TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH

Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik, Professur für Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

Ermittlung von emissionsbezogenen Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung

Rudi Karpf

Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz
30. und 31. Januar 2012

DRESDEN concept
Exzellenz aus Wissenschaft und Kultur

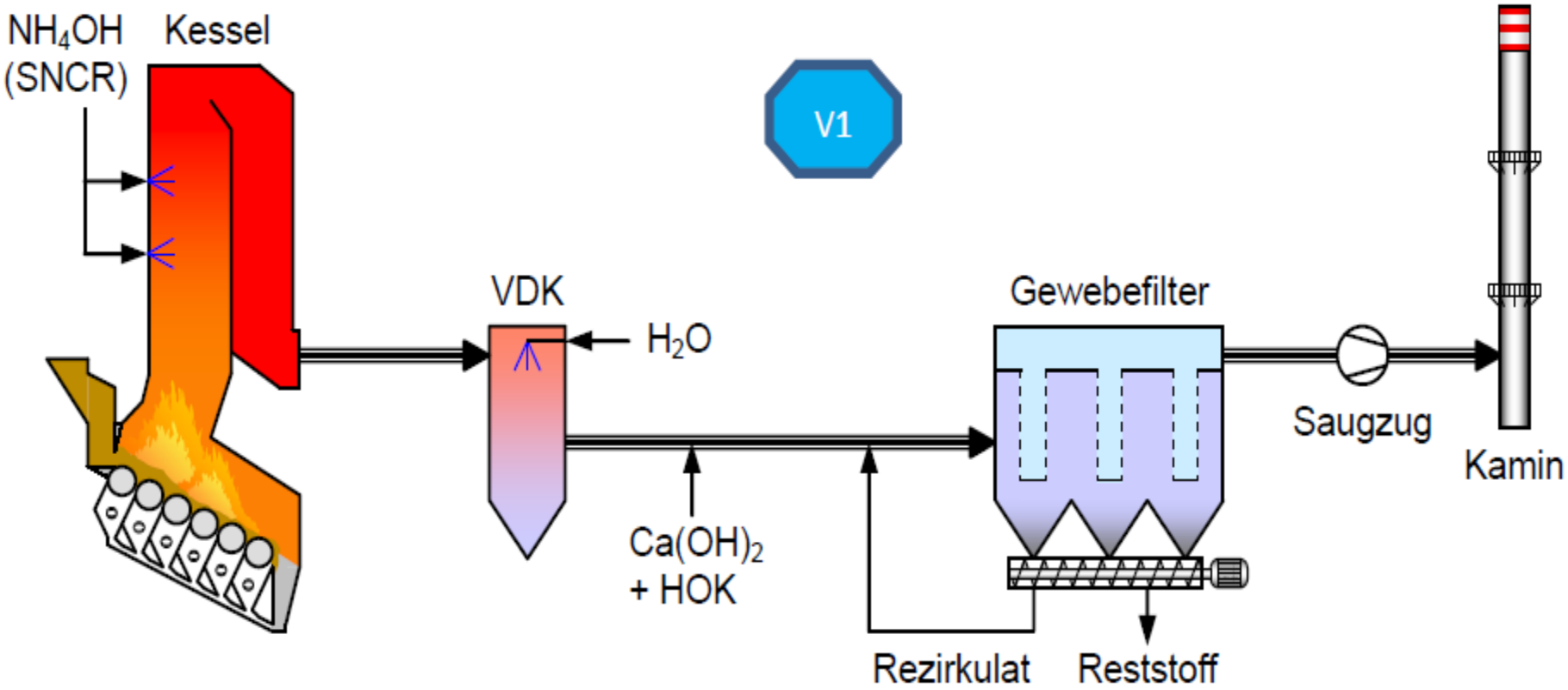
Aufgabenstellung – Ziele der Untersuchung

Was sind die zukünftigen Anforderungen an die Abgasreinigung

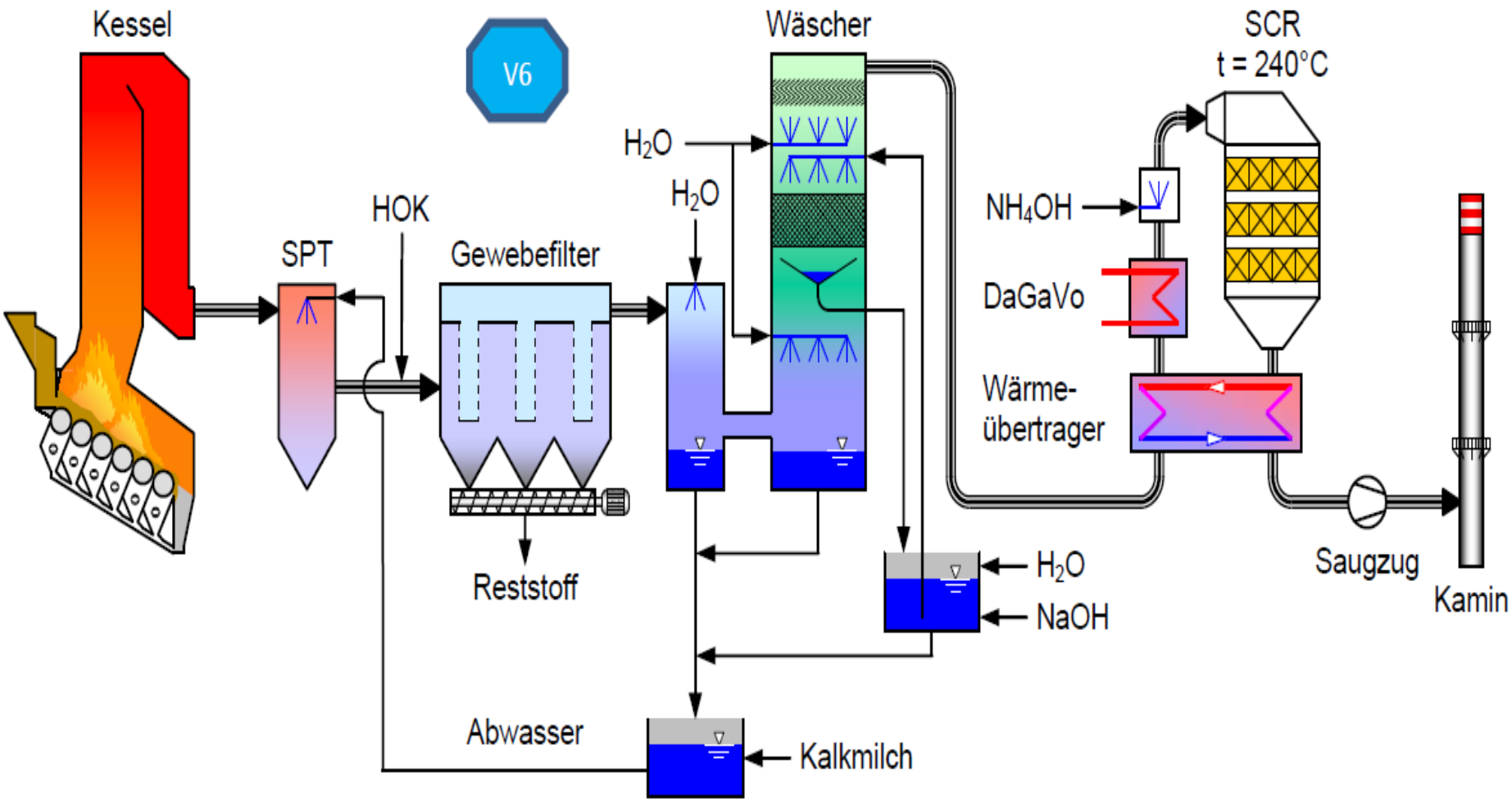
- *weitere Emissionsminderung*
- *ressourcenschonender Betriebsmitteleinsatz*
- *Energieeffizienz*
- *niedrige Kosten*

Emissionsbezogene Energiekennzahlen

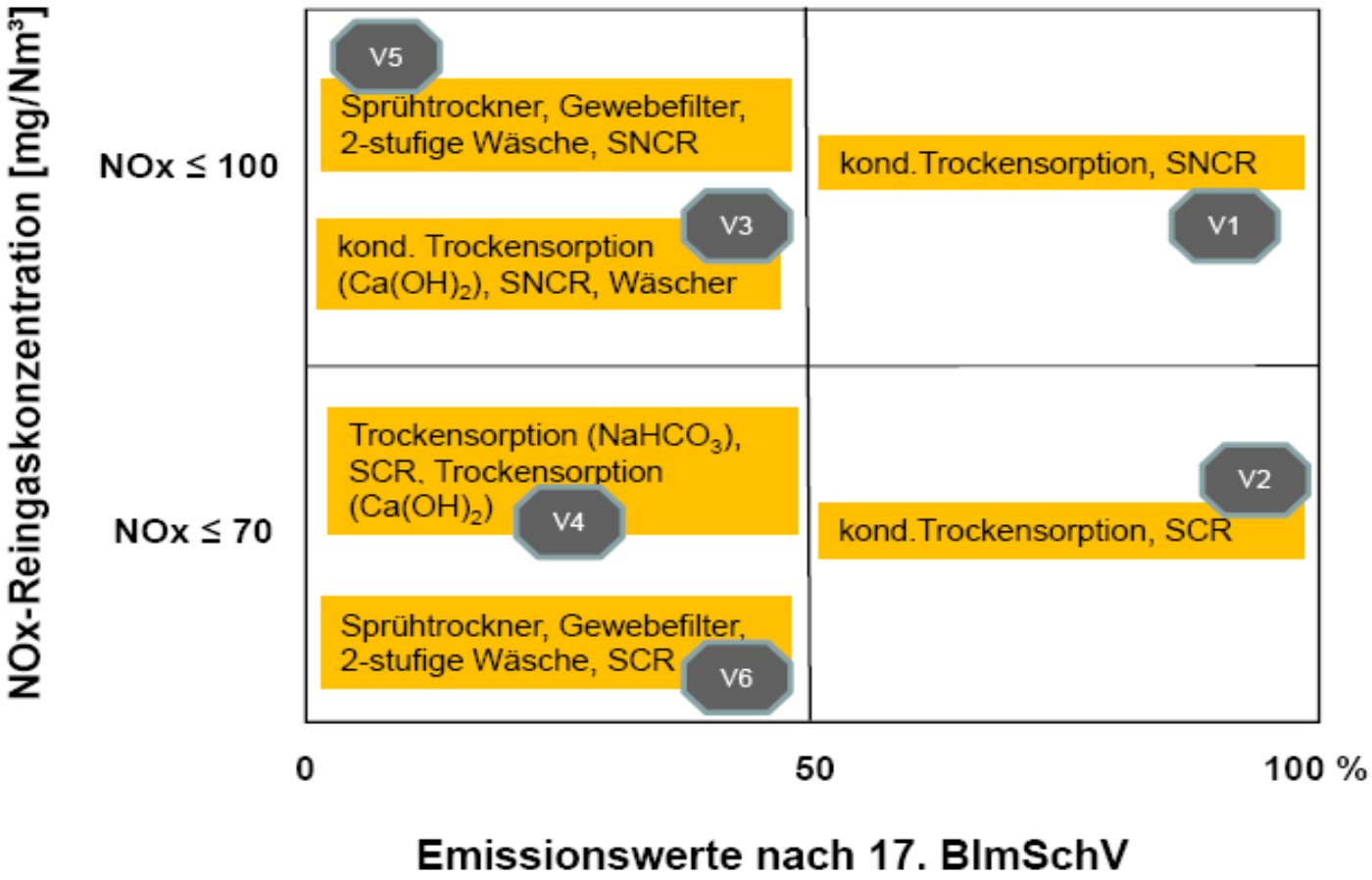
Verfahrenskonzepte



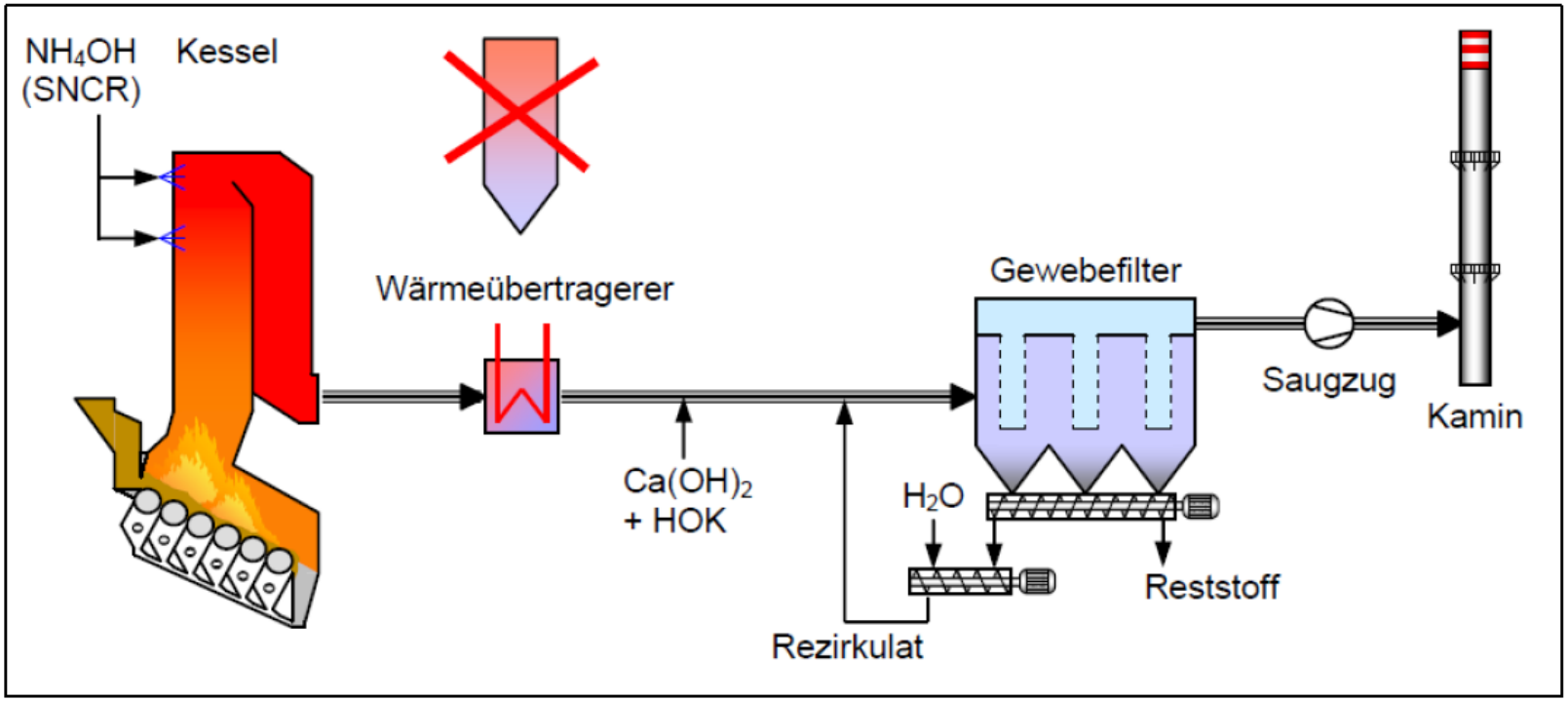
Verfahrenskonzepte



Vorgehensweise

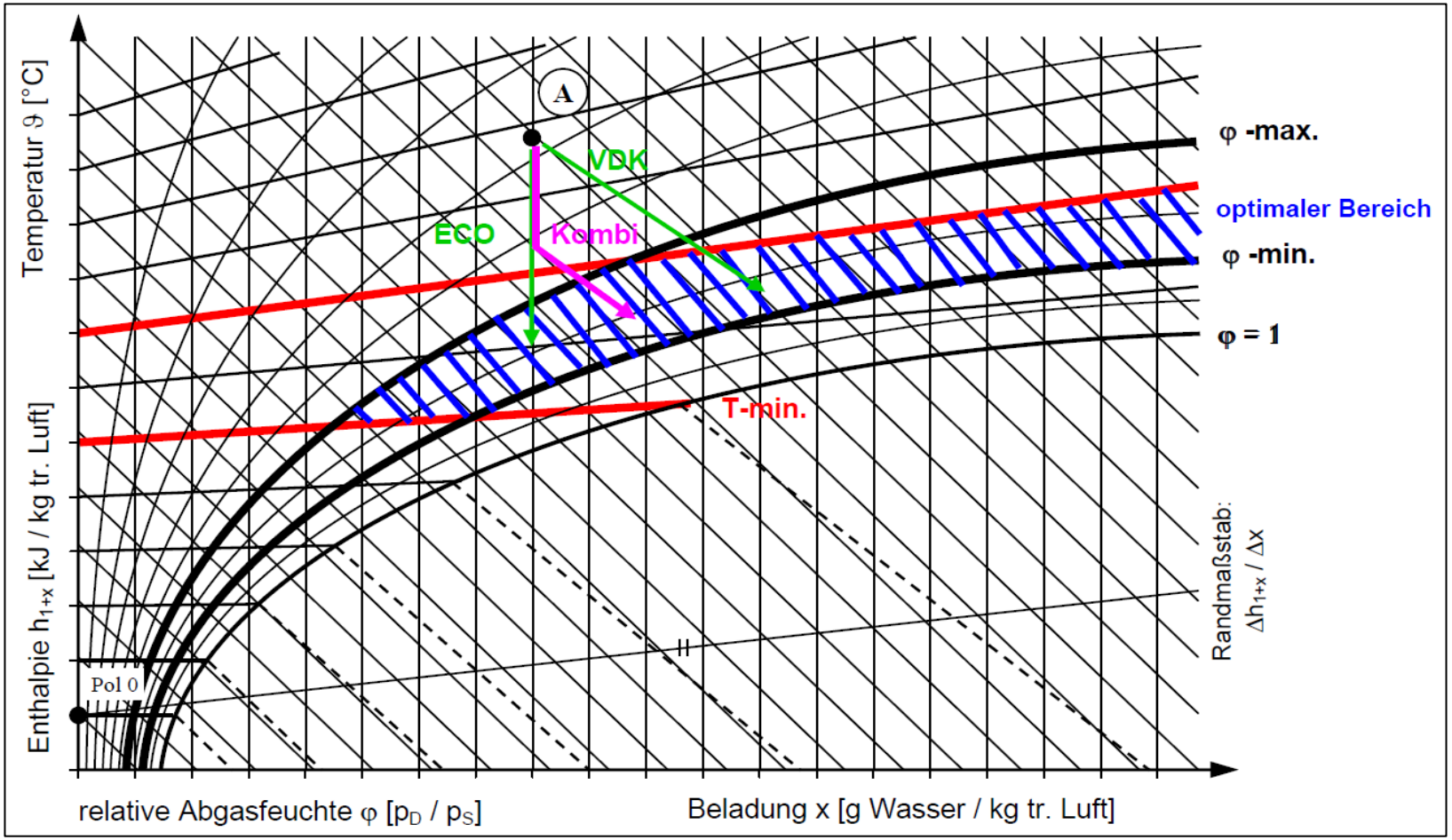


Energieoptimierte Konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat, und SNCR-Verfahren (V1‘)



Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV, NOx ≤ 100 mg/m³i.N. tr.

Verfahrensoptimierung durch eine weitergehende Energieauskopplung



Ermittlung der Energiebilanz

Damit die Verfahren/Komponenten miteinander verglichen werden können, werden die Kumulierten Primärenergieaufwendungen (KEA).

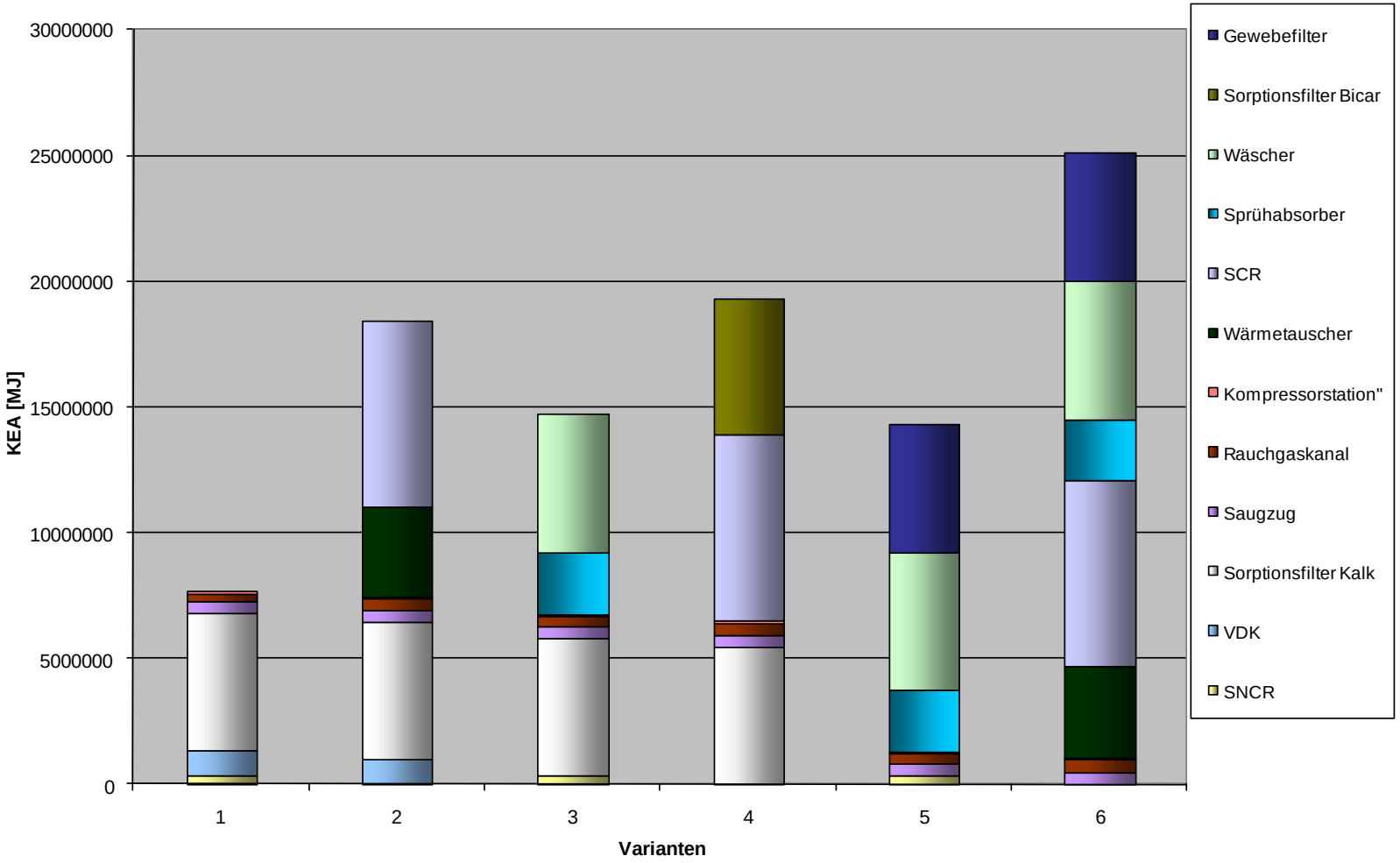
$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

KEA-Herstellung

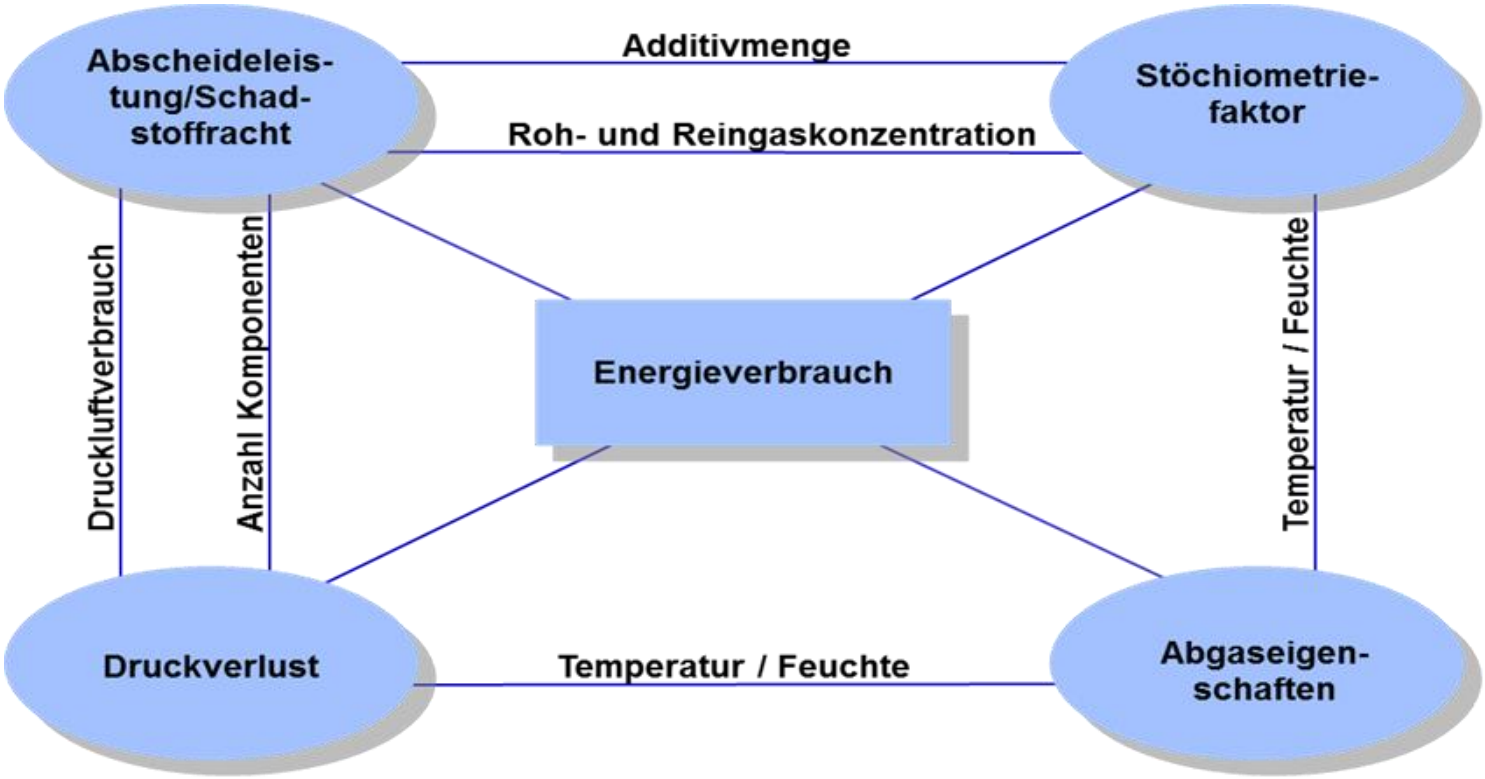
Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
Gewebefilter											
Stahlbau/Apparatebau											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	140000			1				140000	19,90	2878099,17
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			150				217,5	19,90	4328,25
Filtergehäuse incl. Trichter	Stahl	45000			1				45000	19,90	925103,31
Filterschläuche	PP	1170			1				1170	298,00	348660,00
Isolierung	Steinwolle	7600			1				7600	14,72	115554,55
Schnecke	Stahl	140			8		6		6720	19,90	133728,00
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Verblechung	Stahl	3040			1				3040	19,90	62495,87
Vorlagegefäß	Stahl	700			2				1400	19,90	27860,00
								Gesamt	210214,5		
Bodenplatte Bauleistung											
Beton	Beton	52553,63	0,25	2200						0,99	52217,28
Stahl	Stahl	4813,91	0,02							19,90	95796,85
Elektroinstallationen											
Motoren											95,93
Kabel									3900,67		197766,22
Heizung											48745,55
										Summe	**4991284,27**

Gewebefilter								
Verbraucherliste Kabel	NYY J 4x2,5²	NYY J 4x4²	NYY J 5x16²	NYCWY 4x50²	NYCWY 4x120/70²	NYY J 5x25²	Summe auf 100 000 m³/h	KEA [MJ/kg]
Anzahl	8	5	1	3	2	1		
kg/km Kupfer	96	154	768	2203	5308	1200		
kg/km PVC	204	256	487	647	1212	760		
Länge in km	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
Gewicht Kupfer	76,8	77	76,8	660,9	1061,6	120	2764,13	49,43
Gewicht PVC	163,2	128	48,7	194,1	242,4	76	1136,53	53,79
Gesamtgewicht							**3900,67**	

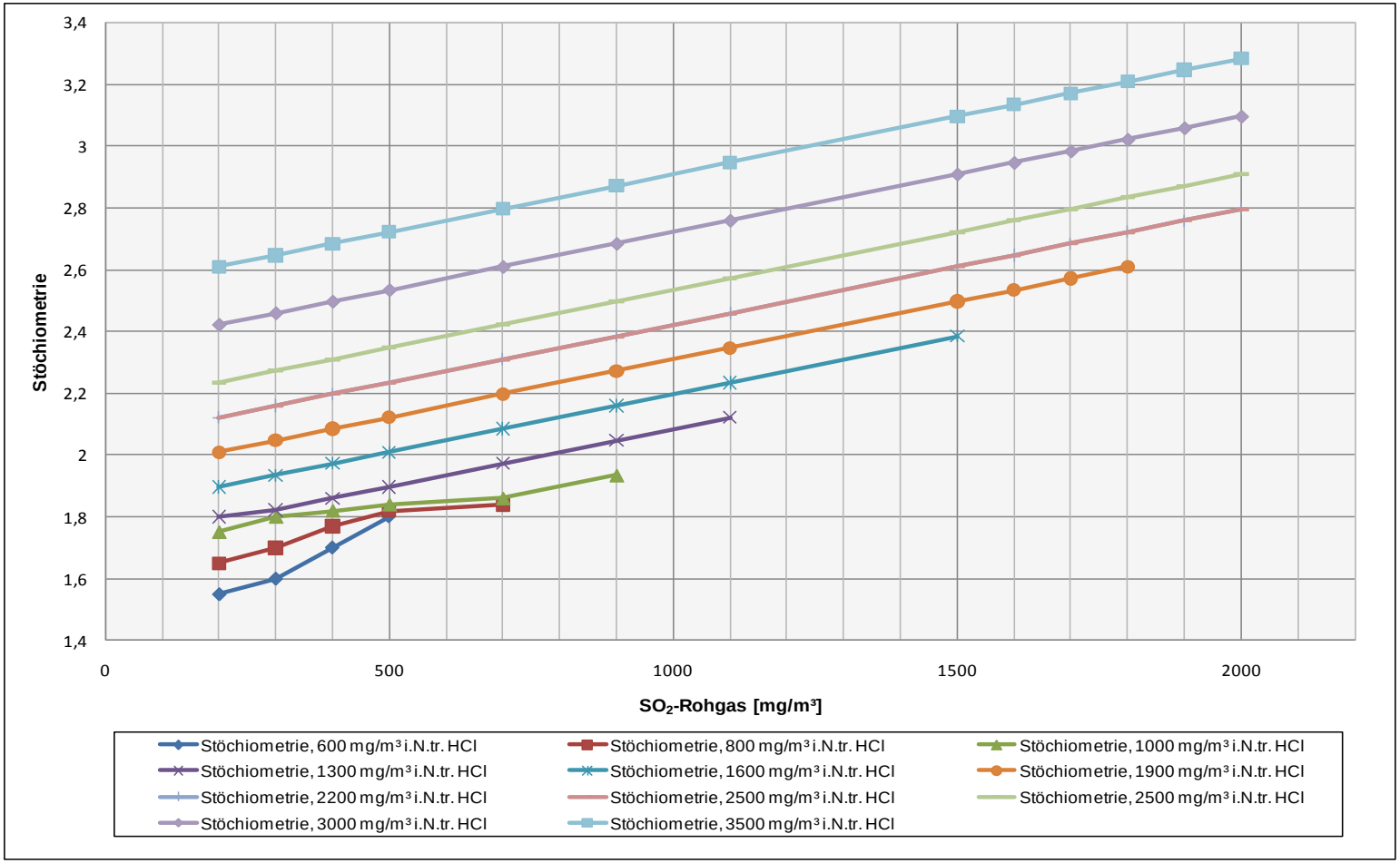
Berechnete KEA_H für die Verfahrensvarianten V1 bis V6 in MJ



Netzstrukturplan der Einflussfaktoren des Energieverbrauch in der Abgasreinigung



Gesamtstöchiometrie als Funktion der SO_2-Rohgaskonzentration für $Ca(OH)_2$

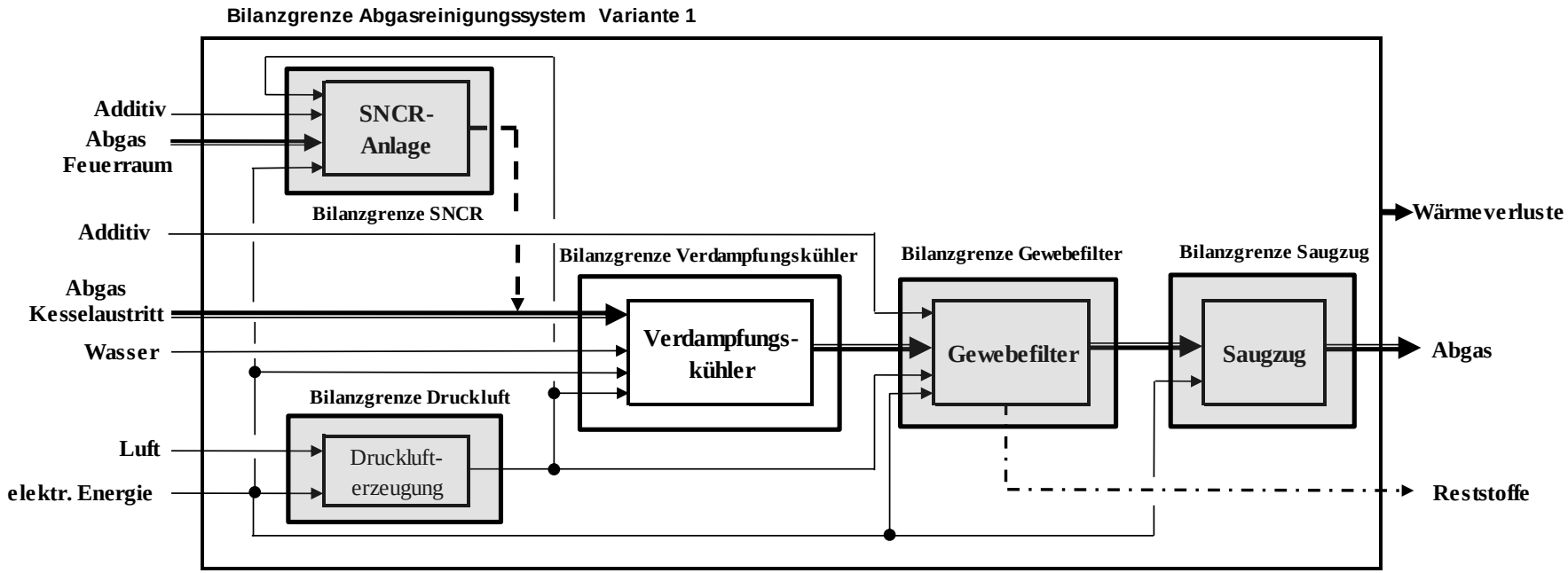


Abgaszusammensetzung als Grundlage für die Massenbilanzen

Die Schadgasbestandteile HCl und SO_2 werden in der Bilanzierung als Wertepaare berücksichtigt!

Lastfall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HCl mg/m³	600	800	1000	1300	1600	1900	2200	2500	3000	3500
SO_2 mg/m³	200	300	400	500	700	900	1100	1500	1700	2000

Blockschaltbild des Abgasreinigungssystem Variante 1 mit den einzelnen Bilanzkreisen



Einzelbilanzkreis am Beispiel Verdampfungskühler

elektr. Energie zum Verdampfungskühler			
Symbol	E_VK		
E [kW]	-	E [kJ/h]	-

Abgas vor Verdampfungskühler			
Symbol	AG_v_VK		
V_f [m³/h]	-	m [kg/h]	-
$V_{tr.}$ [m³/h]	-	H [kJ/h]	-
t [°C]	-	cp [kJ/kgK]	-
CO2 [m³/m³]	-	CO2 [kg/kg]	-
SO2 [m³/m³]	-	SO2 [kg/kg]	-
N2 [m³/m³]	-	N2 [kg/kg]	-
O2 [m³/m³]	-	O2 [kg/kg]	-
H2O [m³/m³]	-	H2O [kg/kg]	-
CO [m³/m³]	-	CO [kg/kg]	-
HCl [m³/m³]	-	HCl [kg/kg]	-
HF [m³/m³]	-	HF [kg/kg]	-
SO3 [m³/m³]	-	SO3 [kg/kg]	-
NH3 [m³/m³]	-	NH3 [kg/kg]	-
NO [m³/m³]	-	NO [kg/kg]	-
NO2 [m³/m³]	-	NO2 [kg/kg]	-

Prozesswasser			
Symbol	PW		
m [kg/h]	-	V [m³/h]	-
H [kJ/h]	-	h [kJ/kg]	-
p [bar a]	-	t [°C]	-
s [kJ/kgK]	-	x [kg/kg]	-

Druckluft Zweistoffdüsen			
Symbol	DL_ZSD		
V [m³/h]	-	m [kg/h]	-
H [kJ/h]	-	h [kJ/kg]	-
ϑ [°C]	-	cp [kJ/kgK]	-
N2 [m³/m³ tr.]	-	N2 [kg/kg]	-
O2 [m³/m³ tr.]	-	O2 [kg/kg]	-
H2O [m³/m³]	-	H2O [kg/kg]	-

Flugstaub im Abgas			
Symbol	FS_i_AG		
m [kg/h]	-	h [kJ/kg]	-
H [kJ/h]	-	c [kJ/kgK]	-
ϑ	-	hC [kJ/kg]	-
C	-	A	-

Verdampfungskühler	
Symbol	VK

Ver-dampfungs-kühler

Verluste			
Symbol	V_VK		
E [kW]	-	E [kJ/h]	-

Abgas nach Verdampfungskühler			
Symbol	AG_n_VK		
V_f [m³/h]	-	m [kg/h]	-
$V_{tr.}$ [m³/h]	-	H [kJ/h]	-
t [°C]	-	cp [kJ/kgK]	-
CO2 [m³/m³]	-	CO2 [kg/kg]	-
SO2 [m³/m³]	-	SO2 [kg/kg]	-
N2 [m³/m³]	-	N2 [kg/kg]	-
O2 [m³/m³]	-	O2 [kg/kg]	-
H2O [m³/m³]	-	H2O [kg/kg]	-
CO [m³/m³]	-	CO [kg/kg]	-
HCl [m³/m³]	-	HCl [kg/kg]	-
HF [m³/m³]	-	HF [kg/kg]	-
SO3 [m³/m³]	-	SO3 [kg/kg]	-
NH3 [m³/m³]	-	NH3 [kg/kg]	-
NO [m³/m³]	-	NO [kg/kg]	-
NO2 [m³/m³]	-	NO2 [kg/kg]	-

Verdampfungsenthalpie Prozesswasser			
Symbol	HVD_PW		
$m_{W,VD}$ [kg/h]	-	$h_{W,VD}$ [kJ/kg]	-
E [kW]	-	E [kJ/h]	-

Flugstaub im Abgas			
Symbol	RFS_i_AG		
m [kg/h]	-	h [kJ/kg]	-
H [kJ/h]	-	c [kJ/kgK]	-
ϑ	-	hC [kJ/kg]	-
C	-	A	-

Ermittlung der Energiebilanz KEA_N

Verbraucher	Energieanfall durch …	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
elektrische Energie	Druckluft	[kW]	118	116	110	66	56	107
	Saugzug	[kW]	240	500	366	433	363	596
	übrigen Verbraucher	[kW]	81	84	197	100	162	162
	SNCR[6]	[kW]	114	-	114	-	114	-
	Gesamt	[kW]	553	700	787	599	695	865
	$KEA_{N\text{-}Strom}$	[kJ/h]	4.596.253	5.821.200	6.542.197	4.981.284	5.777.125	7.193.340
Additive	$Ca(OH)_2$	[kg/h]	373	372	373	41	122	122
	$NaHCO_3$	[kg/h]	-	-	-	527	-	-
	NaOH	[kg/h]	-	-	6,5	-	160	160
	Aktiv-Koks	[kg/h]	47	47	48	47	47	47
	NH_3	[kg/h]	37	19	37	19	37	19
	$KEA_{Ca(OH)2}$	[kJ/h]	1.348.506	1.347.726	1.349.536	149.144	443.088	442.726
	KEA_{NaHCO3}	[kJ/h]	-	-	-	3.740.280	-	-
	KEA_{NaOH}	[kJ/h]	-	-	46.150	-	1.117.900	1.120.700
	$KEA_{Aktiv\text{-}Koks}$	[kJ/h]	1.785.912	1.786.980	1.790.750	1.771.900	1.779.440	1.786.980
	KEA_{NH3}	[kJ/h]	1.272.528	657.400	1.280.200	657.400	1.273.280	657.400
	$KEA_{N\text{-}Additiv}$	[kJ/h]	4.406.946	3.792.106	4.466.636	6.318.724	4.613.708	4.007.806
Wasser	m_{H2O}	[kg/h]	-	-	10.027	-	8.640	8.621
	KEA_{H2O}	[kJ/h]	-	-	-	-	-	-
Wärme-energie	Wärme	[kJ/h]	-	5.408.587	-	-	-	5.639.058
	$KEA_{NG(eq)}$	[kJ/h]	-	5.462.673	-	-	-	5.695.449
Reststoffe	$m_{Rest.}$	[kg/h]	716	715	726	619	493	494
Transport	$KEA_{N\text{-}Transport}$	[kJ/h]	717.362	706.195	726.303	766.662	525.669	515.661
KEA_N		**[kJ/h]**	9.720.561	15.782.174	11.735.136	12.066.670	10.961.502	17.412.256
Energieauskopplung		[kJ/h]	-	-	-	13.202.286	-	-
KEA Energieauskopplung		[kJ/h]	-	-	-	17.162.972	-	-
$KEA_{N\text{-}Effektiv}$		**[kJ/h]**	**9.720.561**	**15.782.174**	**11.735.136**	**-5.096.302**	**10.961.502**	**17.412.256**
$KEA_{N\text{-}Effektiv}$		**[MW]**	**2,70**	**4,38**	**3,26**	**-1,42**	**3,05**	**4,84**
$KEA_{N\text{-}Effektiv}$ (8000 h/a u. 20 Jahre)		**[GJ]**	**1.555.290**	**2.525.148**	**1.877.622**	**-815.408**	**1.754.800**	**2.785.961**

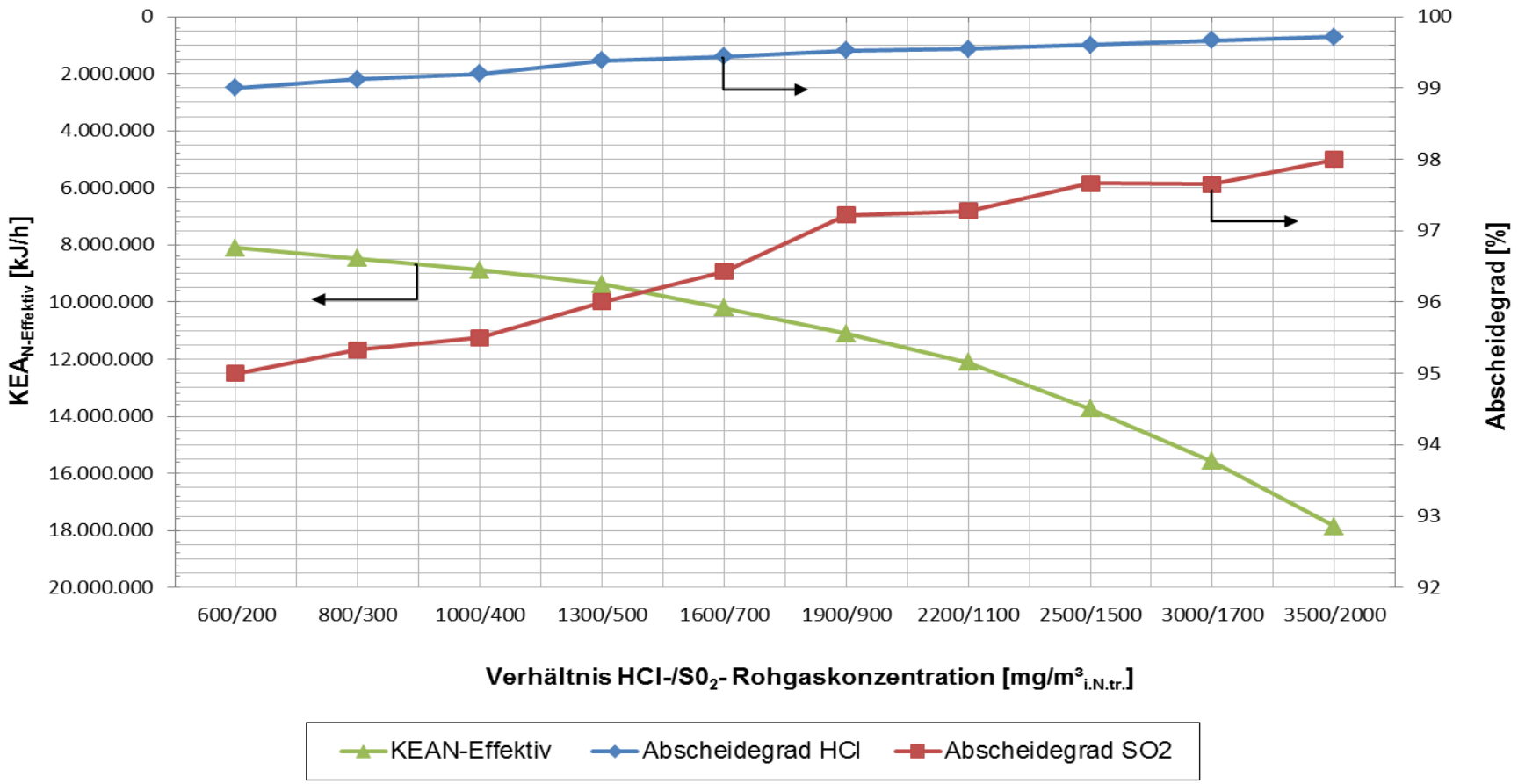
KEA_N für die Verfahrensvarianten V1 bis V6

HCl-Rohgas 1300 mg/m³

SO_2-Rohgas 500 mg/m³

Ermittlung der Energiebilanz KEA_N

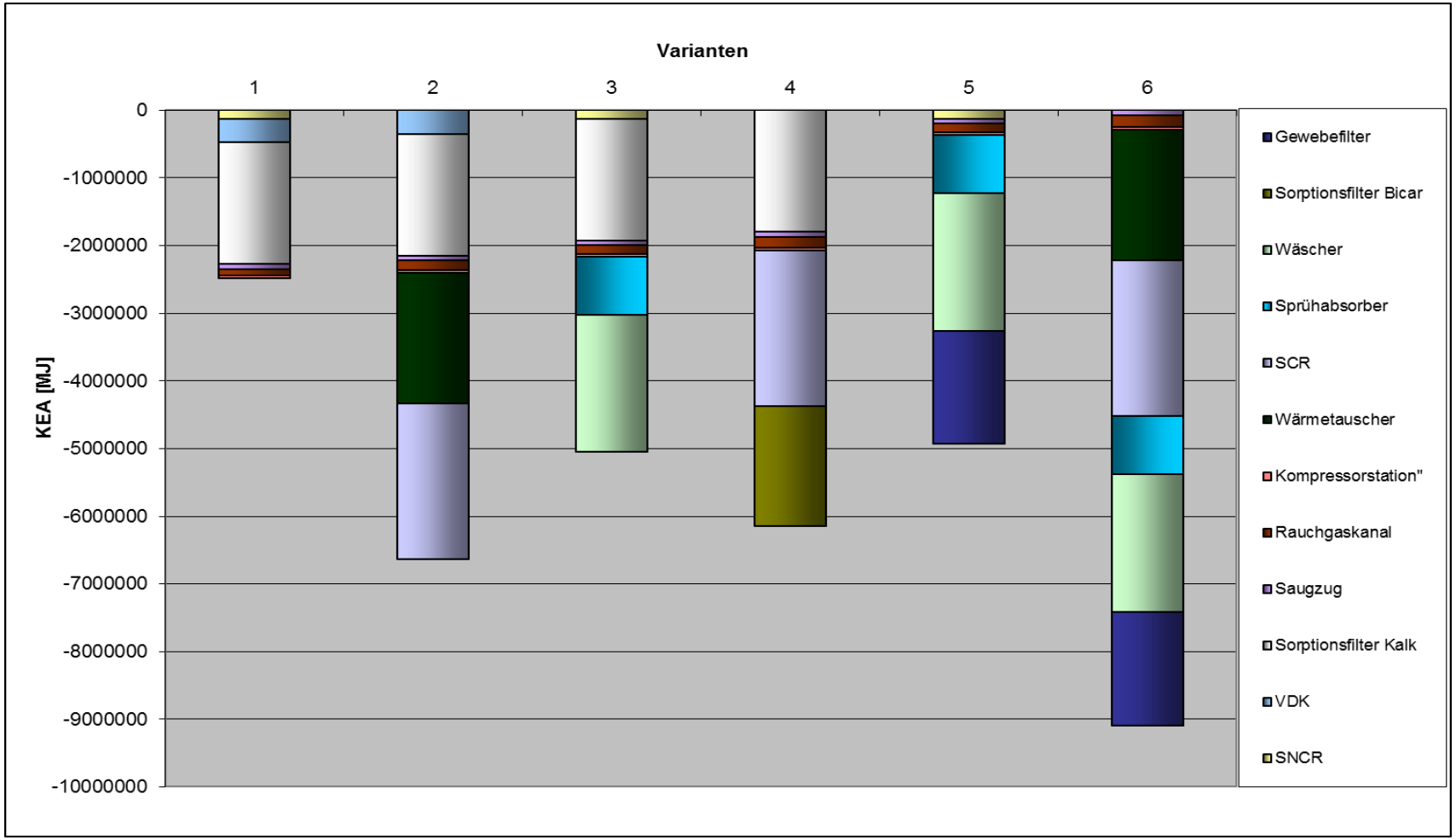
$KEA_{N\text{-}Effektiv}$ sowie HCl-/SO_2-Abscheidegrad für verschiedene Rohgaskonzentrationen der Variante V1



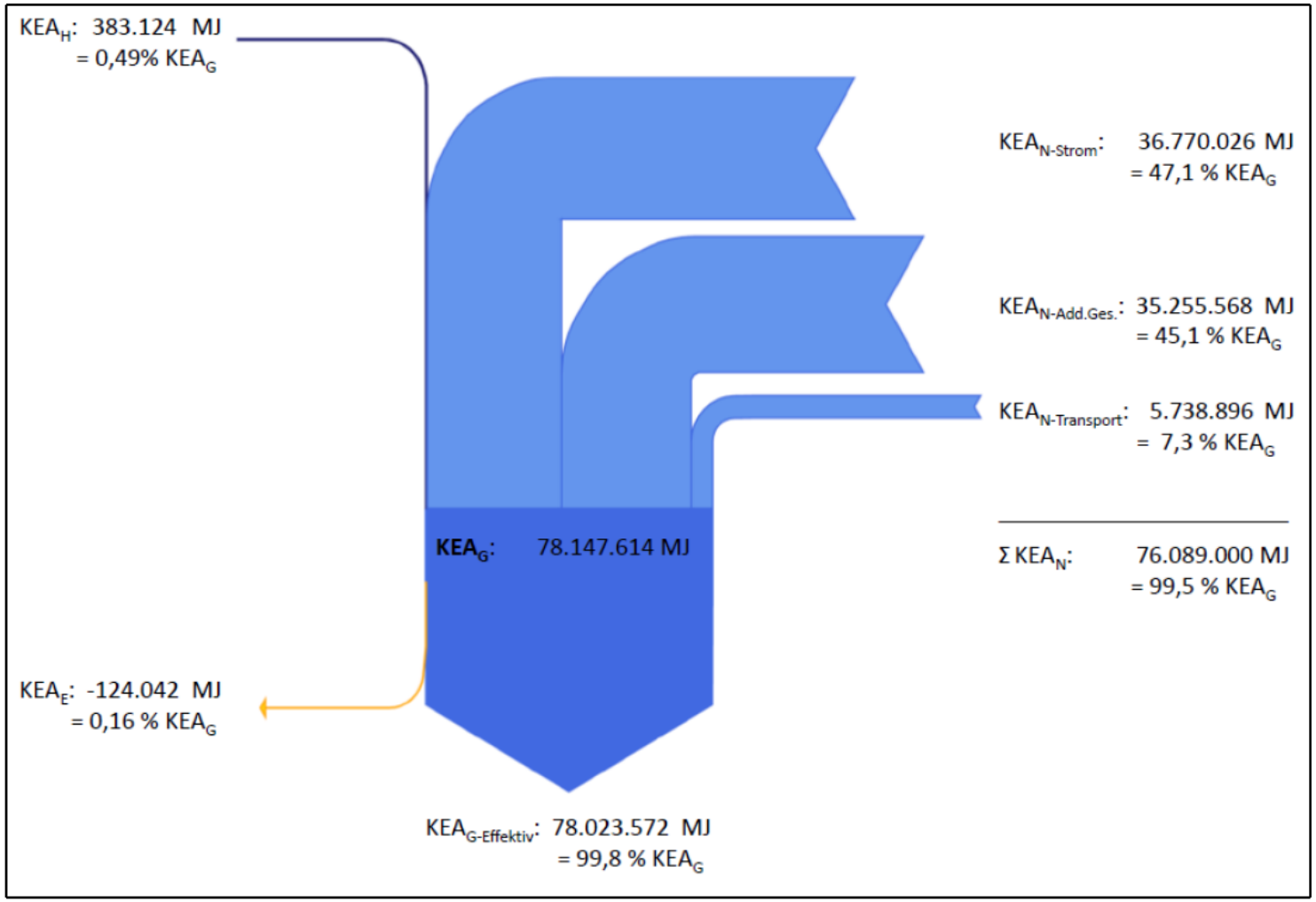
Ermittlung der Energiebilanz KEA_E

Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
E-Filter											
Stahlbau/Apparatebau											
An- und Abströmhaube mit Kanal	Stahl	240			2				480	-7,40	-9921,79
Aufstellungskonstruktion inkl. Gehäuse	Stahl	114190			1				114190	-7,40	-2360351,96
Gasverteilbleche	Stahl	770,4			1				770,4	-7,40	-15924,47
Isolierung	Steinwolle	1207,5			1				1207,5	-6,00	-20237,43
Schnecke	Stahl	140			8		6		6720	-7,40	-138905,03
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	-7,40	-37495,80
Verblechung	Stahl	644			1				644	-7,40	-13311,73
Vorlagegefäß	Stahl	700			2				1400	-7,40	-10360,00
								Gesamt	130478,9		
Bodenplatte Bauleistung											
Beton	Beton	32619,73	0,25	2200						-0,66	-21529,02
Stahl	Stahl	2987,97	0,02							-7,40	-22110,95
Elektroinstallationen											
Motoren											0,00
Kabel									1768,5		-49320,00
Heizung											0,00
HS-Agregat											0,00
Anlagen- und Fudamentabbruch											
4 l Diesel pro Tonne Abbruch									167855,1	0,16	27454,38
Transport											
200 km; 30t; 50%-Beladung									167855,1	0,31	51363,66
										Summe	**-2635195,39**

KEA_E der Einzelkomponenten der jeweiligen Abgasreinigungssysteme (Varianten 1 - 6)

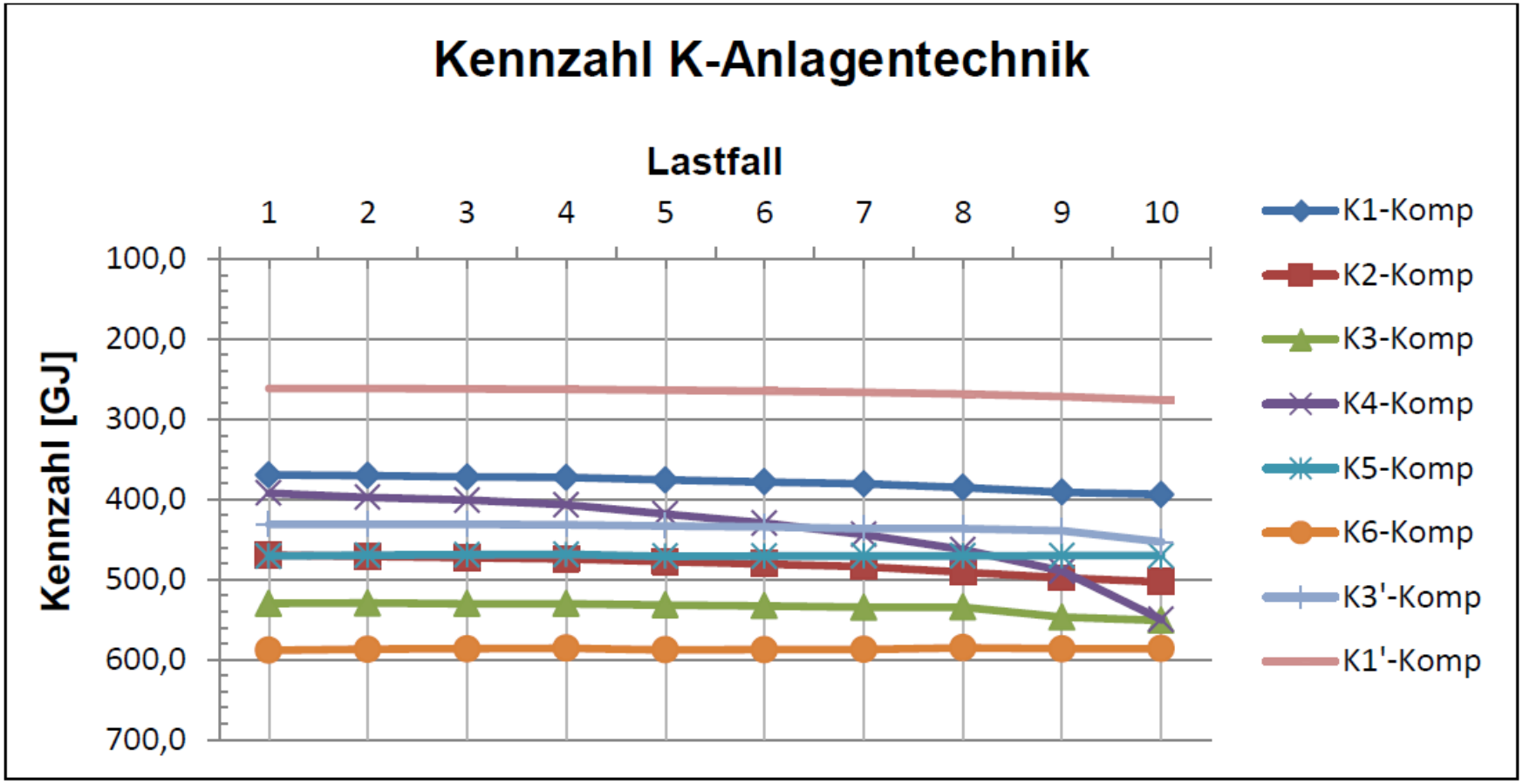


Sankey-Diagramm KEA-Gesamt der Variante V1 (KEA_N für HCl-Rohgas 1.300 mg/m³; SO_2-Rohgas 500 mg/m³)

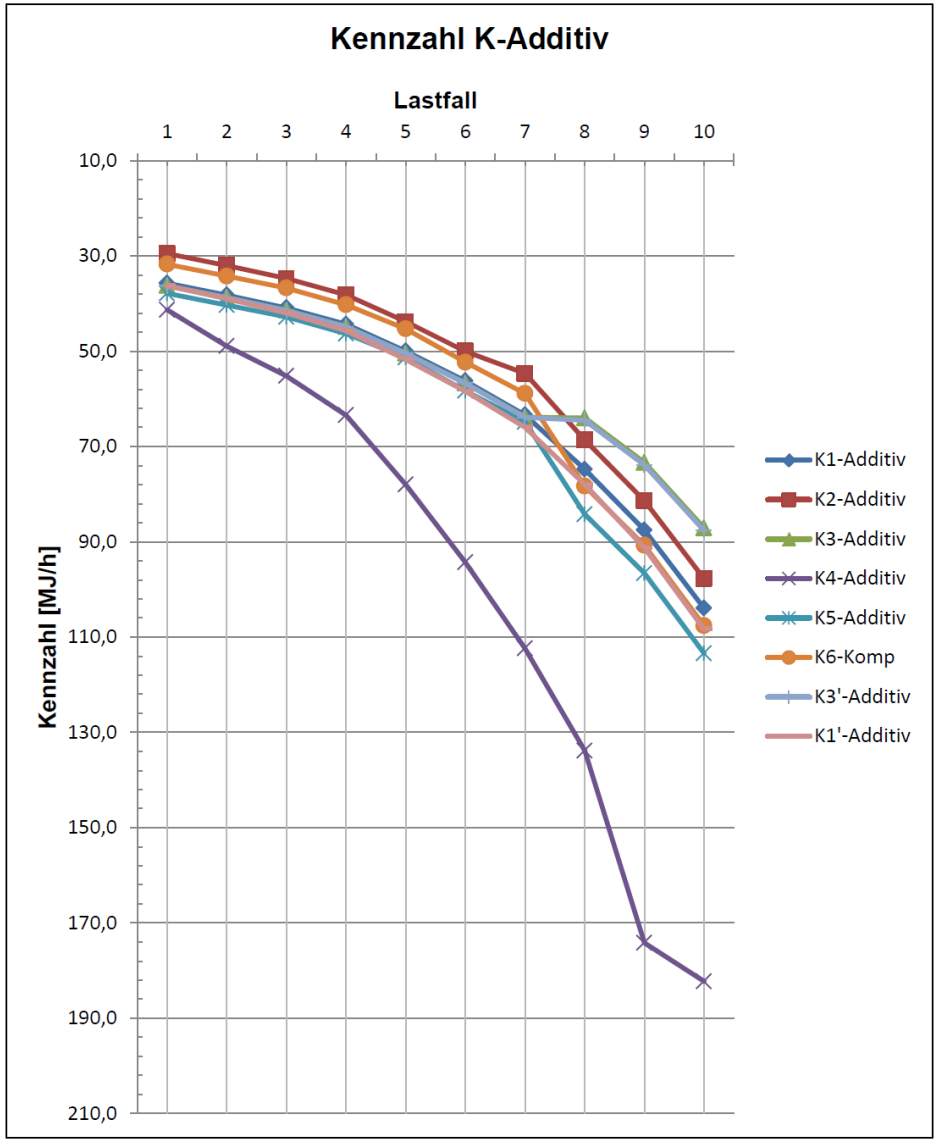


Emissionsbezogene Energiekennzahlen

$$K - Anlagentechnik = \frac{(KEA_{N-Strom} + KEA_H + KEA_E)}{\eta_{HCl}}$$



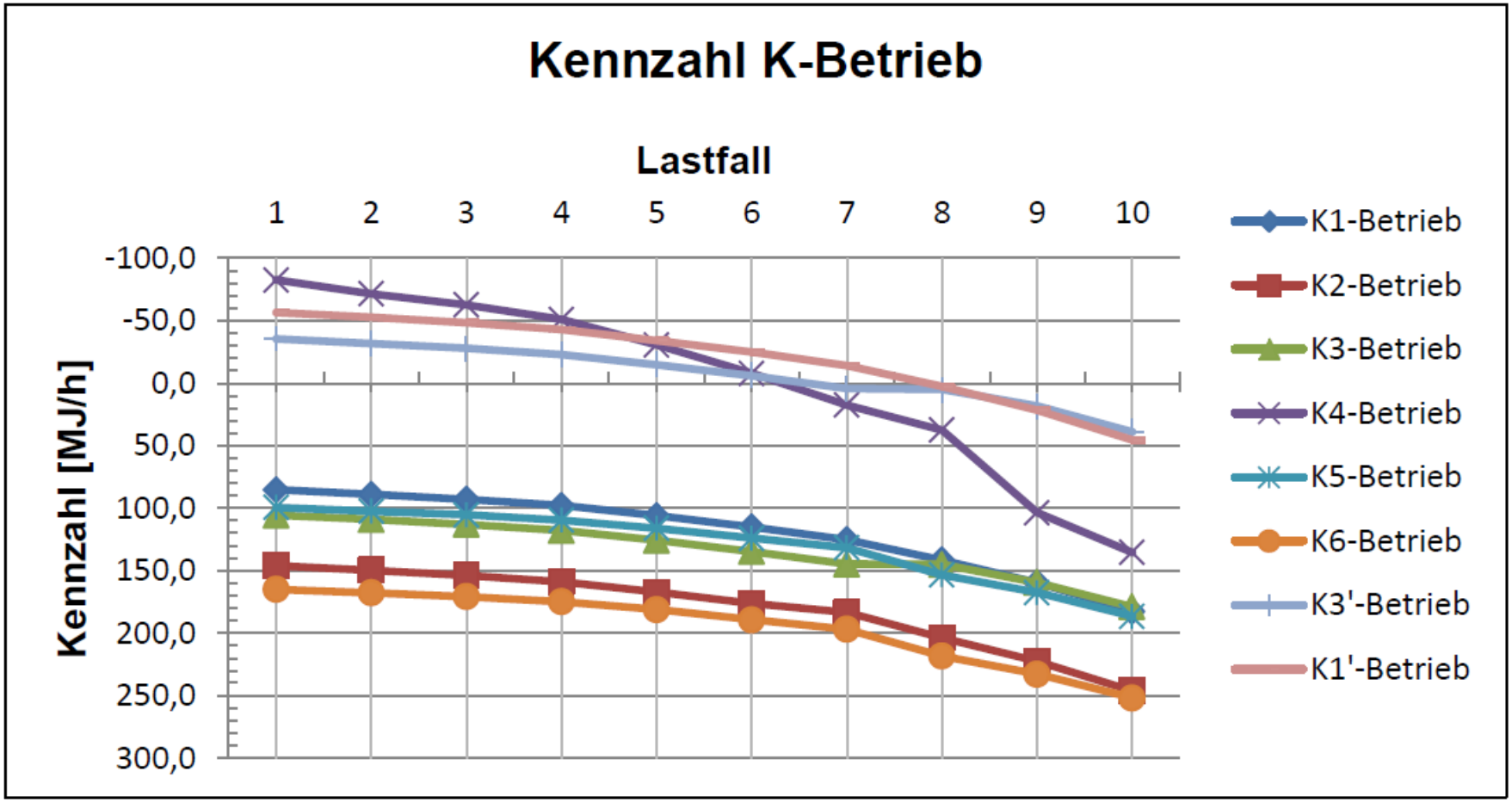
Emissionsbezogene Energiekennzahlen



$$K - Additiv = \frac{(KEA_{Additiv} + KEA_{Transport})}{\eta_{HCl}}$$

Emissionsbezogene Energiekennzahlen

$$K - Betrieb = \frac{KEA_{N-Effektiv}}{\eta_{HCl}}$$



Energieäquivalente Emissionsfaktoren

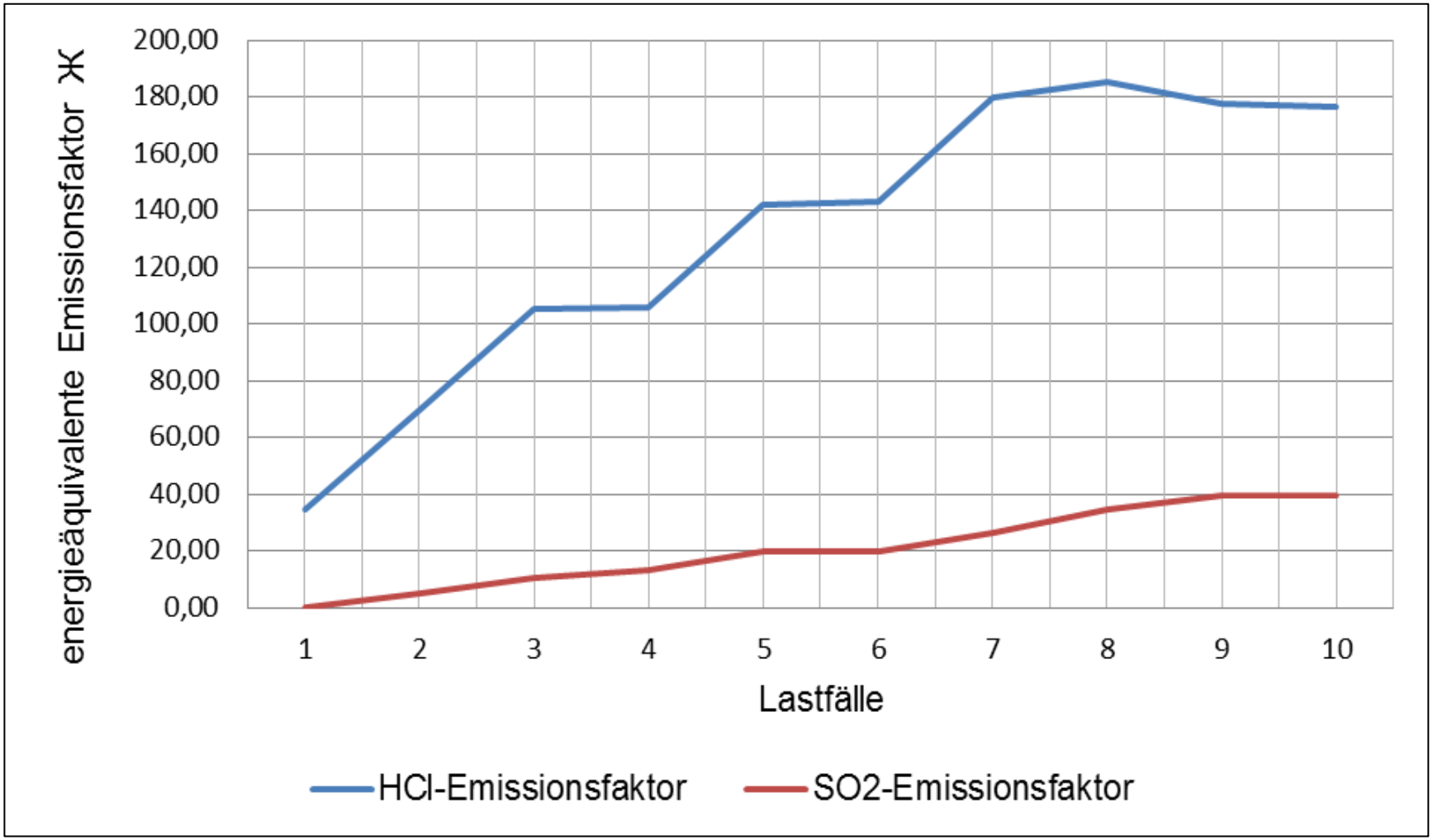
Mehr- und Minderemissionen der Varianten V1 und V3 im Vergleich

Parameter	Symbol	Einheit	Lastfälle									
Diff. HCl-Konzentration Reingas V1-V3	$\Delta c_{HCl \rightarrow V1-V3}$	mg/m³	1	2	3	3	4	4	5	5	5	5
Diff. HCl-Massenstrom Reingas V1-V3	$\Delta \dot{m}_{HCl \rightarrow V1-V3}$	kg/h	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Diff. $KEA_{N\text{-}Effektiv}$ V3-V1	$\Delta KEA_{N\text{-}Effektiv \rightarrow V3\text{-}V1}$	kJ/h	2.039.392	2.030.285	2.022.209	2.014.575	1.992.642	1.984.150	1.977.883	390.475	17.512	-327.425
Diff. $KEA_{N\text{-}Effektiv}$ V3'-V1'	$\Delta KEA_{N\text{-}Effektiv \rightarrow V3'\text{-}V1'}$	kJ/h	2.081.954	2.054.627	2.027.451	1.976.509	1.931.237	1.879.311	1.843.570	234.218	-321.476	-632.712
Diff. $KEA_{N\text{-}Strom}$ V3-V1	$\Delta KEA_{N\text{-}Strom \rightarrow V3\text{-}V1}$	kJ/h	1.972.555	1.962.576	1.954.260	1.945.944	1.929.312	1.912.680	1.904.364	1.846.152	1.929.312	1.937.628
Diff. $KEA_{N\text{-}Strom}$ V3'-V1'	$\Delta KEA_{N\text{-}Strom \rightarrow V3'\text{-}V1'}$	kJ/h	2.086.484	2.090.642	2.096.464	2.088.979	2.098.958	2.102.285	2.103.116	2.079.832	2.069.021	2.194.592
spez. HCl-Emission dt. Strommix [26]	$\lambda_{HCl\text{-}dt.\text{-}Strommix}$	kg/kJ	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09	1,46E-09
Massenstrom HCl aufgrund des Mehrenergiebedarfs bez. auf den dt. Strommix	$\dot{m}_{HCl-dt.-Strommix}$	kg/h	0,0029	0,0029	0,0029	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0027	0,0028	0,0028
HCl-Minderemissionsfaktor	$Ж_{HCl}$	-	34,72	69,80	105,14	105,59	142,01	143,24	179,83	185,50	177,51	176,74
HCl-Massenstrom absolut	$\dot{m}_{HCl_{absolut}}$	kg/h	0,097	0,197	0,297	0,297	0,397	0,397	0,497	0,497	0,497	0,497
Diff. SO_2-Konzentration Reingas V1-V3	$\Delta c_{SO_2 \rightarrow V1-V3}$	mg/m³	0	4	8	10	15	15	20	25	30	30
Diff. SO_2-Massenstrom Reingas V1-V3	$\Delta \dot{m}_{SO_2 \rightarrow V1-V3}$	kg/h	0	0,4	0,8	1	1,5	1,5	2	2,5	3	3
SO_2-Emission dt. Strommix [26]	$\lambda_{SO2\text{-}dt.\text{-}Strommix}$	kg/kJ	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08	3,93E-08
Massenstrom SO_2 aufgrund des Mehrenergiebedarfs bez. auf den dt. Strommix	$\dot{m}_{SO_2-dt.-Strommix}$	kg/h	0,0775	0,0771	0,0768	0,0765	0,0758	0,0752	0,0748	0,0726	0,0758	0,0761
SO_2-Minderemissionsfaktor	$Ж_{SO2}$	-	0,00	5,19	10,42	13,08	19,78	19,96	26,72	34,46	39,57	39,40
SO_2-Bilanz	$\dot{m}_{SO_{2absolut}}$	kg/h	-0,078	0,323	0,723	0,924	1,424	1,425	1,925	2,427	2,924	2,924

$$Ж_{HCl} = \frac{Diff.HCl - Massenstrom\ Reingas\ V1 - V3}{Massenstrom\ HCl\ aufgrund\ des\ Mehrenergieverbrauchs\ bez.\ auf\ den\ dt.Strommix}$$

Energieäquivalente Emissionsfaktoren

HCl-/ und SO_2-Minderemissionsfaktor der Abgasvarianten V1 und V3 im Vergleich



NO_x-Mehr- und Minderemissionen der Varianten V1 und V2 im Vergleich

Parameter	Symbol	Einheit	Bilanzwert
Diff. NO_x-Konzentration Reingas V1-V2	$\Delta c_{NOx \rightarrow V1-V2}$	mg/m³	30
Diff. NO_x-Massenstrom Reingas V1-V2	$\Delta \dot{m}_{NOx \rightarrow V1-V2}$	kg/h	3
Diff. KEA_N-Gesamt V1-V2	$\Delta KEA_{N\text{-}GesamtV1\text{-}V2}$	kJ/h	6.061.613
Diff. $KEA_{N\text{-}Strom}$ V1-V2	$\Delta KEA_{N\text{-}StromV1\text{-}V2}$	kJ/h	1.224.947
Energieaufwand zur Abgasaufheizung in der SCR	$\dot{E}_{SCR-Aufheiz}$	kJ/h	5.408.587
KEA-Strom durch Minderstromgewinnung aufgrund der Abgasaufheizung durch Dampf in der SCR	$KEA_{Strom\text{-}Dampf\text{-}SCR}$	kJ/h	4316936
spez. NO_x-Emission dt. Strommix	$\lambda_{NOx\text{-}dt.\text{-}Strommix}$	kg/kJ	6,97E-08
Massenstrom NO_x aufgrund des Mehrenergiebedarfs $KEA_{N\text{-}Strom}$ (V1-V2) bez. auf den dt. Strommix	$\dot{m}_{NOx-dt.-Strommix}$	kg/h	0,386
NO_x-Emission KEA-Strom (V1-V2)	$\Delta \dot{m}_{NOx-KEA-Strom \rightarrow V1-V2}$	kg/h	2,614
NO_x-Reingas-Soll V1 KEA-Strom (V1-V2)	$c_{NOx-Soll-SNCR}$	mg/m³	73,86

Zusammenfassung

Aus der Gegenüberstellung der einzelnen Kumulierten Energieaufwendungen geht hervor, dass der KEA_H und KEA_E im Vergleich zum KEA_N nahezu vernachlässigt werden kann.

Kennzahl K-Anlagentechnik zeigt, dass das einstufige Verfahren sowohl herkömmlich (V1) als auch energieoptimiert (V1‘) die günstigsten Ergebnisse aufweist.

Zusammenfassung

Kennzahl K-Additiv zeigt, dass die anlagentechnisch aufwendigsten Verfahren ohne Energieauskopplung die günstigsten Verfahren darstellen.

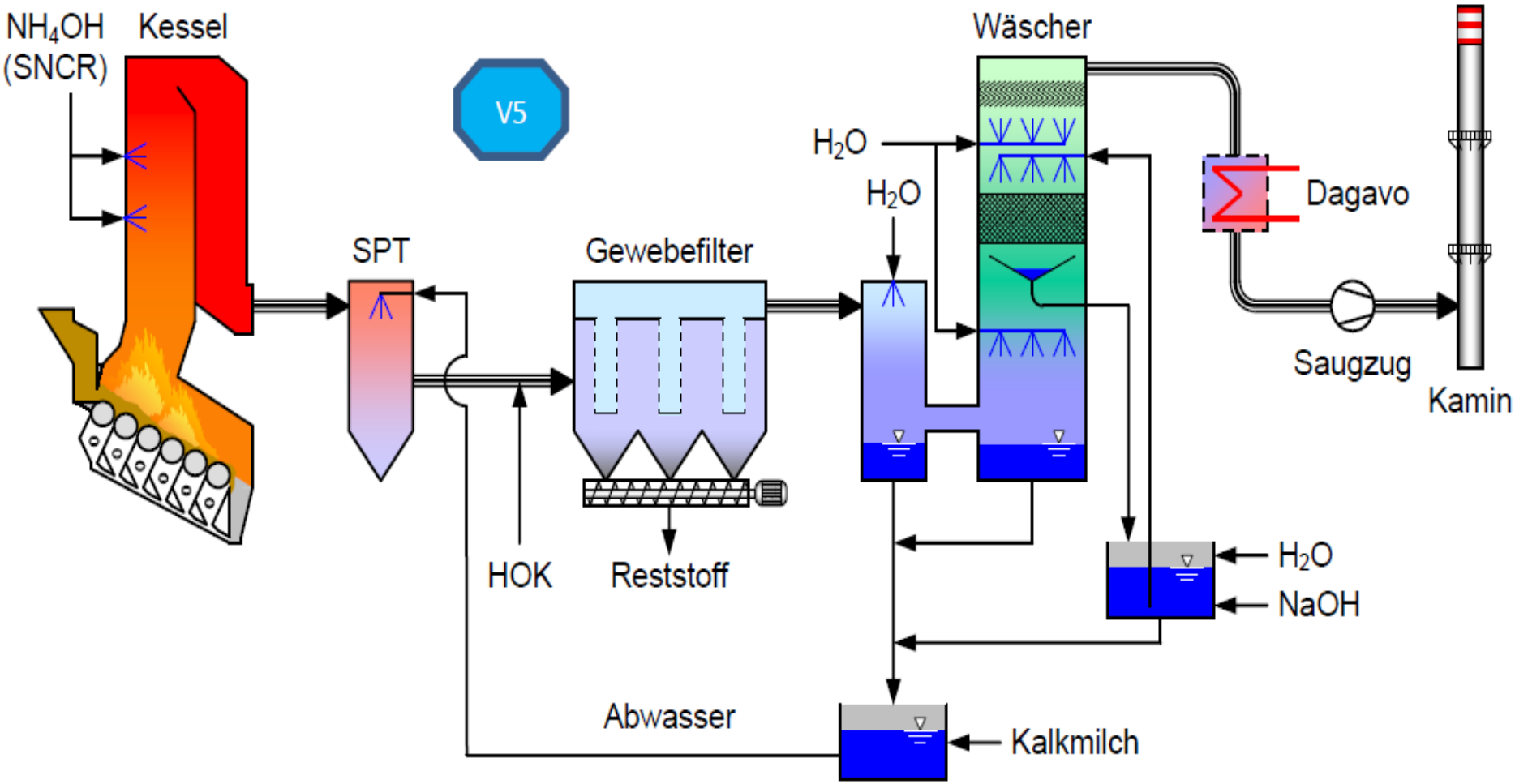
Kennzahl K-Betrieb zeigt, dass die Varianten V3‘ und V4 die günstigsten Verfahren sind.

Zusammenfassung

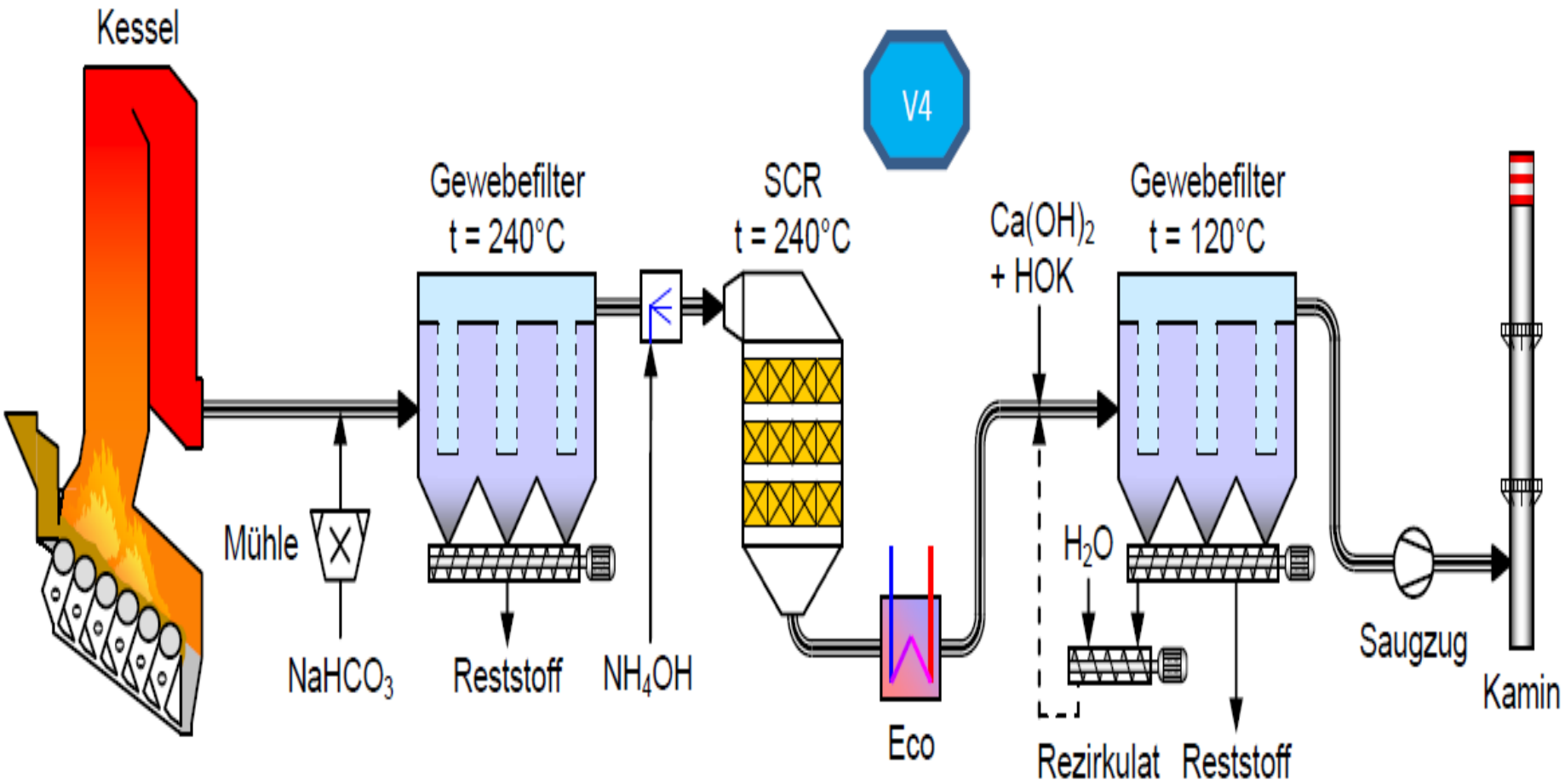
Die vorherrschende Meinung, dass ein mehrstufiges System energetisch und somit in der Emissionsbilanz ungünstiger ist, konnte nicht bestätigt werden. Im Gegenteil zeigten insbesondere die Verfahren, die eine Energieauskopplung zulassen, dass zweistufige Verfahren in der Emissionsbilanz günstiger als einstufige Systeme sind.

Backup Folien

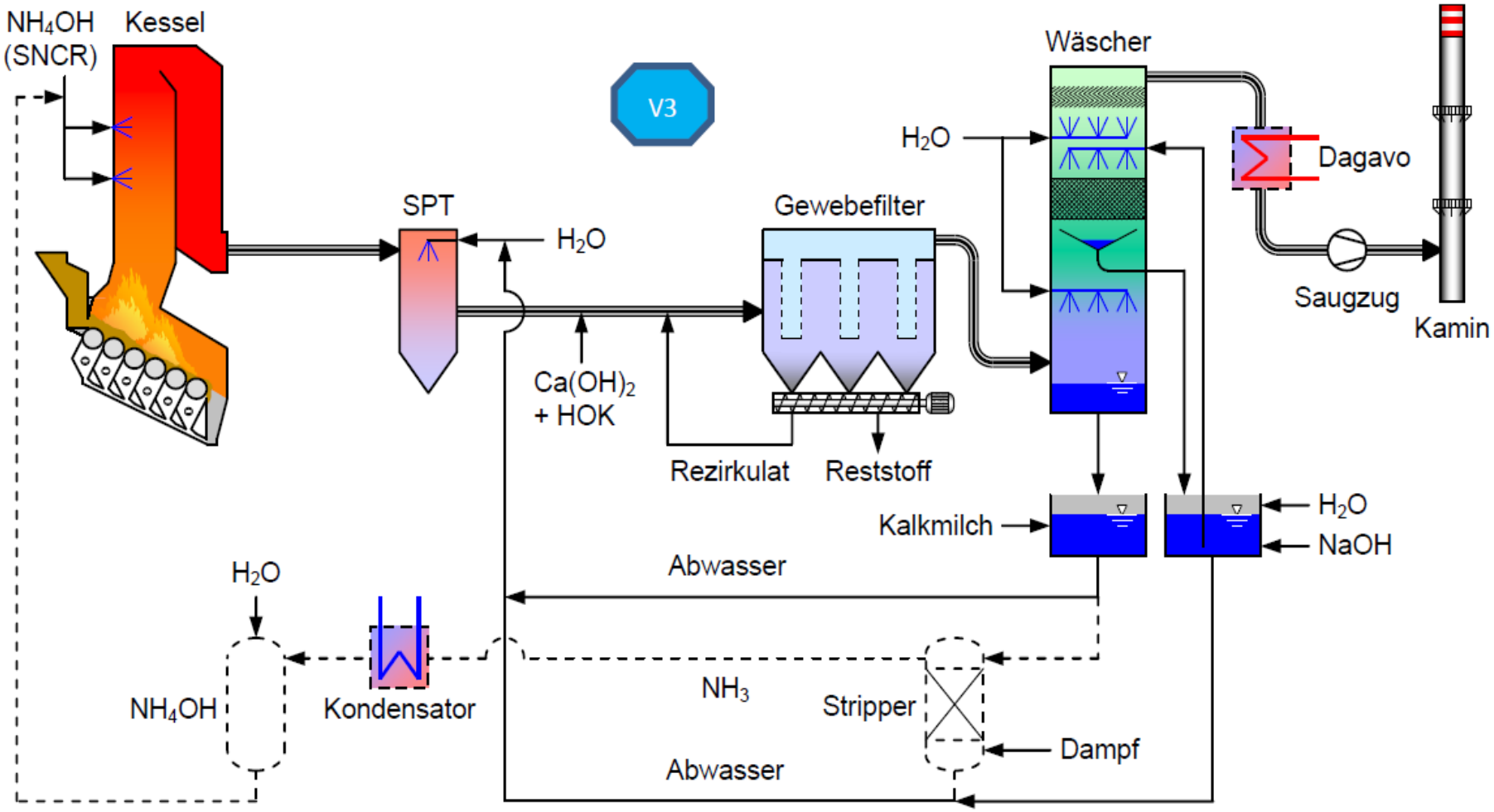
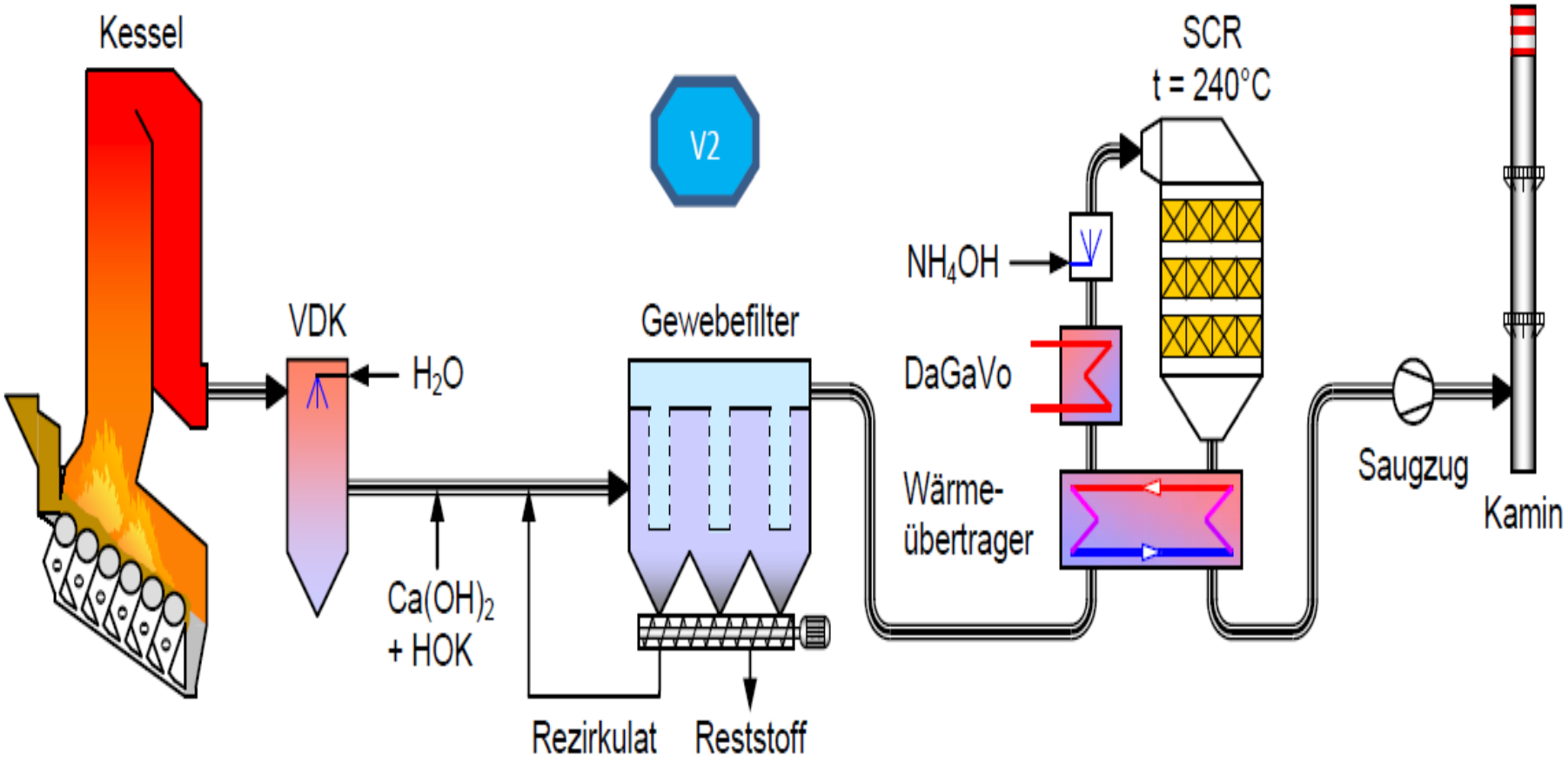
Verfahrenskonzepte



Verfahrenskonzepte



Verfahrenskonzepte



Verfahrenskonzepte