Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Gefördert durch:



UNIVERSITÄT LEIPZIG

Entwicklung eines energieeffizienten Verfahrens zur katalytischen Niedertemperatur-Entfernung von NO<sub>x</sub> aus industriellen Abgasen

3. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses des IGF-Vorhabens Nr. 18515N

Marcus Kasprick Waldimir Suprun Roger Gläser

Institut für Technische Chemie, Universität Leipzig

06. Dezember 2016 Duisburg

## Inhalt

- Status des Projektes
- Stand der Technik
- Zusammenfassung 2. PBA-Treffen
- Experimentelles
- Ausgewählte Ergebnisse
- Zusammenfassung
- Ausblick

## **Status des Projektes**



## Projektplanung - Arbeits- und Zeitplan



## **Stand der Technik**



UNIVERSITÄT LEIPZIG

#### N<sub>2</sub>O-Bildung während NH<sub>3</sub>-SCR an V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>



Links: Abhängigkeit von der V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Beladung bei verschiedenen Temperaturen
 Rechts: Abhängigkeit von der Reaktionstemperatur
 1000 ppm NO, 1000 ppm NH<sub>3</sub>, 3 vol.-% O<sub>2</sub>



Erhöhung der Temperatur und V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Beladung fördern die Lachgas-Bildung

J. A. Martin, M. Yates, P. Avila, S. Suarez, J. Blanco Appl. Catal. B: Environ. 70 (2007) 330.

# Einfluss des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses auf die N<sub>2</sub>O-Bildung während NH<sub>3</sub>-SCR



N<sub>2</sub>O-Bildung kann mit Zersetzung von Ammoniumnitrat erklärt werden

- NO<sub>2</sub> fördert die Bildung von Lachgas
- Die N<sub>2</sub>O-Bildung ist an Fe/ZSM-5 mehr ausgeprägt als am Cu/ZSM-5

M. Colombo, I. Nova, E. Tronconi, Catal. Today 151 (2010) 223.

# BASF-Katalysatoren für N<sub>2</sub>O-Zersetzung deN<sub>2</sub>O-Technologie: N<sub>2</sub>O $\rightarrow$ N<sub>2</sub> + $\frac{1}{2}$ O<sub>2</sub>

Catalyst	Shape	Size, mm	Density, kg/L	Min. Operating Temperature, °C	Max. Operating Temperature, °C
O3-81	Star Extrudates	6 (diameter)	0.9	450	>800
O3-85	Star Extrudates	3, 6 (diameter)	0.9–1.0	750	>900
O3-88	Honeycomb (Extrudates)	50–200 (length) 70 (outer diameter)	0.9	750	>900

Die Katalysatoren werden eingesetzt in:

- Salpetersäureanlagen
- Adipinsäureanlagen
- Caprolactamanlagen









## $deN_2O$ -Technologie beseitigt $N_2O$ -Emission bis zu 100%, benötigt jedoch sehr hohe Reaktionstemperaturen über 700°C

http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en\_GB/function/conversions:/publish/content/microsites/catalysts/prods-inds/process-catalysts/BF-9834\_US\_N2O\_and\_DeNOX\_Technote.pdf (30.11.2016)

#### UNIVERSITÄT LEIPZIG

#### N<sub>2</sub>O-Bildung bei der NH<sub>3</sub>-SCR

- a) Multiple Bildungsmechanismen:
- Oxidation von Ammoniak

 $NH_{3(ads)} \rightarrow N_2O + NO + H_2O$ 

Rekombination von adsorbiertem NO<sub>(s)</sub>

 $2 \text{ NO}_{(s)} \rightarrow \text{ N}_2\text{O} + [O]_{(s)}$ 

- Zerfall von  $NH_4NO_{3(ads)}$  (oberhalb von  $T_m$ : 169°C)  $NH_4NO_{3(s)} \rightarrow N_2O + 2H_2O$ 
  - $NH_4NO_{3(s)} \rightarrow N_2O + 2H_{2(g)} + [O]_{(s)}$
- Zerfall von ads. HNO 2 HNO<sub>(s)</sub>  $\rightarrow$  N<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>O

#### b) wird beeinflusst durch:

- O2-Konz, Gehalt und OF-Dichte von Metalloxiden
- NO/NO<sub>2</sub>-Verhältnis
- NO<sub>x</sub>-Adsorptionsfähigkeit und Stabilität von ads. NO<sub>x</sub>-Spezies
- Oxidationsaktivität von ÜMO ("oxidation power")
- Temperatur-Fenster
- Typ und Textureigenschaften von Katalysator-Träger
- Form-Selektivität: am Cu/SAPO-34, Cu/ZSMA-5 minimale N<sub>2</sub>O-Bildung
- Präsenz von Wasser und SO<sub>2</sub>: inhibierende Wirkung
- Mn-haltige Katalysatoren zeichnen sich durch sehr hohe N<sub>2</sub>O-Ausbeute aus

N.O

Cataly

NH<sub>3</sub>

NH<sub>4</sub>NO<sub>2</sub>

N<sub>2</sub>O

**HNO** 

# Eigene Ergebnisse

#### **Experimentelles**

Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

## Katalysatorpräparation

#### Träger

**Alumina (**γ**-Al**<sub>2</sub>**O**<sub>3</sub>): CRI (Leuna) und Alfa Aesar

**Titanoxid (TiO<sub>2</sub>):** P-25 (Evonik), Hombikat UV100 und 8602 (Huntsman)

**Mischoxide:** SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> (Huntsman), SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CRI), TS-1 (Evonik)

Aktivkohle: PBS-AC (Blücher), konv.-AC (Gryfskand)



#### Nass-Imprägnierung

- mit wässrigen Lösungen von Fe-, Cu- bzw. Mn-Nitraten oder -Acetaten
- Massenanteil: 12 24 Ma.-%
- Trocknung bei 60 °C unter Vakuum oder 75 °C unter Luft
- Calzinierung: 5 h bei 350 500 °C unter Luft oder N<sub>2</sub>

### **Verwendete NH<sub>3</sub>-SCR-Apparatur**



\* nur für Vergiftungsversuche

# **Eigene Ergebnisse**

**Experimentelles** 

#### Zusammenfassung 2. PBA-Treffen

Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

## Ausblick (2. PBA, Juli 2016)

- Variation des Gehaltes an aktiver Komponente (Inhibierung der N<sub>2</sub>O-Bildung)
- binäre oder ternäre Mischoxidsysteme mit anderen Metallen (Mg, Cu, Ni, Co, Fe; z.B. Mn + Cu)
- Einfluss der Vergiftung (H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O + SO<sub>2</sub>) auf Aktivität und Erhöhung der "Feuchte-Resistenz" (Hydrophobisierung)

# Eigene Ergebnisse

Experimentelles Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

#### Vergleich SCR-Aktivität von Mn- und Cu-haltigen Katalysatoren (bei 200°C, trockener Gasfluss)



Alumina basierte Katalysatoren zeigen 3-4 mal niedrigere N<sub>2</sub>O-Selekitvitäten

#### Mn-Katalysator, Trägerbeladung mit "Fremdoxid"



- Signifikant mehr N<sub>2</sub>O-Bildung mit TiO<sub>2</sub> als mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (TiO<sub>2</sub>-Trägermaterial fordert Bildung von Lachgas)
- Beladung von Trägermaterial mit ca. 2 mol-% (4 mas.-%) SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unterdrückt die N<sub>2</sub>O-Bildung signifikant

4 vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV =  $30.000 \text{ h}^{-1}$ , n(Mn)/n(M) =  $0.3 \text{ TiO}_2$ : Hombikat UV100 (Huntsman), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $\gamma$ -Alumina Pellets (Alfa Aesar)

#### NH<sub>3</sub>-SCR-Aktivität von Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> und Mn/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>



 vollständiger NO-Umsatz bei 150-240 °C, breites Temperaturfenster für Mn/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Katalysator

• max.  $N_2O$ -Ausbeute ca. 7 % (250 °C)

 geringere Aktivität bei 150-240 °C, schmales Temperaturfenster und 2 mal niedrigere N<sub>2</sub>O-Ausbeute an Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Katalysator

Mn/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>: 17 mas.-% Mn, 4 mas.-% SiO<sub>2</sub> (HK, CRI Y45857) Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>: 17 mas.-% Mn, 20 mas.-% SiO<sub>2</sub> (CRI Y45858)

<sup>4</sup> vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>

# **Eigene Ergebnisse**

Experimentelles Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

## Unterschiedliche Übergangsmetalloxide



0,4M/TiO<sub>2</sub> (P-25, Evonik)

- Mn und Cu zeigen hohe NO-Umsätze bei 170-220 °C
- Mn weißt extrem hohe Aktivität für N<sub>2</sub>O-Bildung auf (170-220 °C)
- Bildung von N<sub>2</sub>O an Cu-, Fe-, Cound Ni-Oxidhaltigen Kat. um ca. 5 bis 10 mal niedriger als MnO<sub>x</sub>

Mn >> Cu > Co > Ni > Fe

<sup>4</sup> vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>, n(M)/n(Ti) = 0.4 TiO<sub>2</sub>: P-25 (Evonik)

#### Anwendung von binären Mischoxiden



MacMillan et al. Chem. Sci. 3(3) (2012) 633-658. N.A.S. Amin, J. Molecular Catal. A: Chem. 259 (2006) 61–66. W. Fu, et al. Scientific Reports,doi:10.1038/srep02349 (2013). X. Wang et al., Catalysts 6 (2016) 112. S.S.R. Putluru et al., Appl. Catal. B (2015) 165, 628–635.

## SCR-Aktivität von binären Oxiden



#### Beobachtete Effekte für die SCR-Aktivität (NO-Umsatz)

- Mn-Cu: CuO<sub>x</sub> setzt die SCR-Aktivität von Mn/TiO<sub>2</sub> herab
- Fe-Cu: Synergieeffekt nur bei 0.25Fe, sonst: zunehmender Fe-Anteil setz Aktivität herab
- Mn-Fe: Synergieeffekt bei 0.75Fe

4 vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>, n(M)/n(Ti) = 0.2 TiO<sub>2</sub>: Hombikat 8602 (Huntsman)

UNIVERSITÄT LEIPZIG

#### SCR-Aktivität von binären Oxiden

 $(n_{Metall1} + n_{Metall2})/n_{Ti} = 0.2$  (konstant)

TiO<sub>2</sub>-Träger (HK 8602)

#### Beobachtete Effekte für die N<sub>2</sub>O-Bildung

Mn-Cu: Synergie Effekt nur bei 0.5Cu, sonst: Cu setzt die N<sub>2</sub>O Bildung herab

Fe-Cu: Fe unterdrückt die N<sub>2</sub>O Bildung im ganzen Bereich (von 0.25 bis 0.75Fe)

Mn-Fe: Fe unterdrückt die  $N_2O$  Bildung im ganzen Bereich (von 0.25 bis 0.75Fe)



4 vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>, n(M)/n(Ti) = 0.2 TiO<sub>2</sub>: Hombikat 8602 (Huntsman)

# **Eigene Ergebnisse**

Experimentelles Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

#### Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> auf SCR-Aktivität



4,5 % H<sub>2</sub>O 50 ppm SO<sub>2</sub>

- H<sub>2</sub>O bewirkt starke zum Teil reversible Desaktivierung des Cu-haltigen Katalysators
- NO-Umsatz des Mn-haltigen Katalysators wird durch H<sub>2</sub>O kaum beeinflusst
- irreversible Desaktivierung durch SO<sub>2</sub>

<sup>4</sup> vol.-%  $O_2$ , 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>

#### Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> auf N<sub>2</sub>O-Bildung



200°C



- N<sub>2</sub>O-Ausbeute ist am Mn/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> um ca. 2 mal größer als am Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>
- H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> unterdrücken die Bildung von Lachgas

4 Vol.-%  $O_2$ , 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>

#### Bewertungskriterien zur Vergiftung mit Wasserdampf

Versuche bei 200 °C mit transienter Zufuhr von 4.5 Vol.-% Wasserdampf

• Desaktivierungsgrad / % 
$$\Delta X_{\text{NO}} = \frac{X_{\text{NO}}^{\text{dry}} - X_{\text{NO}}^{\text{wet}}}{X_{\text{NO}}^{\text{dry}}} \cdot 100$$
  
• Regenerierungsgrad / %  $RG = \frac{X_{\text{NO}}^{\text{post.dry}} - X_{\text{NO}}^{\text{wet}}}{X_{\text{NO}}^{\text{wet}}} \cdot 100$ 



#### Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> auf den NO-Umsatz an Mn-Cu-Fe-Mischoxid-haltigen Katalysatoren



200 °C, 4 vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup> n(M)/n(Ti) = 0,2, TiO<sub>2</sub>: Hombikat 8602 (Huntsman)

# **Eigene Ergebnisse**

Experimentelles Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

## Idee der Oberflächenmodifizierung

Silylierung: Oberflächenmodifizierung mit Organosilica-Gruppen



thermische Stabilität?

#### Aktivitätsvergeilch von Cu- und Mn-haltigen Katalysatoren nach der Silylierung mit HMDS



- Trimethylsilylierung bewirkt ein starke Minderung der Aktivität bei 120-250 °C
- Bedeckung von aktiven Zentren evtl. sterische Effekte der Me<sub>3</sub>Si-Gruppen

<sup>4</sup> Vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>

#### Charakterisierung von Hydrophobierten Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Katalysatoren

nicht konkurrierende Adsorption von Wasser und Toluol bei 27°C



- Hydrophobierung mit Me<sub>3</sub>-Si bzw. Ph-Si bewirkt starke Minderung der Wasseradsorption und begünstig die Toluol-Adsorption
- Hydrophobierungseffekt von Ph-Si ist stärke ausgeprägt als von Me<sub>3</sub>-Si

# SCR-Profiele für Mn/Ti<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-TMS in Abwesenheit von Wasser



- bereits ab 200 °C beginnt der oxidative Abbau von Me<sub>3</sub>Si-Gruppen
- Form von CO<sub>2</sub>-Profilen spricht f
  ür eine stufenweise CO<sub>2</sub> Entwicklung bzw. Desoption

<sup>4</sup> Vol.-% O<sub>2</sub>, 500 ppm NO, 575 ppm NH<sub>3</sub>, GHSV = 30.000 h<sup>-1</sup>

#### Einfluss von Wasser auf die SCR Aktivität von Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Silylierten Katalysatoren

 $T = 200^{\circ}C$ 



- Me<sub>3</sub>-Si und Ph-Si-Gruppen erhöhen Stabilität gegen Wasservergiftung (vgl. Desaktivierungsgrad)
- Organo-Silyl-Gruppen verbessern die Regenerierbarkeit (vgl. Regenerierungsgrad)
- aber unterdrücken drastisch die SCR-Aktivität (vgl. X<sub>NO</sub>)

# **Eigene Ergebnisse**

Experimentelles Zusammenfassung 2. PBA-Treffen Trägermaterial Aktive Komponente Einfluss von H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> Oberflächenmodifikation Aktivkohlebasierte Katalysatoren

# SCR-Aktivität von CuO<sub>x</sub>-haltigen Katalysatoren beladen auf Aktivkohle

PBS-AC Polymerbasierte (Blücher)  $A_{BET} = 1410 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}, 17 \text{ mas.}$ -% Cu AC: konventionelle AC (Gryfscand)  $A_{BFT} = 830 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 100 75 -17Cu/AC-RF  $X_{NO}/ \%$ 17Cu/PBS-AC 50 -3Cu/AC-HNO 17Cu/AC-RV 25 17Cu/AC-US-Acetat 17Cu/AC-US-Nitrat 0 100 150 200 250 300 350 400 Temperatur/°C

- AC und PBS-AC zeigen SCR-Aktivität nur oberhalb von 250 °C
- CuO<sub>x</sub>-Katalysatoren (17 mas.-% Cu) beladen auf AC und PBS-AC besitzen vergleichbare Aktivität
- Cu-Beladung erhöht die SCR Aktivität besonders in NT-Bereich
- Imprägnierungsmethode (RF, RV, US und Cu-Precursorsalz) beeinflusst die Aktivität
- Beladung von AC mit Cu-Oxiden f
   ördert die N<sub>2</sub>O-Bildung (Y(N<sub>2</sub>O) ca. 4-8% bei 200 °C)
- beschleunigt destruktiven Abbau von Aktivkohle (besonders oberhalb von 300 °C)

#### Vergiftung von 17Cu/PBS-AC Katalysator durch Wasser bei 220°C



reversible Vergiftung mit Wasser

- vollständige und schnelle Regenerierung nach ca.
   5 min
- Konkurrenzadsorption von Wasser und Edukten:
   c(H<sub>2</sub>O) >> c(NO), c(NH<sub>3</sub>) (vgl. 4.5 vol.-% und 500 ppm)



#### Vergiftung von 17Cu/PBS-AC Katalysator durch SO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O bei 220°C



- irreversible Vergiftung mit SO<sub>2</sub> (nur geringfügige Regenerierung nach 20 min)
- zusammenwirkender Effekt bei simultaner Vergiftung mit SO<sub>2</sub> in Gegenwart von Wasserdampf
- keine vollständige Regenerierung nach simultaner Vergiftung

# Wasser-Vergiftung von CuO<sub>x</sub> haltigen Katalysatoren beladenen auf Alumina und Aktivkohle



- AC und PBS-AC basierte CuO<sub>x</sub> Katalysatoren zeigen mehr Wasserresistenz als Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-basierte
- 17 Cu/PBS-AC -Katalysator besitz nur um ca. 1% höhere Resistenz als 17 Cu/AC
- Dotierung von Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mit SiO<sub>2</sub> nur um ca. 6% erhöht die H<sub>2</sub>O-Wasserresistenz
- Dotierung von Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mit MgO setzt die Wasserresistenz herab

#### UNIVERSITÄT LEIPZIG

## **Zusammenfassung und Ausblick**



### Zusammenfassung

- binäre Mn-, Cu- bzw. Fe-Mischoxid-Systeme haben teilweise höhere SCR-Aktivität bei NT und erhöhen gleichzeitig die N<sub>2</sub>O-Bildung
- Zunahme NO-Umsatz besonders im NT-Bereich durch FeO<sub>x</sub> und CuO<sub>x</sub> Beladung, jedoch gleichzeitige Zunahme der N<sub>2</sub>O-Bildung im NT-Bereich mit steigender Temperatur
- N<sub>2</sub>O-Bildung f
  ür Mn/TiO<sub>2</sub>-basierte Katalysatoren konnte durch Modifikationen reduziert werden
- Beladung von Mn/TiO<sub>2</sub> mit SiO<sub>2</sub> unterdrückt die N<sub>2</sub>O-Bildung und stabilisiert SCR-aktive Spezies (Mn<sup>n+1</sup>) auf Katalysatoroberfläche
- Silylierung mit Me<sub>3</sub>Si und PhSi verbessert die Wasserresistenz bzw. Desaktivierungsgrad, verringert jedoch die SCR Aktivität
- SCR Aktivität von Cu-haltiger AC bei 160-180 °C ist um ca. 20-30% niedriger als von Mn/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> und Mn/Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>, oberhalb von 250 °C tritt ein destruktiver Abbau von AK-Gerüst auf

#### **Ausblick**

- Untersuchung der Mischoxide: MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>x</sub> und MnO<sub>x</sub>-CuO<sub>x</sub>-CeO<sub>x</sub>
- Einfluss von CeO<sub>x</sub>-Beladung des Trägermaterials TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (7%)
- Untersuchungen zu Aktivkohle-basierten Katalysatoren:
   Verschiedene AK als Träger mit CeO<sub>x</sub>, MnO<sub>x</sub>, FeO<sub>x</sub>-Beladung
- Langzeituntersuchungen des Einflusses von SO<sub>2</sub> und Wasserdampf-Vergiftung (synthetische Alterung: hydrothermale Behandlung, Beladung mit Sulfaten/Hydrogensulfaten (NH<sub>4</sub>, ÜMO)
- Erhalt der Aktivität vs. Vergiftungs-Resistenz, Regenerierbarkeit Leaching-Stabilität

#### UNIVERSITÄT LEIPZIG

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit

3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses

Marcus Kasprick Wladimir Suprun Roger Gläser

Institut für Technische Chemie Universität Leipzig

