

# Lösungsvorschlag zu Übungsaufgaben zu den LPE 16: Wärmekraftwerke und 17: Abgasreinigung

## Themenbereiche

- Clausius-Rankine-Prozess
- T,s-Diagramm
- Abgasreinigung

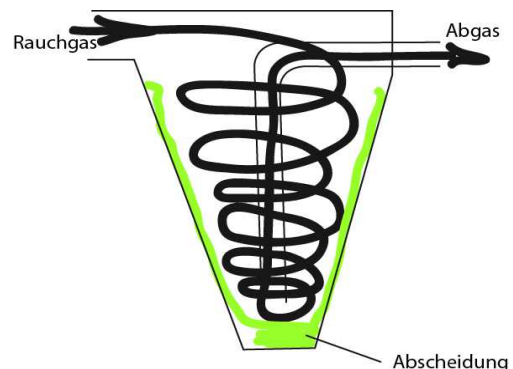
## Inhaltsverzeichnis

2 Lösungshinweise zu Übungsaufgaben zur LPE 17 Aufgabe.....	2
3 Kraftwerk, T,s-Diagramm, Kraft-Wärme-Kopplung.....	5
4 Lösungsvorschlag zu LPE11 (Wärmepumpe), 16 und 17.....	7

## 1 Lösungshinweise zu Übungsaufgaben zur LPE 17 Aufgabe

### 1. Aufgabe

Der Zyklonabscheider funktioniert durch die Massenträgheit der Teilchen, d.h. das Rauchgas wird so in den Zyklonabscheider eingebracht, dass es einer Kreisbahn folgt. Die Rußpartikel bewegen sich aufgrund der auftretenden Massenträgheit auf einer geraden Flugbahn und kollidieren mit der Zyklonabscheiderwand, werden dadurch gebremst und fallen der Schwerkraft folgend nach unten.



### 2. Aufgabe

a.

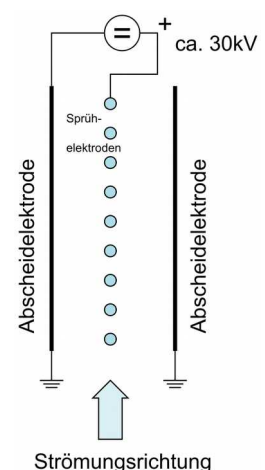
Hochspannungsquelle: Erzeugt eine sehr hohe Spannung zum Aufbau eines elektrischen Feldes zwischen Sprüh- und Niederschlagselektrode (Abscheideelektrode).

Sprühelektrode: Aussenden von freien Elektronen zur Polarisation der Staubpartikel

Abscheideelektrode: Zieht die polarisierten Staubpartikel an und hält sie bis zum Abklopfen fest.

b.

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} = \frac{80.000 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} - 800 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}}{80.000 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}} = 99 \%$$



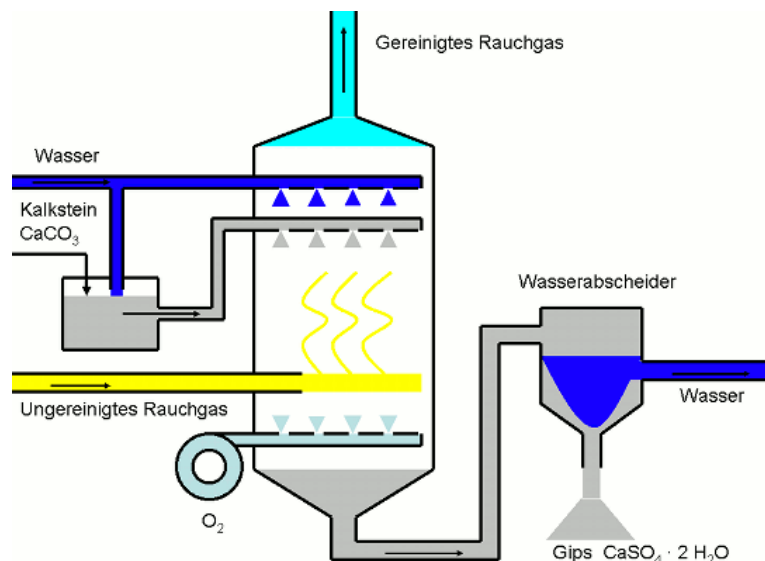
### 3. Aufgabe

CO <sub>2</sub>	Treibhauseffekt
SO <sub>2</sub>	Saurer Regen (Schwefelsäure) Absterben von Pflanzen Schädigung von Bauwerken Korrosion Atemwegserkrankungen
NO <sub>x</sub>	Saurer Regen (Salpetersäure) Absterben von Pflanzen Schädigung von Bauwerken Korrosion Atemwegserkrankungen
Asche/Ruß	Atemwegserkrankungen Krebs Smog

### 4. Aufgabe

- a. - Atemwegserkrankungen bei Menschen und Tieren  
 - regiert mit Wasser schwefeliger Säure / Schwefelsäure (Saurer Regen)  
 -> Absterben von Pflanzen  
 -> Schädigung von Bauwerken  
 -> Korrosion an Metallen

- b.  
 Wasser und Kalkstein bilden eine Suspension, die auf das entgegenströmende Rauchgas gesprüht wird. Dabei entzieht der Kalk dem Rauchgas Schwefeldioxid und wandelt es in Gips um.



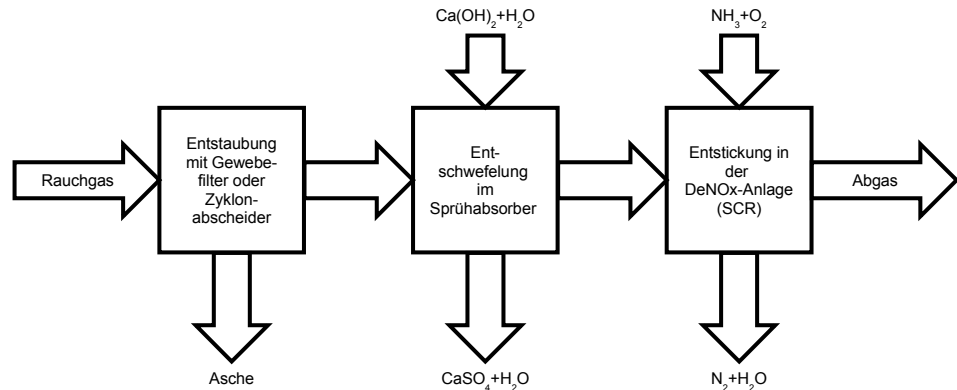
- c.  
 Erzeugen der Waschsuspension  
 $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$   
 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$   
 Waschvorgang  
 $2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$   
 $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

### 5. Aufgabe

- a. Verbrennung von CO in CO<sub>2</sub>  
 Verbrennung der restlichen C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O  
 Reduktion der NO<sub>x</sub> in N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>
- b. Dieselmotor: sehr hohe NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas. Wegen dem hohen Luftüberschuss kann diese nicht reduziert werden, da CO und HC den Reaktionspartner Sauerstoff aus dem Luftüberschuss entnehmen.  
 Zudem setzt der Ruß die (sehr feinen) Kanäle des Dreiwege-Katalysators zu.
- c. Bei der selektiven katalytischen Reaktion wird zuerst in einem Rußfilter der Ruß aus dem Abgas entfernt. Anschließend werden die Stickoxide NO<sub>x</sub> mit der Hilfe von Ammoniak in einem Katalysator zu Stickstoff und Wasser verbrannt.
- d.  $4 \text{NH}_3 + 4 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$  (Standard)

## 6. Aufgabe

a.



b. Im High-Dust-Verfahren ist die DeNO<sub>x</sub>-Anlage zu Beginn der Rauchgasreinigung vor der Entstaubung angeordnet, im Low-Dust-Verfahren am hinteren Ende, nach der Entschwefelung. Für die DeNO<sub>x</sub>-Reaktion ist eine hohe Reaktionstemperatur Voraussetzung.

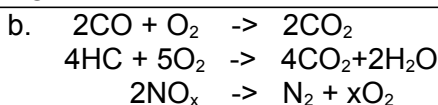
Beim High-Dust-Verfahren ist die Temperatur des Rauchgases direkt nach dem Verlassen des Kessels noch hoch genug. Es muss keine zusätzliche Wärme zum Einleiten der Reaktion zugeführt werden. Allerdings wird die DeNO<sub>x</sub>-Anlage durch den hohen Staub- und Rußanteil im Rauchgas stark belastet. Die Katalysatoren verstopfen sehr schnell und müssen häufig ausgewechselt und regeneriert werden.

Im Low-Dust-Verfahren wird vor der katalytischen Reduktion das Rauchgas fast vollständig von Ruß und Staub befreit, die Laufzeit der Katalysatoren bis zur Regenerierung verlängert sich wesentlich. Das Rauchgas ist bereits so stark abgekühlt, dass es mit hohem Energieaufwand wieder aufgeheizt werden muss, damit die Entstickung erfolgen kann.

## 7. Aufgabe

a.

Kohlenmonoxid CO	giftig
nicht verbrannte Kraftstoffanteile C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	krebserregend
Stickoxide NO <sub>x</sub>	Giftig, in Verbindung mit Wasser entsteht Salpetersäure und damit saurer Regen



c. Der Katalysator senkt die erforderliche Aktivierungsenergie, d.h. die Reaktionen treten schon bei geringeren Temperaturen ein.

## 8. Aufgabe

a. Der Dieselmotor produziert bei der Verbrennung Ruß, welcher zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei Mensch und Tier führen kann. Der Partikelfilter besteht aus einem Block mit gegenläufigen Kanälen. Das Abgas, das auf der einen Seite in die Kanäle einströmt, muss durch das poröse Filtermaterial diffundieren um auf der anderen Seite über die Kanäle wieder auszuströmen. Dabei bleiben selbst feinste Rußpartikel im Filter hängen.

- b. Strategie 1: Ausbau und Ersetzen des Partikelfilters.  
Strategie 2: Regenerierung des Filters im laufenden Betrieb. Nach der Verbrennung im Zylinder wird erneut Kraftstoff eingespritzt der erst im Partikelfilter zusammen mit dem festgesetzten Ruß verbrannt wird. Dadurch wird der Ruß zu CO<sub>2</sub> umgewandelt und der Filter ist wieder frei.

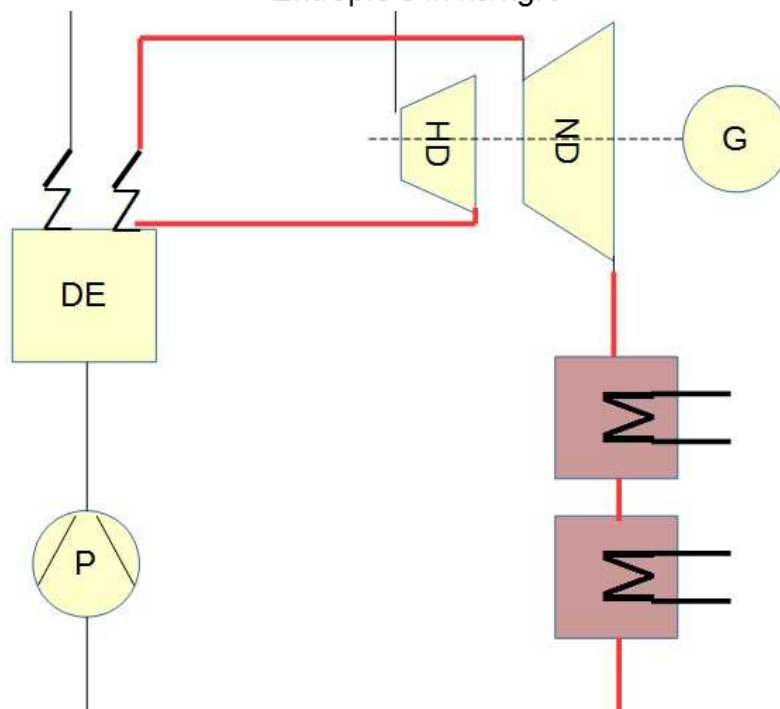
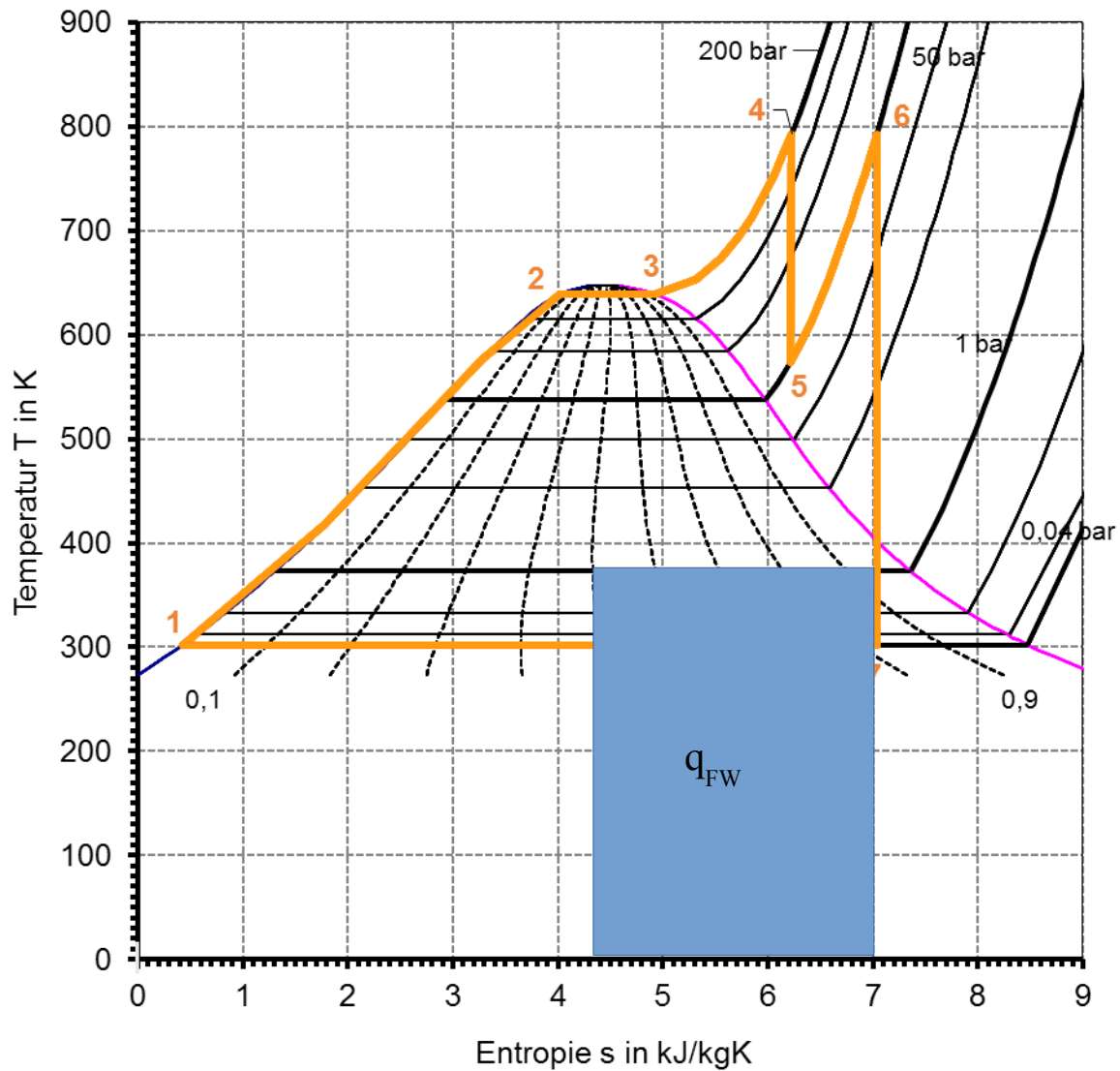


## 2 Kraftwerk, T,s-Diagramm, Kraft-Wärme-Kopplung

Ein Steinkohlekraftwerk dient der Energieversorgung einer Stadt. Der Kraftwerksprozess ist auf dem Arbeitsblatt im T,s-Diagramm dargestellt. Die im Dampferzeuger zugeführte spezifische Wärmemenge einschließlich Überhitzung des Dampfes beträgt:  $q_{1-4} = 3206 \text{ kJ/kg}$

1. Erhöhung des Turbinendrucks; Temperaturerhöhung des überhitzten Dampfes ; Senkung der Kondensationstemperatur bzw. des Kondensationsdrucks; Zwischenüberhitzung; Luftvorwärmung; Speisewasservorwärmung
2. Idealer Prozess, weil Dampf isentrop entspannt wird. Im realen Prozess verlaufen die Geraden 4-5 und 6-7 nicht senkrecht, da durch Reibungseffekte in den Turbinen die Entropie zunimmt.
3.  $q_{56} = 526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  ,  $q_{17} = -1987 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  ,  $\eta_{th} = 0,468$
- 4.1 - Steigerung des Gesamtwirkungsgrads;  
- zusätzliche „Einnahmequelle“ für Kraftwerksbetreiber;  
- Bei einem Überangebot an el. Energie im Europäischen Verbundnetz kann die Stromproduktion und somit die gesamte Kraftwerksleistung reduziert werden. Der prozentuale Anteil der Fernwärme an der Gesamtkraftwerksleistung nimmt dadurch zu.
- 4.2 Siehe Arbeitsblatt
- 4.3  $q_{FW} = -1007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $w_{Nutz, FW} = 1553 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $\Delta w_{Nutz} = w_{Nutz} - w_{Nutz, FW} = 191,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- 4.4  $\eta_{Ges, FW} = \frac{w_{Nutz, Ges}}{q_{zu}} = \frac{q_{zu} - q_{ab, Kondensator}}{q_{zu}} = 0,686$   
mit  $q_{ab, Kondensator} = 1172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- 4.5 Siehe Arbeitsblatt

I	II	III
2		
	2	
3	2	
2		
	2	
1	4	
		3
		3



**3 Lösungsvorschlag zu LPE11 (Wärmepumpe), 16 und 17**

## 1.1 Oben: Verdichter / Kompressor

Links: Kondensator Rechts: Verdampfer  
Unten: Drossel / Entspannungsventil

## 1.2 a: Verdampfer – isobare Verdampfung (von 1 nach 2 im T-S – Diagramm)

b: Verdichter – isentrope Verdichtung (von 2 nach 3 im T-S – Diagramm)

c: Kondensator – isobare Kondensation (von 3 nach 4 im T-S – Diagramm)

d: Entspannungsventil – isentrope Expansion (von 4 nach 1 im T-S - Diagramm)

## 1.3 a: Zum Verdampfen wird Wärme benötigt. Im Verdampfer wird Wärme bei niedriger Temperatur aus der Wärmequelle, zum Beispiel Erdwärme, zugeführt.

b: Im Verdichter wird durch Zufuhr mechanischer Energie das Kältemittel komprimiert und dadurch die Temperatur und der Druck erhöht.

c: Durch Abführen von Wärmeenergie (Latente Wärme) an den Heizkreislauf wird das Kältemittel wieder kondensiert.

1.4.1  $q_{ab} = q_{33^*} + q_{3^*4}$ ,

$$q_{33^*} = \frac{T_4 - T_4}{2} \cdot (s_3 - s_3^*) = \frac{341 \text{ K} + 323 \text{ K}}{2} \cdot \left(1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 1,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) = 33,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{3^*4} = T_4 \cdot (s_3 - s_4) = 323 \text{ K} \cdot \left(1,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 1,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) = 132,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{ab} = 33,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 132,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 165,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad w_{\text{mech}} = q_{ab} - q_{zu} = 165,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 144 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 21,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\varepsilon = \frac{q_{ab}}{w_{\text{mech}}} = \frac{165,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{21,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 7,8$$

## 1.4.2 Die errechnete Leistungsziffer ist wesentlich höher als bei handelsüblichen Wärmepumpen. Durch die idealisierte Betrachtung des Kreisprozesses werden Verluste nicht berücksichtigt. Der Verdichter hat in der Realität keinen Wirkungsgrad von 100%.

1.5  $\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P_{el}} \Rightarrow P_{el} = \frac{\dot{Q}}{\varepsilon} = \frac{30 \text{ kW}}{3,0} = 10 \text{ kW}$

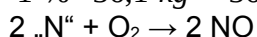
$$E_{el} = W_{el} = P_{el} \cdot t = 10 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 240 \text{ kWh}$$

2.1  $W = 240 \text{ kWh} \cdot 0,53 = 127,2 \text{ kWh} \Rightarrow$  aus dem öffentlichen Energienetz wird für den Betrieb des Kompressors an einem Tag eine fossile Energiemenge von 127,2 kWh benötigt.

2.2  $H_i \cdot m_B = Q_{B,i}; \quad m_B = \frac{Q_{B,i}}{H_i} = \frac{289,1 \text{ kWh}}{8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 36,1 \text{ kg}$

Um den Kompressor einen Tag zu betreiben, benötigt man 36,1 kg Steinkohle.

## 2.3 1 % · 36,1 kg = 361 g Stickstoff sind in der Kohle enthalten

zum Weiterrechnen:  $M_N = 14 \text{ g/mol}$ ,  $M_O = 16 \text{ g/mol}$ 

$$m_{\text{NO}} = 361 \text{ g} + \frac{16}{34} 361 \text{ g} = 773,6 \text{ g}$$

Bei der Verbrennung von 36,1 kg Steinkohle entstehen 773,6 g Stickstoffmonoxid (NO).

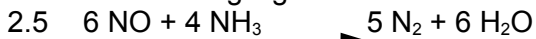


Alternativlösung über die Molmasse

Aus der Reaktionsgleichung: 1 mol Stickstoff(-Atom)  $\rightarrow$  1 mol Stickstoffmonoxid

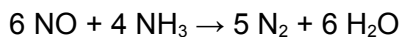
$$n_N = \frac{m_N}{M_N} = \frac{361 \text{ g}}{14 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 25,81 \text{ mol} = n_{NO} \Rightarrow m_{NO} = n_{NO} \cdot M_{NO} = 25,81 \text{ mol} \cdot (14 + 16) \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 774 \text{ g}$$

2.4 Stickoxide bilden in der Atmosphäre salpetrige bzw. Salpetersäure und tragen damit zum Säuren Regen bei. Außerdem begünstigen Stickoxide die Bildung von bodennahem Ozon, dem sogenannten Sommersmog. Zudem wirken Stickoxide bei der Aufnahme durch den Menschen giftig und reizen die Atemorgane.



2.6 Aus Aufgabe 2.3 ist die Stoffmenge von NO mit  $n = 25,81 \text{ mol}$  bekannt.

2.6 mit der Reaktionsgleichung aus 2.5 kann Folgendes berechnet werden:



$$\frac{n(\text{NO})}{n(\text{NH}_3)} = \frac{6}{4} \Rightarrow n(\text{NH}_3) = \frac{n(\text{NO})}{6} \cdot 4 = 17,2 \text{ mol}$$

$$n(\text{NO}_3) = \frac{m(\text{NH}_3)}{M(\text{NH}_3)}$$

$$\Rightarrow m(\text{NH}_3) = n(\text{NO}) \cdot M(\text{NH}_3) = 17,2 \text{ mol} \cdot (14 + 3 \cdot 1) \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 292,5 \text{ g}$$

Um die 361 g NO zu reduzieren, werden 292,5 g Ammoniak benötigt. Dabei wurde von einer 100 %-igen Umsetzung ausgegangen (ohne Schlupf).

2.7 Im High-Dust Verfahren wird die Entstickung vor Entstaubung und Entschwefelung in der Rauchgasführung durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass die zur Reaktion benötigte Temperatur im Rauchgas noch vorhanden ist und nicht durch Nachheizen erhöht werden muss. Durch den großen Staubanteil im Abgas wird der Katalysator durch die Abrasion stark abgetragen.