Kalk	Kamin			
Bitterfeld Wolfen	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	SO_2-Wäscher, NaOH	Kamin	
Dordrecht	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO_2-Wäscher, NaOH	HOK-Fest-bettfilter	Gewebe-filter	Kamin	
Hamburg	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO_2-Wäscher, Kalk	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin	
Kopenhagen	Feuerung und Kessel	E-Filter	Sprüh-trockner	Zugabe von $Ca(OH)_2$+HOK	Gewebe-filter	SO_2-Wäscher, NaOH	Kamin	
Mainz (geplant)	Feuerung und Kessel	E-Filter	Zugabe von $Ca(OH)_2$+HOK	Gewebe-filter	Kamin			
Moerdijk	Feuerung und Kessel	E-Filter	SO_2-Wäscher, NaOH	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin		
Stuttgart, Linie 3	Feuerung und Kessel	E-Filter	Sprüh-trockner	HOK-Zugabe	E-Filter	HCl-Wäscher	SO_2-Wäscher, NaOH	Kamin
Wuppertal	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO_2-Wäscher, NaOH	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin	

Quelle: Abgasreinigung für Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen, M. Gutjahr, K. Niemann

Hong Kong	Feuerung und Kessel	Multi-Zyklon	Zugabe Na2CO3 +A-Koks	Gewebe-filter	Kamin

BREF Dokument (Sevilla Prozess)

- **Waste Incineration Direction von 2006**
- **Kick-off 2015**
- **2016 – „Feed-Back“ von TWG Mitgliedern, Datenabgleich**
- **Mai 2017,**
  1. Entwurf BREF veröffentlicht (ca. 900 S.)
- **U.a. Technologievorgaben, Emissionsminderungen**
- **Bis 09/2017,**
  Kommentare TWG/Staaten
- **Fertigstellung in 2018?**
- **Umsetzung in nationales Recht innerhalb von 4 Jahren**

JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT

Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration

Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)

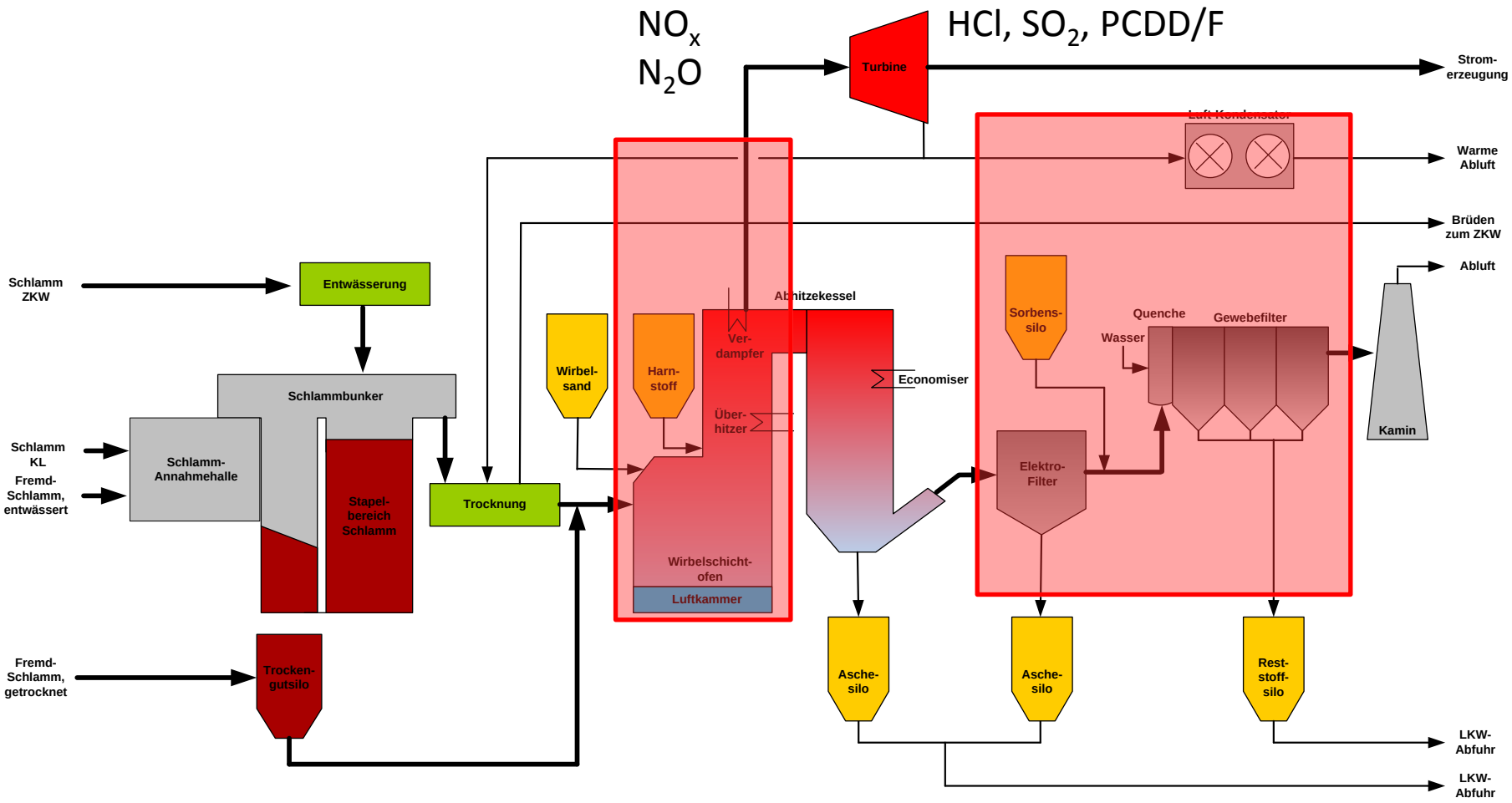
JOINT RESEARCH CENTRE
~~Institute for Prospective Technological Studies~~
Directorate B – Growth and Innovation
~~Sustainable Production and Consumption Unit~~
Circular Economy and Industrial Leadership Unit
European IPPC Bureau

DRAFT 1 (May 2017)

This draft has not been adopted or endorsed by the European Commission. Any views expressed are the preliminary views of the Commission services and may not in any circumstances be regarded as stating an official position of the Commission. The information transmitted is intended only for the Member State or entity to which it is addressed for discussions and may contain confidential and/or privileged material.

WORK IN PROGRESS DRAFT

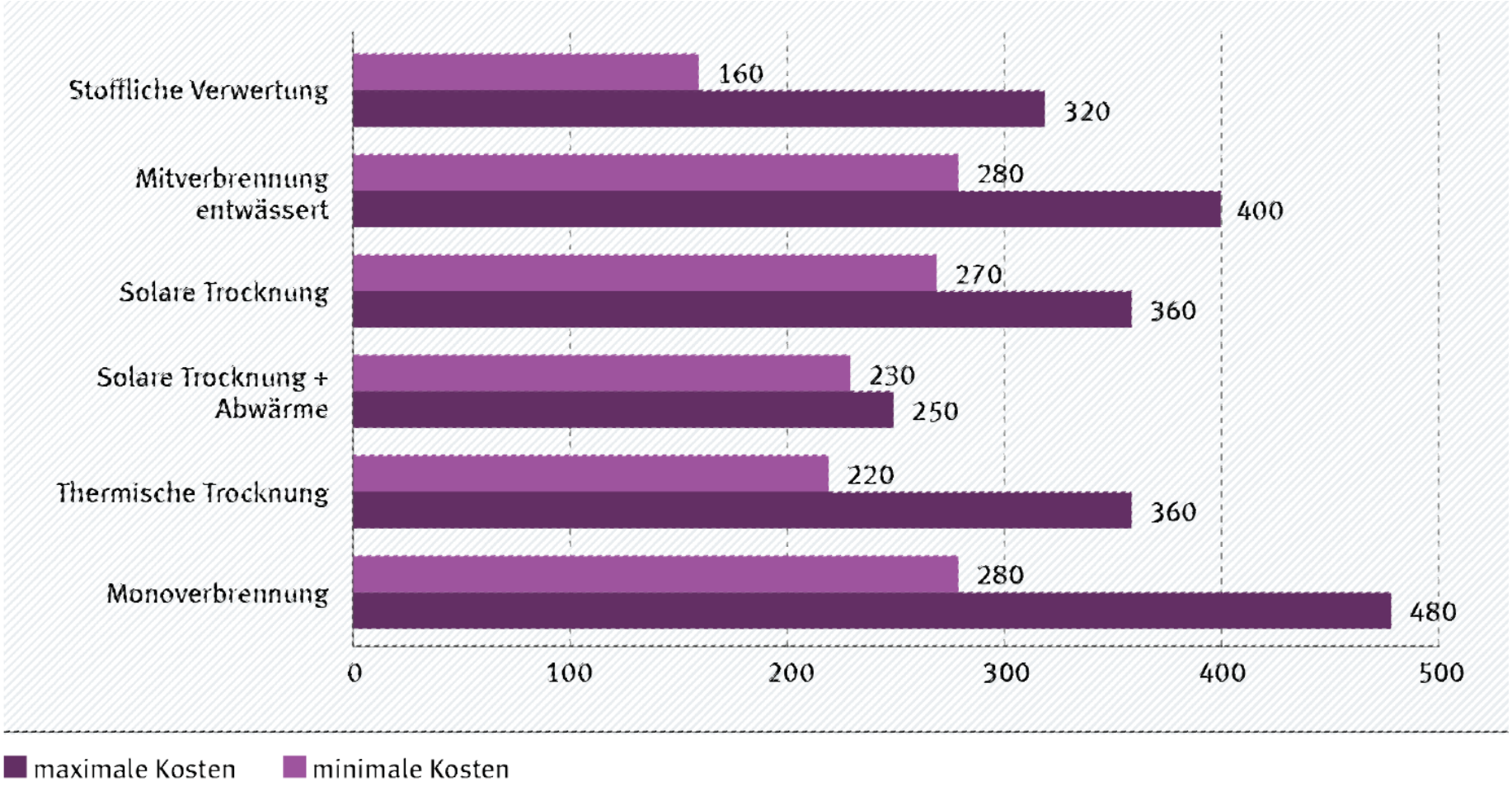
KVA-Konzept – Problemzonen?



Anforderungen zur Energieeffizienz

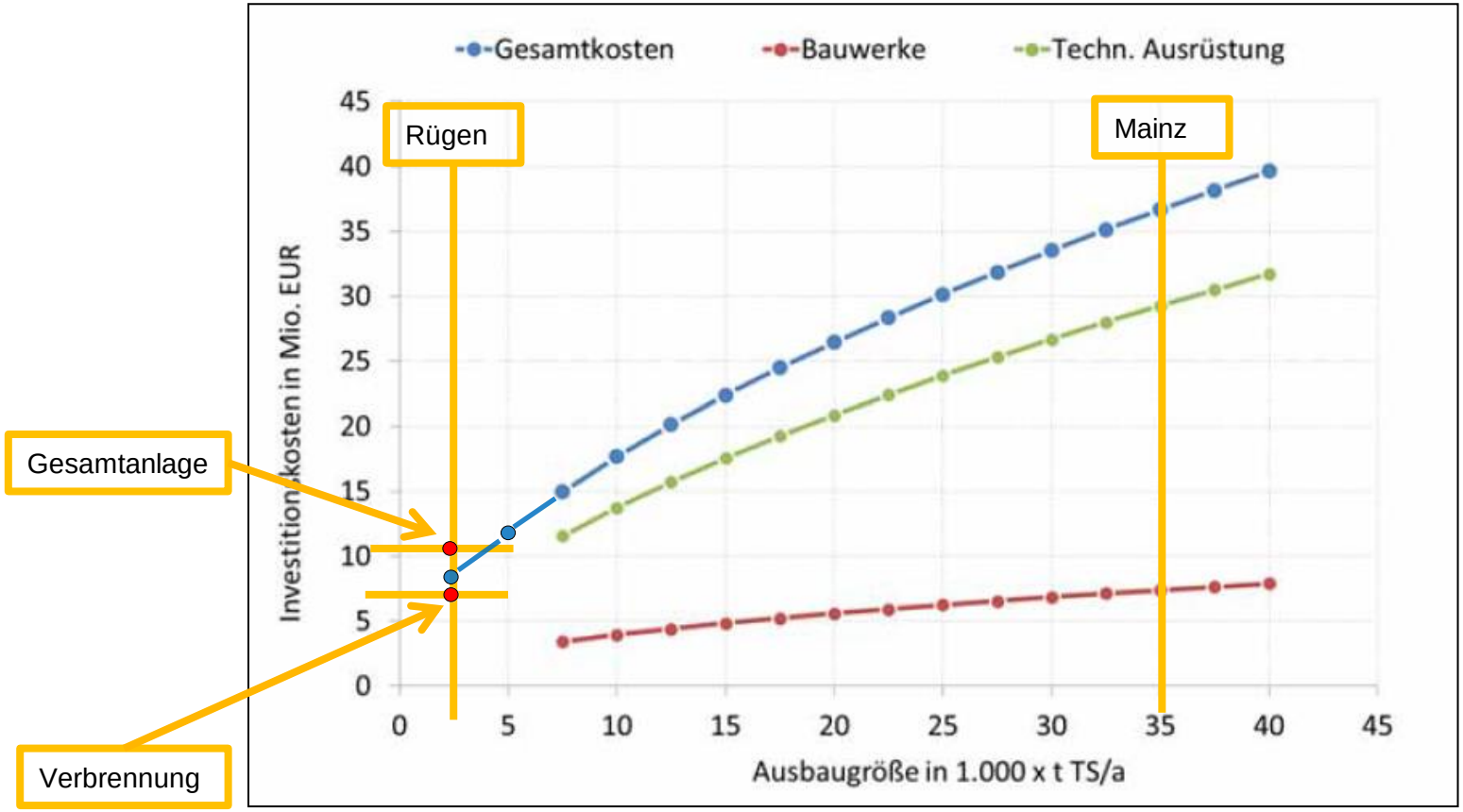
Abfallinput	elektr. Effizienz (brutto) in % (nur bzw. größtenteils Stromprod.)		therm. Effizienz (brutto) in % (nur bzw. größtenteils Wärmeprod.)
	Neuanlage	Bestandsanlage	Neu- und Bestandsanlage
Siedlungsabfall-/ Gewerbeabfallverbrennung	25-35	20-35	72-91
Klärschlamm	15-21	12-21	60-70
gefährliche Abfälle	16-32	14-32	65-89

Kosten der Klärschlammverwertung [€/tTR]



Klärschlammentsorgung in Deutschland
Quelle: Umweltbundesamt, Dessau 5/2018

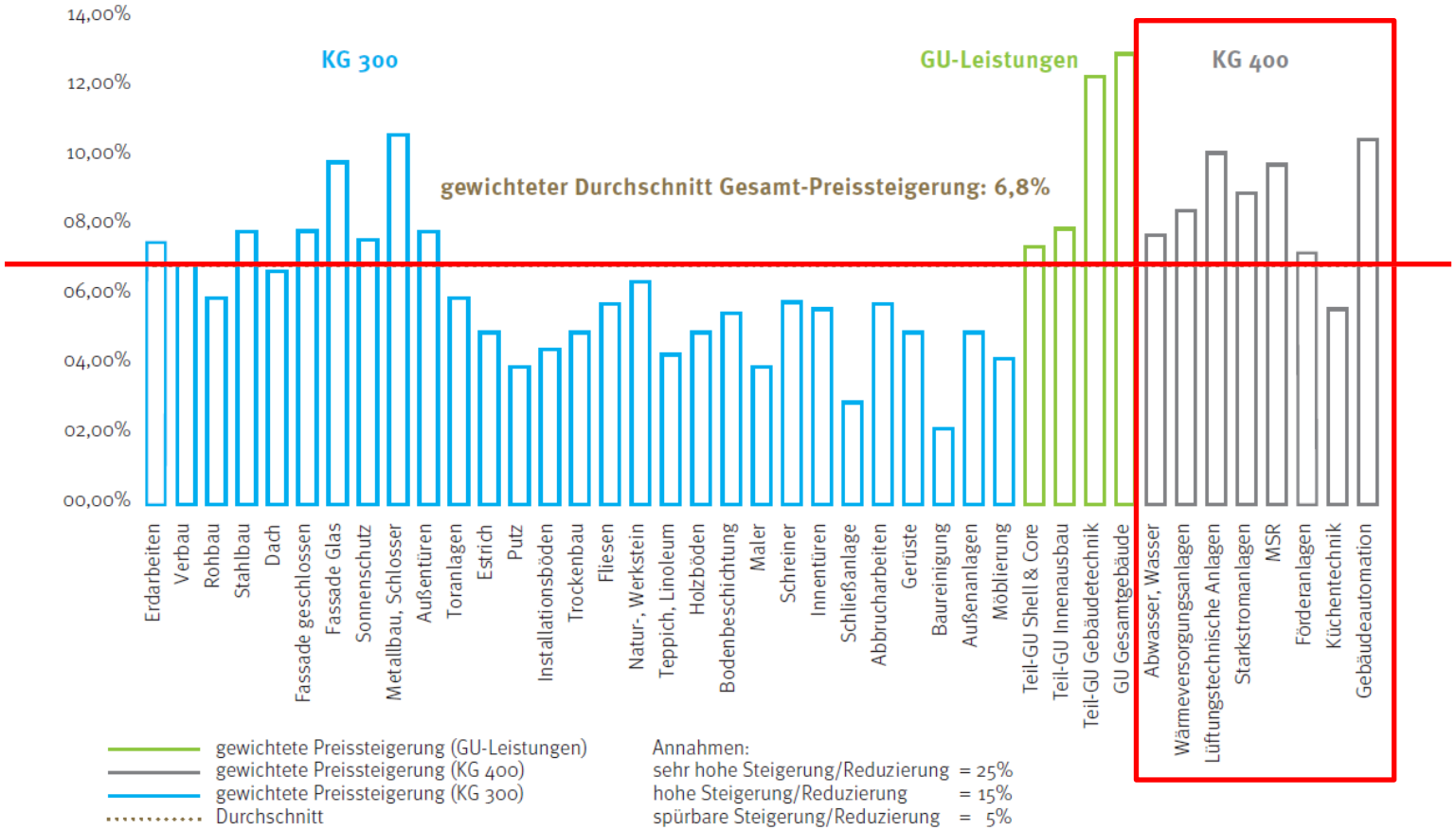
Investitionskosten MKVA



Verwertungskonzept der Klärschlammkooperation MV GmbH
Quelle: 16. Dialog Abfallwirtschaft MV, Rostock 4/2014

… aber

Die Baupreise im Hochbau sind derzeit etwa 7 Prozent höher als viele Bauherren und Auftraggeber in ihren Budgets ansetzen.



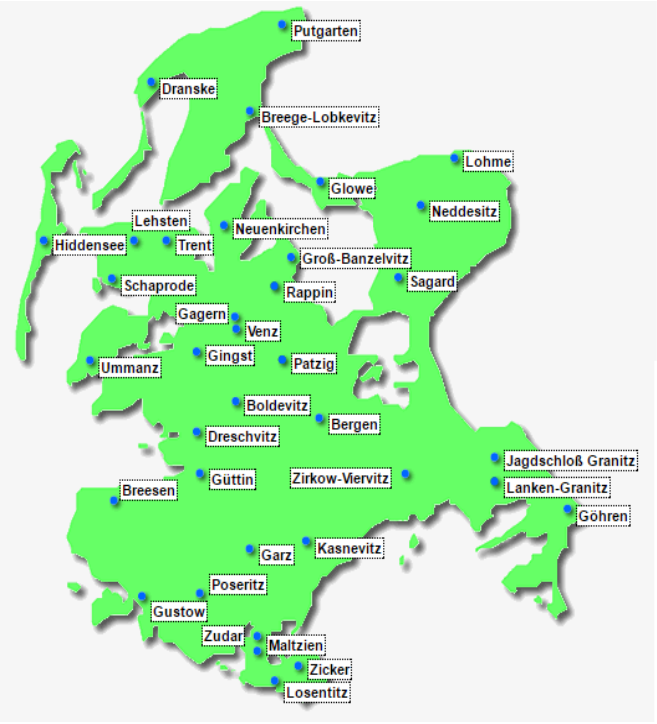
Baupreise im Hochbau

Quelle: Dress & Sommer Baupreisumfrage 2017

Inhalt

- Einführung und Rahmenbedingungen
- Technologien der thermischen Klärschlammverwertung
- **Zwei Praxisbeispiele**
- Zusammenfassung und Ausblick

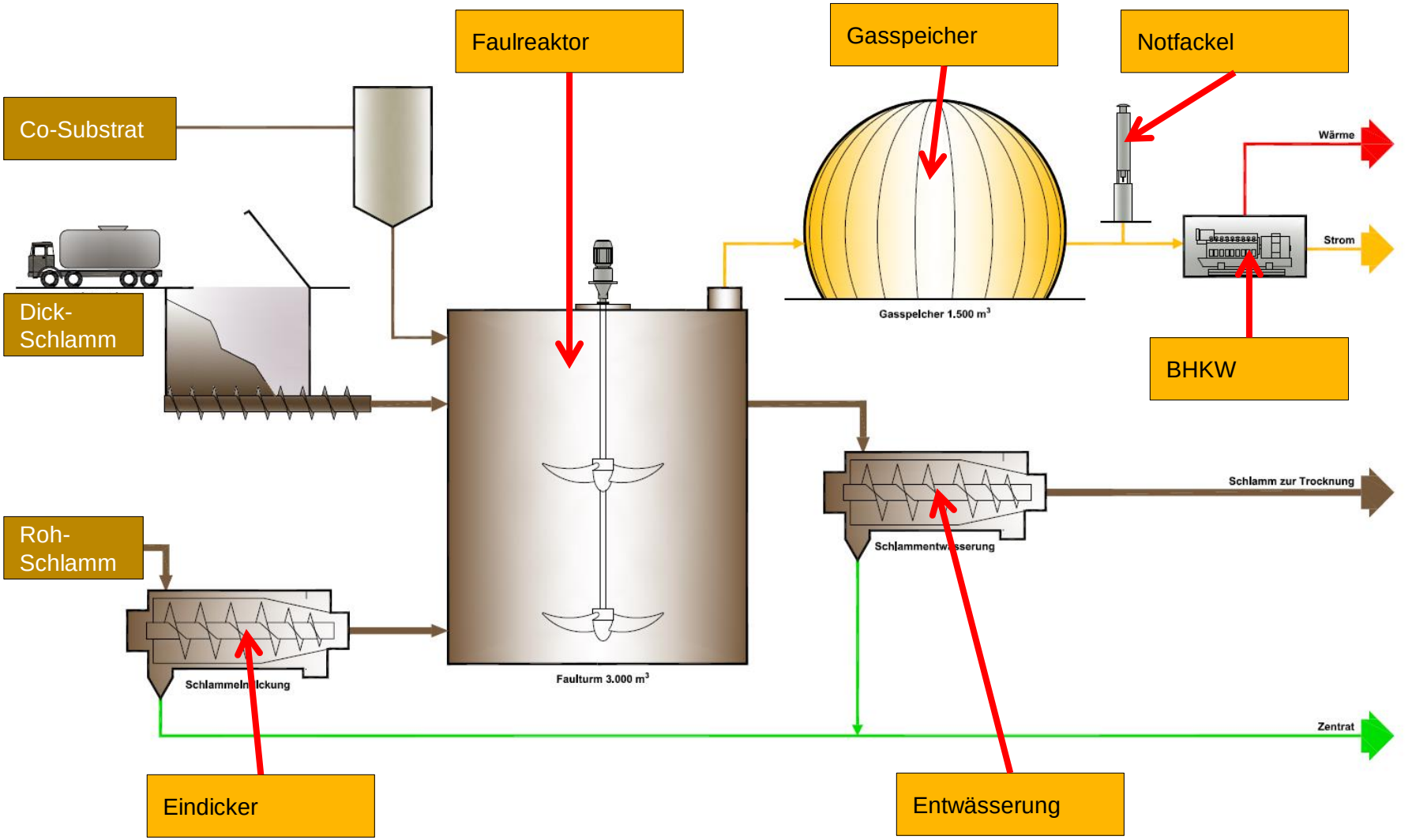
Standorte Kläranlagen Rügen



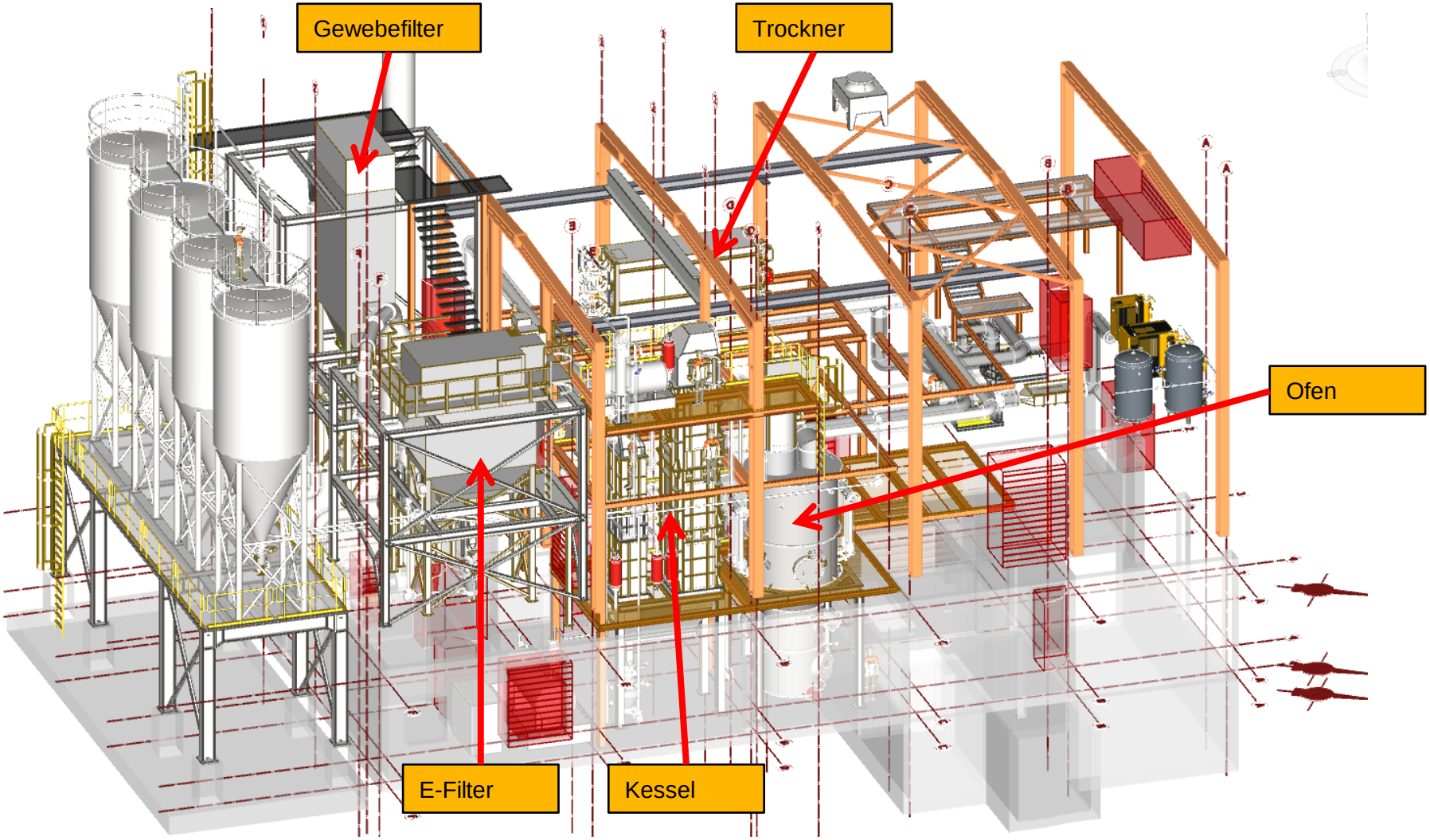
Anlageneckdaten KVA Rügen

Parameter	*Einheit*	*Wert*
Faulung		
Durchsatzleistung	m^3/d	120
Gasmenge	m^3/h	110
Energieerzeugung (BHKW)	$kW_{el.}$	330
Energieerzeugung (thermisch)	$kW_{th.}$	360
Verbrennung		
Brennstoffmenge (Klärschlamm, Rechengut, Strandgut)	Mg_{TS}/a	2.000
Durchsatzleistung Ofen	kg_{TS}/h	180 - 270
TR-Gehalt, Mischung Ofeneintritt	%	ca. 55
Feuerungswärmeleistung	MW_{th}	0,900
Luftvorwärmung	°C	245
Verbrennungsasche (nutzbar)	Mg/a	ca. 800
Rückstandsmenge (Deponie)	Mg/a	ca.500

Anlagenkonzept Faulung

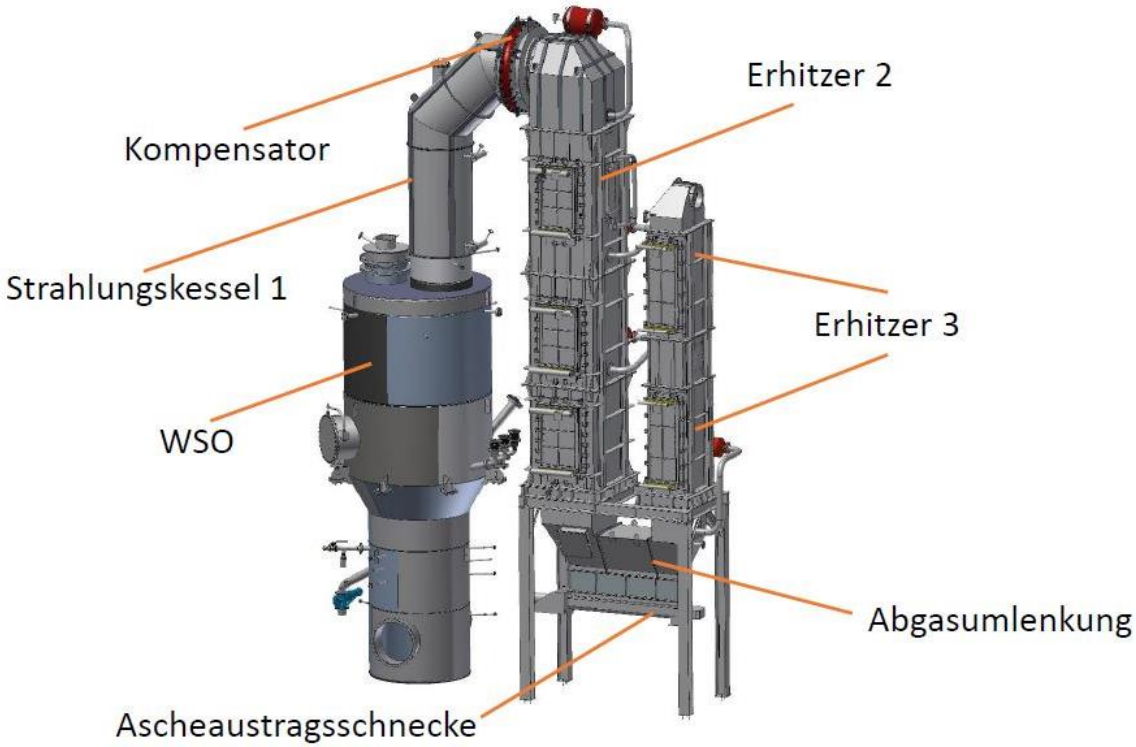


Anlagenkonzept Verbrennung



Aufbau der Kesselanlage

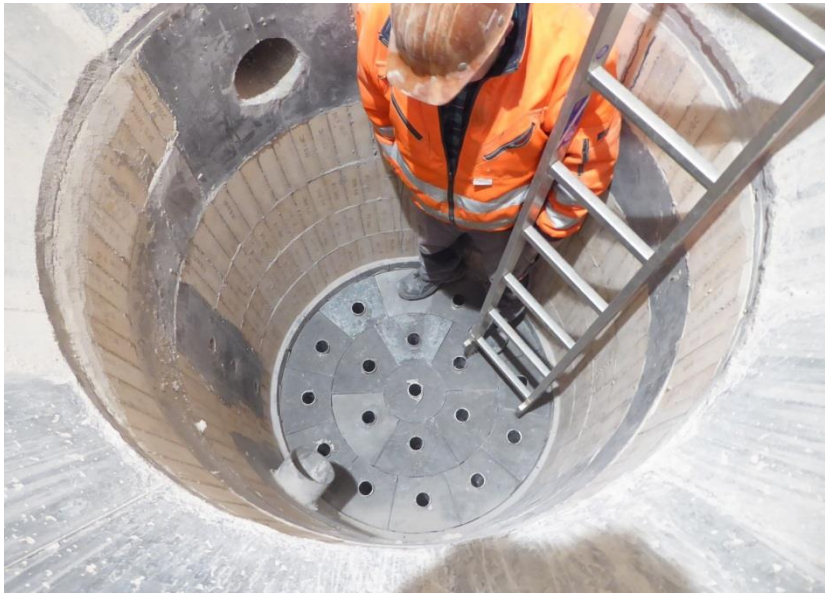
- **Heizwert Brennstoff >4.000 kJ/kg autotherme Verbrennung**
- **TR-Gehalt vor Ofen**
  - Ca. 55 %
- **Temperaturen**
  - Wirbelschicht <750°C
  - Freibord >850 °C
- **Gestufte Verbrennung**
  - $PL_{O2\text{-}Gehalt}$ λ ~0,45
  - $SL_{O2\text{-}Gehalt}$ λ > 1,2
  - Reduzierung von NOx
  - Verbessertes Teillastverhalten



Trockner und Kessel

Segmente Wirbelschichtofen

Wirbelschichtofen und Düsenboden



T · PARK IS …

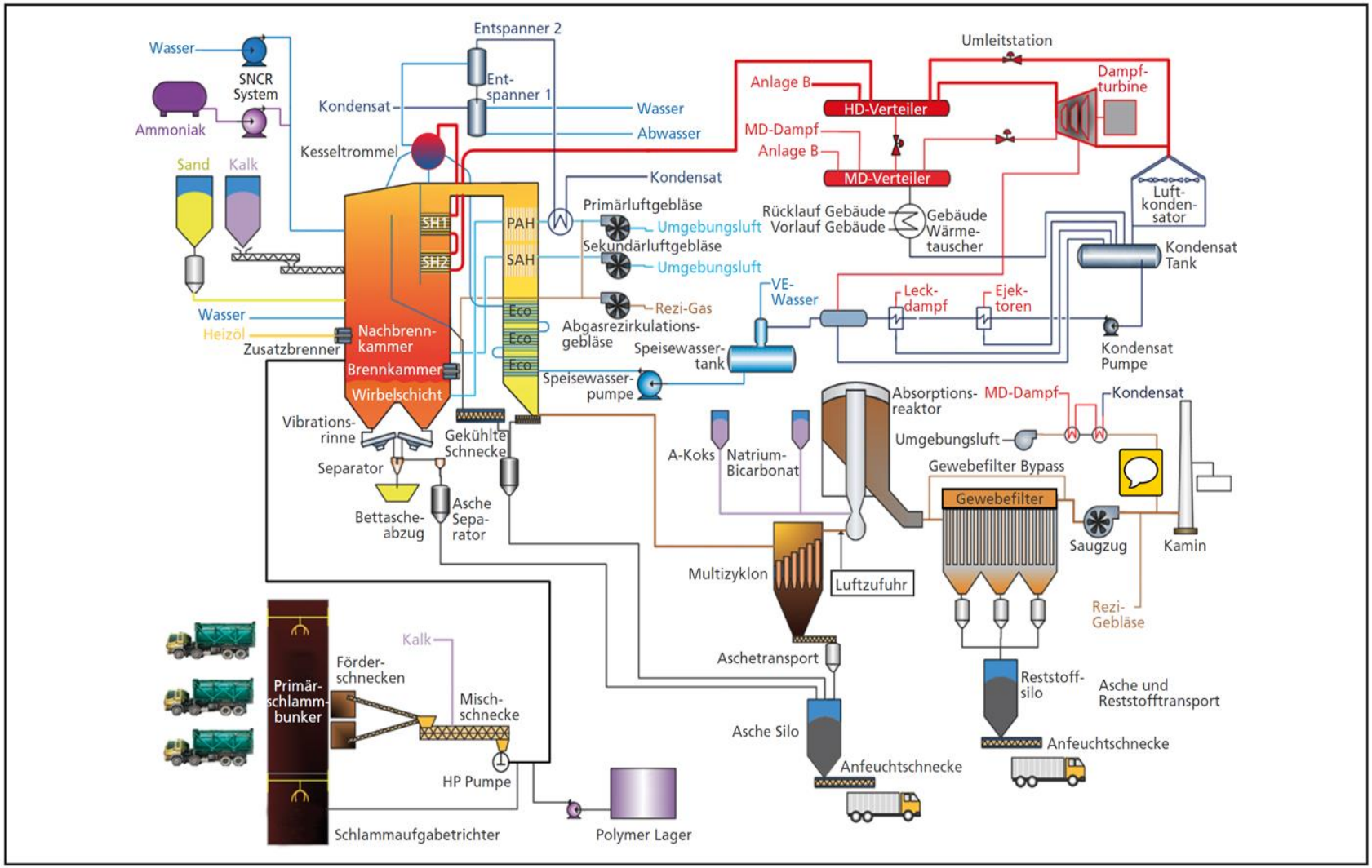
…
“

… a
Edu

Anlageneckdaten T-Park Hong Kong

Parameter	*Einheit*	*Wert*
Brennstoffmenge (Klärschlamm)	Mg_{TS}/a	240.000
KS-Durchsatzleistung je Ofen	Mg_{TS}/h	6,88
TR-Gehalt, Mischung Ofeneintritt	%	> 30
Feuerungswärmeleistung je Ofen	MW_{th}	27,0
Dampfparameter	bar/°C	41/380
Dampfproduktion je Linie	Mg/h	31,5
2 Kondensationsdampfturbinen mit Luko´s jeweils	MW	14
Stromproduktion (bei 4 Linienbetrieb, nominal)	MW_{el}	Ca. 17
Stromexport (max. zulässig)	MW_{el}	Ca. 2

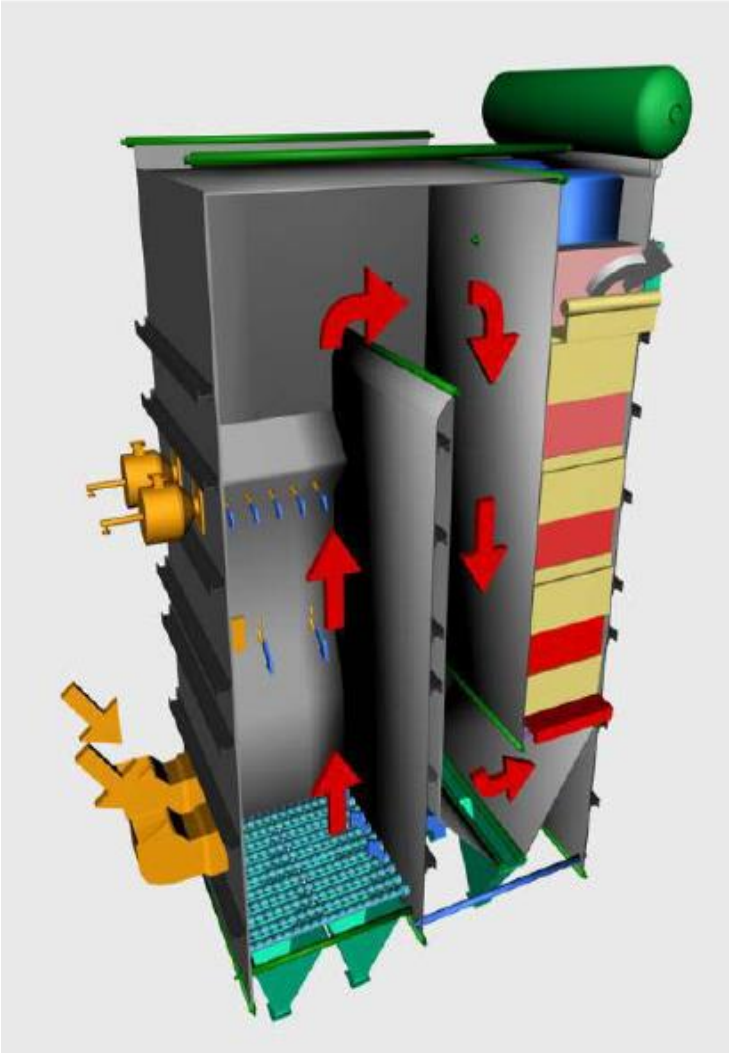
Verfahrensfließbild / 1-linig - T-Park Hong Kong



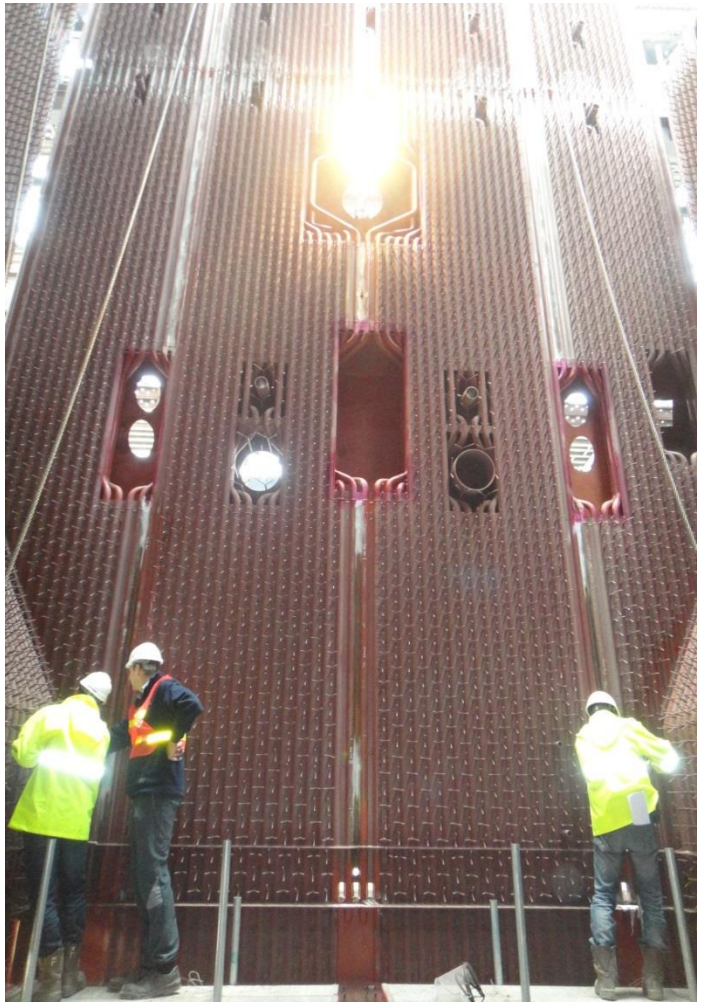
Anlagenerrichtung T-Park Hong Kong

Schlammannahme und Lagerung

Konzept Verbrennungsanlage

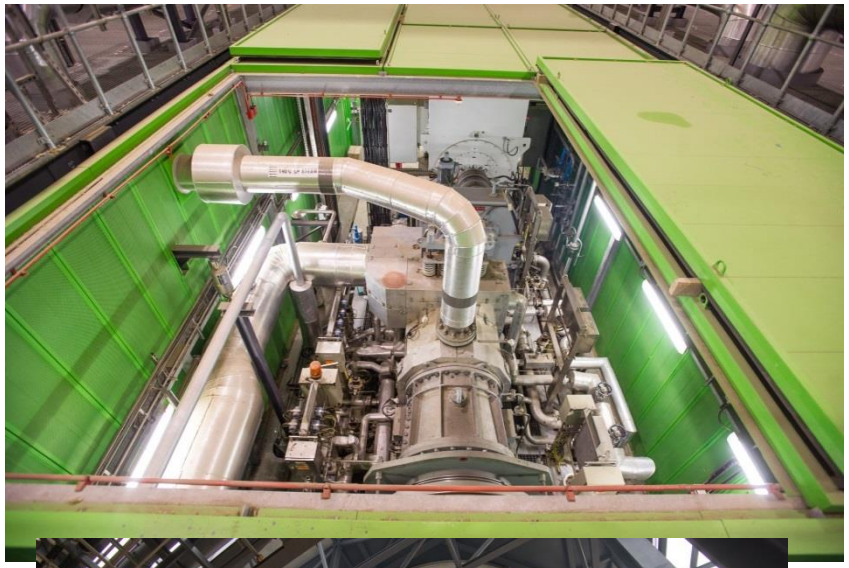


Feuerraum und Düsenboden

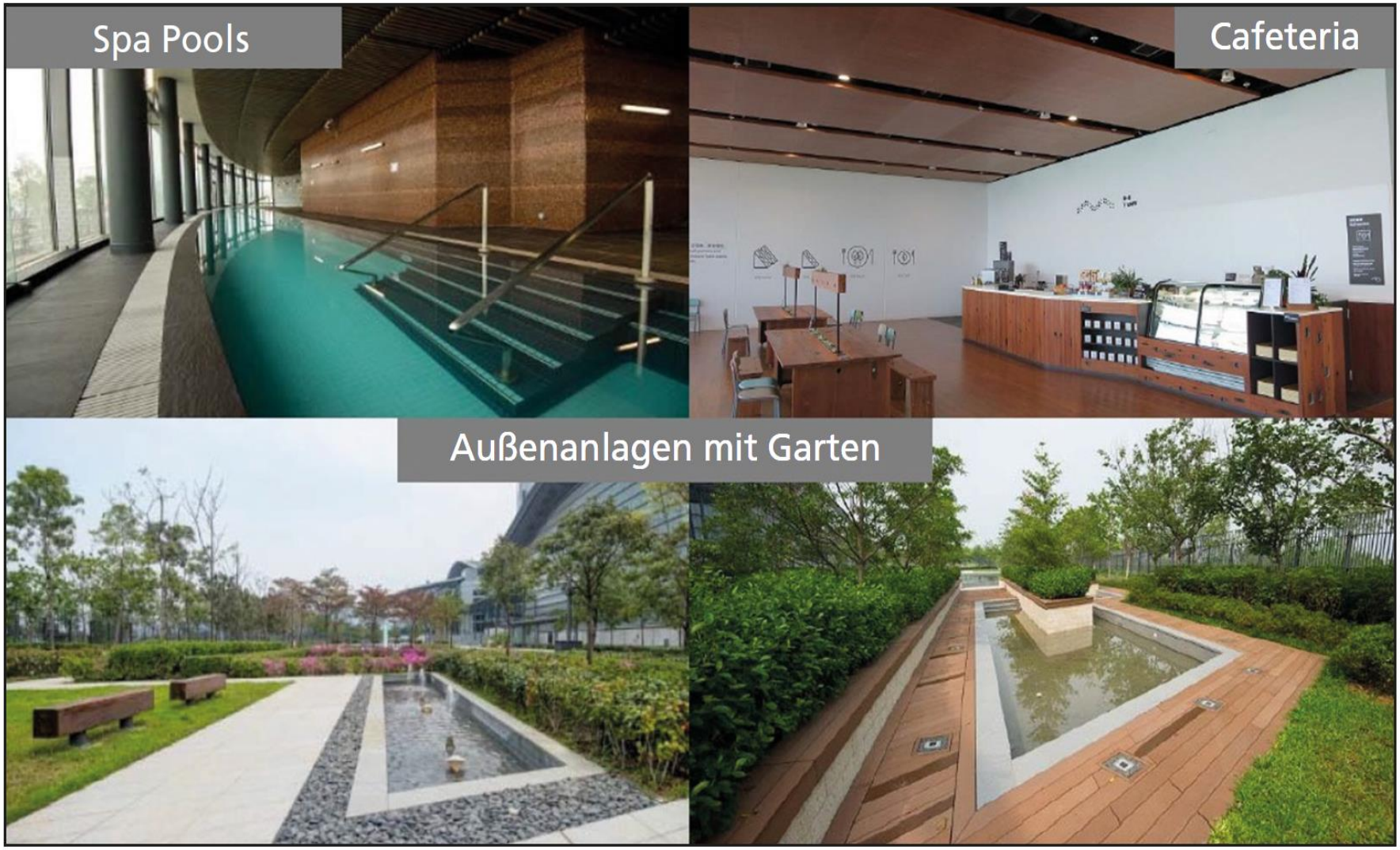


Abgasreinigung

Dampfturbine und Luftkondensator



Umweltzentrum



Umweltzentrum

Inhalt

- Einführung und Rahmenbedingungen
- Technologien der thermischen Klärschlammverwertung
- Zwei Praxisbeispiele
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

- **Die Entsorgungskosten für die Klärschlammbehandlung zeigen eine steigende Tendenz aufgrund geänderter Rahmenbedingungen wie**
  - Vermehrte Mengen an Wirtschaftsdüngern (Klärschlamm, Gülle, Gärrest) treffen auf Einschränkungen bei der Flächenverfügbarkeit in der Landwirtschaft
  - Reduzierung der Kapazitäten in der Mitverbrennung bei Kraftwerden, Zementwerken und Abfallverbrennungsanlagen
  - Die Novelle der AbfKlärV
- **Eine Beendigung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung erfordert neue thermische Behandlungskapazitäten.**
- **Erwarteter Kapazitätsbedarf ca. 500.000 – 600.000 tTS/a.**
- **Die Bestandsanlagen haben einen erheblichen Sanierungsbedarf.**

Zusammenfassung und Ausblick

- **Verbrennung ist die priorisierte Vorbehandlung für ein effektives P-Recycling. Großtechnische P-Recycling verfahren sind noch nicht am Markt verfügbar.**
- **Notwendigkeit der Zwischenlagerung auf Mono-Deponien mit derzeit weitestgehend ungeklärtem Eigentumsübergang**
- **Erweiterung des Tätigkeitsfelds bzw. auch des Verantwortungsbereiches der Kläranlagen und/oder KVA-Betreiber (ggf. vertragliche Abgrenzungen zwischen Produzenten und Verwertern zu Produktvermarktung)**
- **Zentrale/dezentrale Anlagenstruktur (Standortfrage/Synergienutzungen)**

Zusammenfassung und Ausblick

- **Eigenbetrieb oder Betreibermodell für P-Recyclinganlagen, steuerrechtlicher Aspekte**
- **Qualitätsanforderungen des P-Produktes für die industrielle und/oder landwirtschaftliche Anwendung z. B. durch eine zertifizierte Güteüberwachung**
- **Aufbau von Verkaufs- und Vertriebsnetzen**
- **Konkurrenzsituation für neue Düngemittel, Markt- und Preisentwicklung (P-Recyclinganlage vs. Düngemittelfirmen)**

Herzlichen Dank für Ihr Interesse

Weltgrößte Anlage Hong Kong
Entwässerter Klärschlamm
4x 45.000 Mg_{TS}/a