

Machbarkeitsstudie



**Perspektiven der solaren  
Klärschlamm-trocknung im Land  
Bremen**

**Anhang**

für

Bremer Energie-Konsens GmbH  
Am Wall 140

28195 Bremen

vom

Institut für Kreislaufwirtschaft GmbH  
Neustadtswall 30

28199 Bremen, Germany

Tel.: +49 (0)421 5905 2311

Fax: +49 (0)421 5905 2349

Mail: [IKrW@hs-bremen.de](mailto:IKrW@hs-bremen.de)

Homepage: [www.IKrW.de](http://www.IKrW.de)

Juni 2005

## Anhang A1: Verfahrensfließbild der VERA

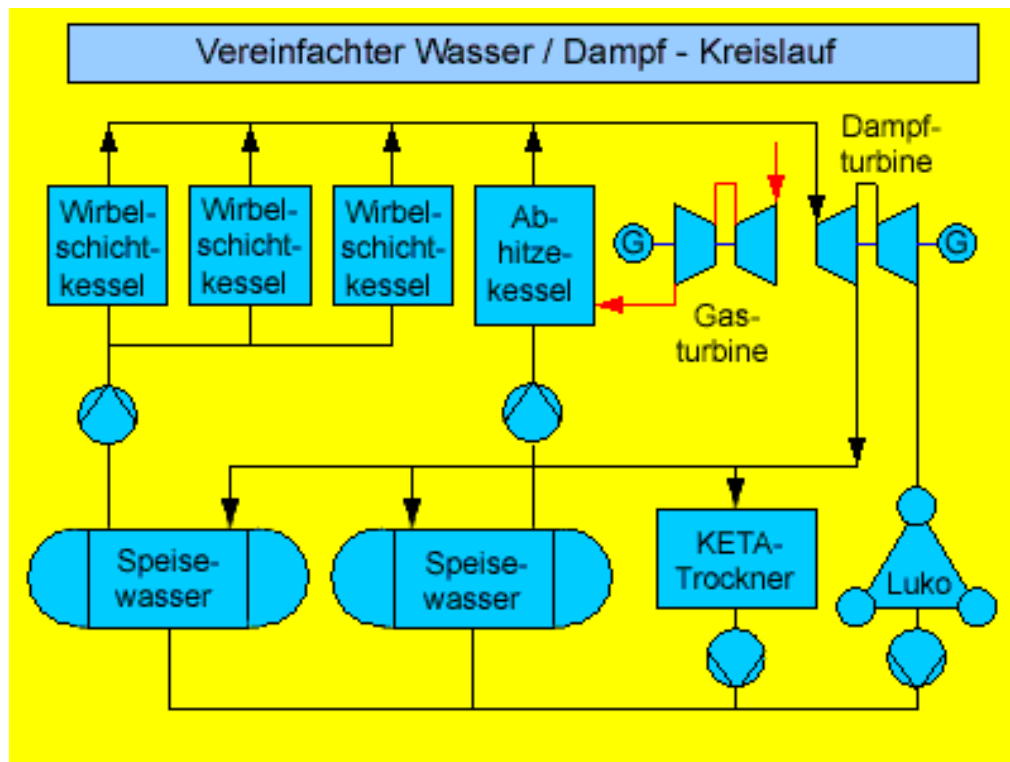


Abbildung A1: Wasser-Dampf-Kreislauf der VERA [[www-verahamburg.de](http://www-verahamburg.de)]

## Anhang A2: Anlagenspezifische Kenndaten der VERA

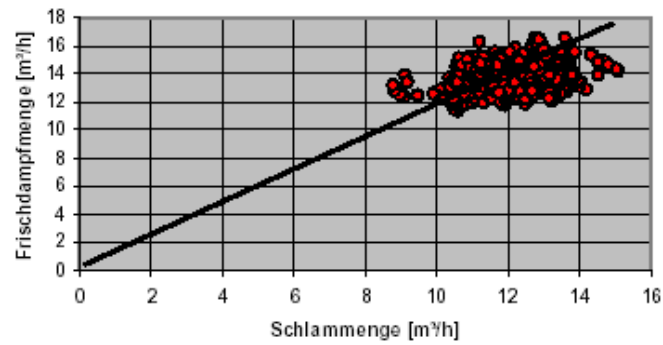


Abbildung A2.1: Erzeugte Frischdampfmenge in der VERA (bezogen auf Klärschlamm mit einem Heizwert von 4.200 kJ/kg) [Mineur, 2004]

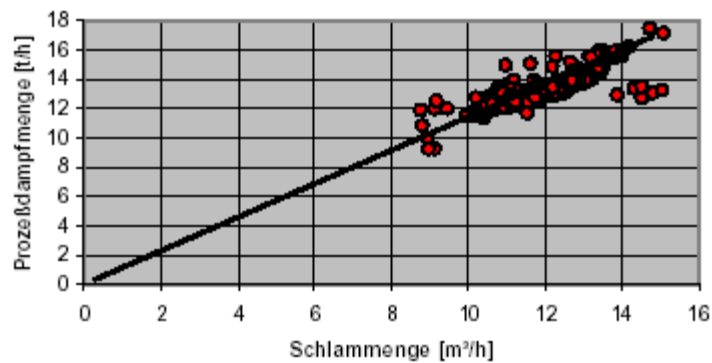


Abbildung A2.2: VERA - Benötigte Prozessdampfmenge zur Klärschlamm-trocknung [Mineur, 2004]

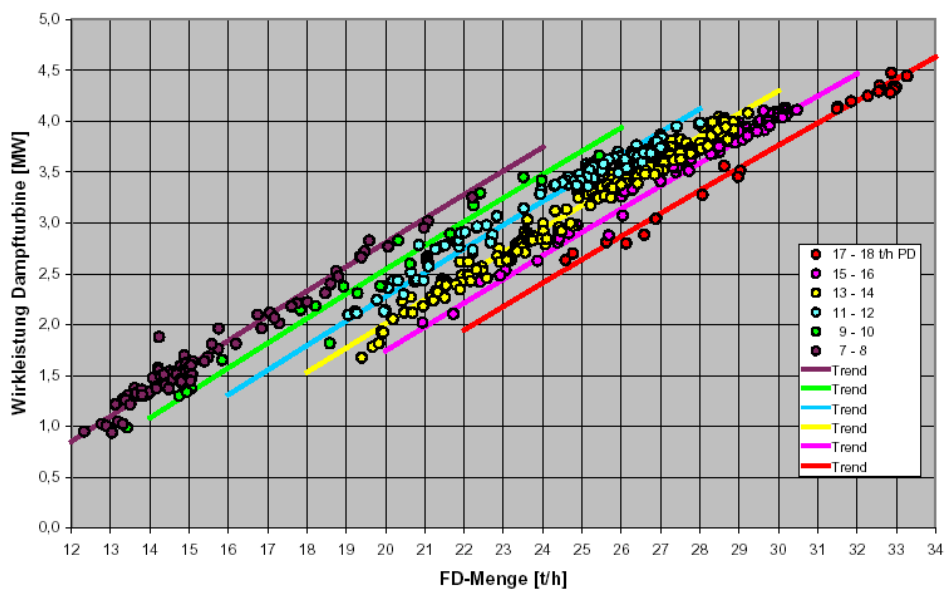


Abbildung A2.3: VERA – Entnahmediagramm der Dampfturbine [Mineur, 2004]

## Anhang A3: CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Vergleichsvarianten

### Rechenwerte

Emissionsfaktoren	Einheit	Wert
Diesel	[g/kWh]	266
Erdgas	[g/kWh]	201
Steinkohle	[g/kWh]	335
Strom-Mix Bremen	[g/kWh]	856
Fernwärme	[g/kWh]	191

Annahmen	Einheit	Wert
Energieinhalt Diesel	[MJ/l]	35,7
Hu Erdgas	[kWh/m <sup>3</sup> ]	8,816

### Variante ST: Solare Trocknung

	Elektrischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Mix [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Elektrische Energie	154.280	856	132

	Dieseleinsatz [l/a]	Energieinhalt Dieseldieselkraftstoff [MJ/l]	Energieinhalt Diesel [GJ/a]	Energieinhalt Diesel [kWh/a]	Emissionsfaktor Diesel [g/kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Dieseleinsatz	8.000	35,7	286	79.333	266	21

### Variante ST+A: Solare Trocknung (mit Abwärmenutzung)

	Elektrischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Mix [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Elektrische Energie	154.280	856	132

	Dieseleinsatz [l/a]	Energieinhalt Dieseldieselkraftstoff [MJ/l]	Energieinhalt Diesel [GJ/a]	Energieinhalt Diesel [kWh/a]	Emissionsfaktor Diesel [g/kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Dieseleinsatz	6.000	35,7	214	59.500	266	16

	Thermischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Bereitstellung Fernwärme [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Bereitstellung Warmwasser	4.818.000	191	920

### Variante KT: Konventionelle Trocknung (Erdgas)

	Elektrischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Mix [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Elektrische Energie	954.750	856	817

	Erdgasverbrauch [m <sup>3</sup> ]	Unterer Heizwert (Hu) Erdgas [kWh/m <sup>3</sup> ]	Einsatzmenge Erdgas (bezogen auf Hu) [kWh/a]	Emissionsfaktor Erdgas [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Einsatz Erdgas	697.500	8,816	6.149.160	201	1.236

### Variante KT+A: Konventionelle Trocknung mit Abwärmenutzung

	Elektrischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Mix [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Elektrische Energie	954.750	856	817,27

	Thermischer Energiebedarf [kWh/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Bereitstellung Fernwärme [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Bereitstellung Warmwasser	6.990.000	191	1.335

## Anhang A4: CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Szenarien

### Rechenwerte

Emissionsfaktoren	Einheit	Wert
Strom-Mix Deutschland	[g CO <sub>2</sub> /kWh]	639
Erdgas	[g/kWh]	201
Steinkohle	[g/kWh]	335
Strom-Mix Bremen	[g/kWh]	856

### Szenario St: Solare Trocknung

Annahmen	Einheit	Wert	Anmerkung
Transportentfernung KA Seehausen - VERA	[km]	100	
Spezifischer Emissionsfaktor Transport	[g CO <sub>2</sub> /(km Mg)]	186	
Untere Heizwert KS (70% TS, 55% oTS)	[kJ/kg]	8.200	
Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung	[kWh/Mg OS]	1,3	
VERA - Auslegung Heizwert Klärschlamm	[kJ/kg]	4.200	
VERA - Auslegung TS-Input KS	[%]	42,00	
VERA - Dampfproduktion aus KS	[Mg/m <sup>3</sup> ]	1,17	
VERA - Stromproduktion aus Dampf	[kWh/Mg]	245	
VERA Eigenstromverbrauch	[GJ/Mg TS]	0,117	Kesselanlage, Rauchgasreinigung

### CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

	Schlammmenge (6% OS/a) [Mg OS/a]	Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung [kWh/Mg OS]	Stromverbrauch [kWh/a]	Emissionsfaktor Strom-Mix Bremen [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen Strombedarf Zentrifuge [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Strombedarf Entwässerung	50.000	1,3	65.000	856	55,64

	CO <sub>2</sub> -Emissionen Strombedarf solare KST [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Strombedarf solare Trocknung	132,06

	CO <sub>2</sub> -Emissionen Dieseleinsatz solare KST [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Dieseleinsatz solare Trocknung	21,10

	Transport-entfernung einfach [km]	Transportmenge [Mg/a]	Spezifischer Emissionsfaktor Transport (LKW) [g CO <sub>2</sub> /km Mg]	CO <sub>2</sub> -Emissionen Klärschlammtransport [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Klärschlammtransport (Strasse)	100	4.286	186	79,71

Rückfahrten (Leehfahrten) werden nicht berücksichtigt

### Klärschlammverbrennung in der VERA

	Dampfproduktion aus KS (Auslegungsgröße) [Mg/m <sup>3</sup> ]	Dampfproduktion aus KS (Auslegungsgröße) [Mg/Mg OS]	Verhältnis: Heizwert Auslegungsgröße VERA -eingesetzter Klärschlamm [-]	Dampfproduktion aus solar getrockneten KS (70% S) [Mg/Mg OS]	Dampfproduktion aus solar getrockneten KS (70% S) [Mg/Mg TS]
Dampfproduktion	1,17	1,17	1,95	2,28	3,26

	Stromproduktion aus Frischdampf [kWh/Mg]	Spezifische Stromproduktion aus solar getrockneten KS [kWh/Mg TS]	Stromproduktion aus solar getrocknetem KS [kWh/a]	Spezifischer Eigenstrombedarf VERA (GJ/Mg TS)	Spezifischer Eigenstrombedarf VERA [kWh/Mg TS]	Eigenstrombedarf VERA bezogen auf Einsatzmenge KS [kWh/a]	Netto Mehrstromproduktion VERA [kWh/a]
Stromproduktion	245	800	2.398.500	0,12	32,5	97.500	2.301.000

	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Produktion [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Gutschrift aus Stromproduktion [Mg CO <sub>2</sub> /a]
CO <sub>2</sub> -Gutschrift aus Stromproduktion	639	1.470

### Szenario ST+A: Solare Trocknung mit Abwärmenutzung

Annahmen	Einheit	Wert	Anmerkung
Spezifische Emissionen Schiffstransport	[g CO <sub>2</sub> /(Mg km)]	41	
Heizwert Kohle (Hu)	[kJ/kg]	27.600	
Untere Heizwert KS (70% TS, 60% oTS)	[kJ/kg]	8200	
Transportentfernung	[km]	30	
Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung	[kWh/Mg OS]	1,3	

### CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

	Transportmenge (6% TS) [Mg/a]	Transportentfernung [km]	Spezifische Emissionen Transport [g CO <sub>2</sub> / Mg km]	CO <sub>2</sub> -Emissionen Transport (Schiff) [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Klärschlammtransport (Schiff)	50.000	30	41	61,5

	Schlammnege (6% TS) [Mg/a]	Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung [kWh/Mg]	Stromverbrauch [kWh/a]	Emissionsfaktor Strom-Mix Bremen [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Strombedarf Entwässerung	50.000	1,3	65.000	856	55.64

	CO <sub>2</sub> -Emissionen Strombedarf solare KST [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Strombedarf solare Trocknung	132,06

	CO <sub>2</sub> -Emissionen Bereitstellung Warmwasser [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Solare Trocknung, Bereitstellung Warmwasser	920,24

	CO <sub>2</sub> -Emissionen Dieseleinsatz solare KST [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Dieseleinsatz solare Trocknung	15,83

### Klärschlammverbrennung KW Farge

	Unterer Heizwert getrockneter KS [kJ/kg]	Einsatzmenge Klärschlamm [Mg/a]	Energieinhalt Klärschlamm [GJ/a]	Heizwert Kohle (Hu) [kJ/kg]	Substitution von Steinkohle [Mg/a]
Substitution von Steinkohle	8200	4.286	35.143	27.600	1.273

	Substitution von Steinkohle [kWh/a]	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor Steinkohle [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Gutschrift KS-Verbrennung KW Farge [Mg CO <sub>2</sub> /a]
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	9.761.905	335	3.270

### Referenzszenario: Verbrennung in VERA in Hamburg

Annahmen	Einheit	Wert	Anmerkung
Entfernung KA Seehausen -VERA (Seeweg)	[km]	300	
Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung	[kWh/Mg OS]	1,3	
KETA: Spezifischer Strombedarf	[kWh/Mg H <sub>2</sub> O]	100	
Heizwert Hu KS getrocknet 42% TS	[kJ/kg]	4.400	
VERA: Eigenstromverbrauch	[GJ/Mg TS]	0,117	Kesselanlage, Rauchgasreinigung
VERA: Mehrstromerzeugung durch Klärschlamm vorgeschaltete Trocknung	[kWh/Mg OS]	286	
	[kWh/Mg OS]	136	

### CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

	Transportmenge (6% TS) [Mg/a]	Transportentfernung [km]	Spezifische Emissionen Transport [g CO <sub>2</sub> / Mg km]	CO <sub>2</sub> -Emissionen Transport (Schiff) [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Klärschlammtransport (Schiff)	50.000	300	41	615

### Klärschlammverbrennung VERA HH

	Mehrstromerzeugung durch eingesetzte Menge Klärschlamm [kWh/Mg OS]	Verminderung der Stromproduktion durch Klärschlamm-trocknung [kWh/Mg OS]	Mehrstromerzeugung [kWh/Mg OS]	Mehrstromerzeugung [kWh/Mg TS]	Mehrstromerzeugung für eingesetzte Menge Klärschlamm [kWh/a]
VERA: Mehrstromerzeugung	286	136	150	357	1.071.429

	Elektrischer Eigenenergiebedarf [GJ/Mg TS]	Elektrischer Eigenenergiebedarf [kWh/Mg TS]	Elektrischer Eigenenergiebedarf für eingesetzte Menge Klärschlamm [kWh/a]	Nettomehrstromerzeugung aus eingesetzter Menge Klärschlamm [kWh/a]
VERA: Netto-Mehrstromerzeugung	0,12	32,50	97.500	973.929

	Schlammnege (6% TS) [m <sup>3</sup> /a]	Spezifischer Stromverbrauch Entwässerung [kWh/Mg]	Stromverbrauch [kWh/a]
Strombedarf Entwässerung	50.000	1,3	65.000

	Netto Stromproduktion (Einspeisung in das öffentliche Netz)	Spezifischer Emissionsfaktor Strom-Produktion [g CO <sub>2</sub> /kWh]	CO <sub>2</sub> -Gutschrift aus Stromproduktion [Mg CO <sub>2</sub> /a]
Netto Stromproduktion	908.929	639	581