



universität
wien

MASTERARBEIT/ MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Einkristallsynthesen mikroporöser Phasen des Faujasit-Typs“

Verfasser / submitted by

Markus Wildner, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien 2015 / Vienna 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt:
degree programme code as it
appears on

the student record sheet:

Studienrichtung lt. Studienblatt:
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Betreut von / Supervisor:

A 0801498

A 066 815 Erdwissenschaften

Ao. Univ.-Prof. Dr. Christian L. Lengauer

Inhaltsangabe

Abkürzungen und Einheiten	Seite 3
Kapitel 1: Einführung	Seite 4
1.1: Zeolithe	Seite 4
1.2: Faujasit	Seite 6
1.3: Verwendung von Zeolithen	Seite 8
1.4: Synthesemethoden	Seite 9
Kapitel 2: Material und Methoden	Seite 11
2.1: Synthesen	Seite 11
2.2: Methoden	Seite 14
2.2.1: Kristallgrößenbestimmung	Seite 14
2.2.2: Pulver-Röntgendiffraktometrie	Seite 15
2.2.3: Thermogravimetrie	Seite 16
2.2.4: NMR-Spektroskopie	Seite 18
2.2.5: REM	Seite 20
Kapitel 3: Ergebnisse und Diskussion	Seite 21
3.1: Ergebnisse der Synthesen	Seite 21
3.2: Pulver-Röntgendiffraktometrie	Seite 25
3.3: Thermogravimetrie	Seite 27
3.4: NMR-Spektroskopie	Seite 31
3.5: REM	Seite 33
Kurzfassung	Seite 35
Abstract	Seite 36
Quellenverzeichnis	Seite 37
Anhang	Seite 42
Danksagung	Seite 48
Eidesstaatliche Erklärung	Seite 49
Lebenslauf	Seite 50

Abkürzungen und Einheiten

TEA	Triethanolamin
reh. Gew.	rehydriertes Gewicht
TG	Thermogravimetrie
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SBU	Sekundärbausteine
PRXD	Pulver-Röntgendiffraktometer
TO_4	Tetraeder-Kation (Si^{4+}/Al^{3+}) plus Sauerstoff
mg	Milligramm
μm	Mikrometer ($10^{-6}m$)
\AA	Angström ($10^{-10}m$)
K	Kelvin
$^{\circ}C$	Grad Celsius
s	Sekunden
kV	Kilovolt
U/min	Umdrehungen pro Minute

Kapitel 1: Einführung

Kapitel 1.1: Zeolithe

Definition für Zeolithe nach der Commission on New Minerals and Mineral Names (CNMMN) der International Mineralogical Association (IMA):

„Ein Zeolith ist eine kristalline Substanz, deren Struktur durch ein Kristallgitter aus miteinander verbundenen Tetraedern, jeder bestehend aus einem Kation und vier Sauerstoff-Atomen, charakterisiert wird. Dieses Kristallgitter enthält offene Hohlräume in Form von Käfigen und Kanälen. Diese sind gewöhnlich durch H_2O -Moleküle und zusätzliche Kationen, welche austauschbar sind, besetzt. Die Kanäle sind groß genug um Gastmoleküle passieren zu lassen. Wasserreiche Phasen können dehydrieren; die Entwässerung erfolgt meist bei Temperaturen unter etwa $400^\circ C$ und ist größtenteils umkehrbar. Das Kristallgitter kann durch (OH, F) -Gruppen unterbrochen sein; diese besetzen eine Tetraederspitze, die nicht mit einem benachbarten Tetraeder verbunden ist.“ (Coombs et al. 1998, Scheinpflug).

Zeolithe sind aus einem TO_4 -Tetraeder (T =Silizium (Si), Aluminium (Al) zusammengesetzte mikroporöse kristalline Alumosilikate. Die Teatraeder sind untereinander über Sauerstoffatome verknüpft. Die kristalline Struktur des Gerüsts (Framework) stellt sicher, dass auch die Poren über den gesamten Kristall gleichmäßig verteilt sind. Abhängig von der Porengröße können Zeolithe unterschiedlichen Frameworktypen zugeordnet werden (siehe Abb. 1). (Auerbach et al. 2003; Tschernich 1992).

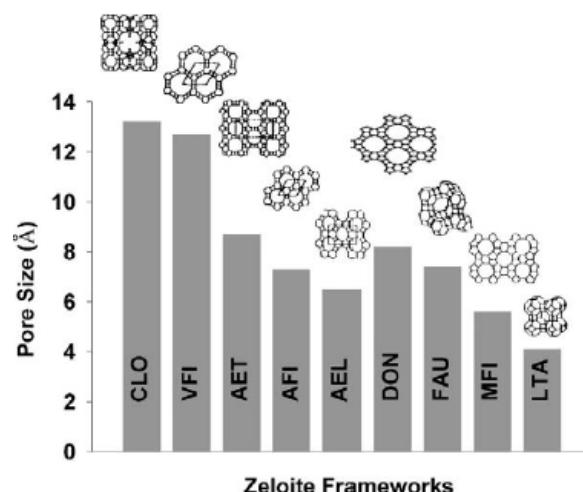


Abb. 1: Einteilung einiger Frameworktypen nach der Größe (entnommen aus Pramata & Dutta 2003)

Stilbit ($\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) war der erste entdeckte Zeolith und wurde 1756 von dem schwedischen Mineralogen A.F. Kronstedt erstmals beschrieben (Auerbach et al. 2003; Tschernich 1992). Heutzutage sind mehr als 40 natürliche Zeolithe bekannt. Die meisten dieser in der Natur vorkommenden Zeolithe haben ein niedriges Si/Al Verhältnis <1.5, da die strukturvorgebenden organischen Moleküle in der Natur (z.B.: TEA oder Kronenether) fehlen. (Auerbach et al. 2003; Tschernich 1992; Payra & Dutta 2003; Breck 1974; Barrer 1982; Dyer 1988; Bhatia 1990; Szostak 1992).

Mit den Zeolithen verwandt sind einerseits der Analcim ($\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$), als auch die Foide und Feldspäte. In der Natur kommen Zeolithe häufig als pulvrig-krustiger Überzug auf anderen Gesteinen vor (siehe Abb.2) (Markl 2008).



Abb. 2: Na-Faujasit vom Kaiserstuhl (Baden-Württemberg, Deutschland; weißer Überzug ist der Faujasit

Ein zeolithisches Gerüst kann man sich als begrenzten oder unbegrenzten in einer Kette oder Schicht vorkommenden Strukturbestandteil vorstellen. Diese SBU (Secondary Building Units), welche bis zu 16 (Si, Al)-Atome enthalten, bauen ein komplettes Gerüst auf. Auf der folgenden Seite (siehe Abb. 3) sind die derzeit 23 bekannten SBU's angegeben.

Secondary Building Units and their Symbols*

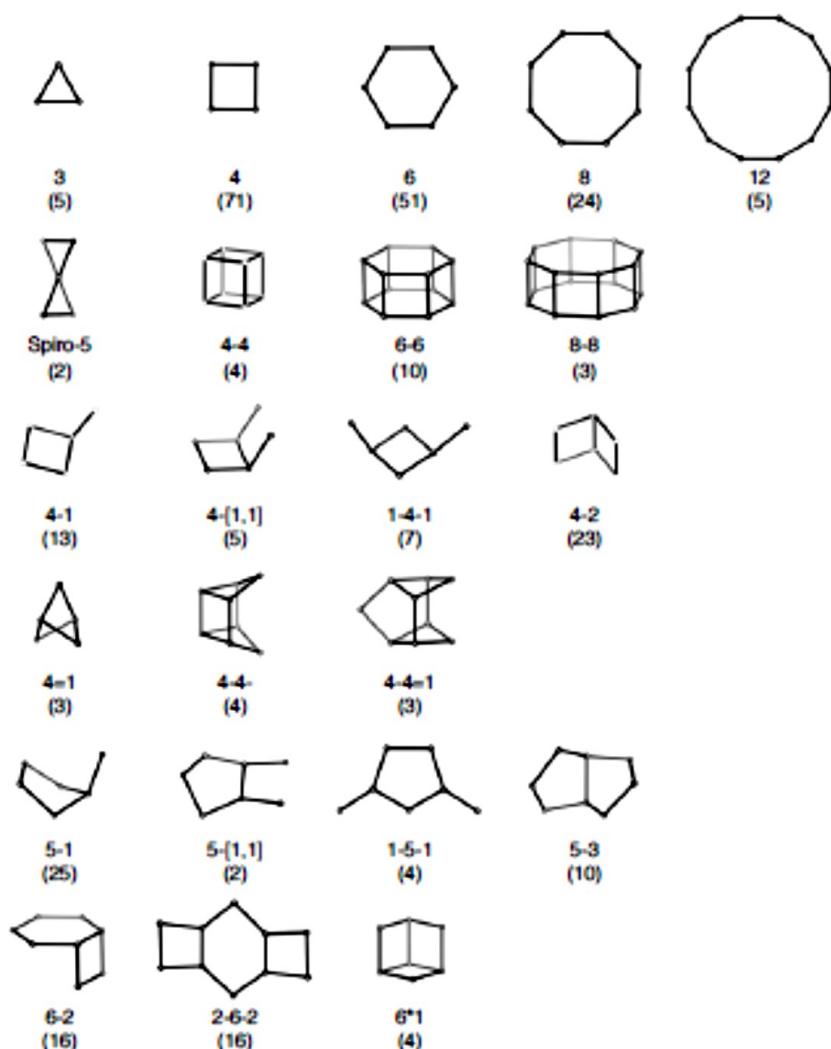


Abb. 3: Netzwerkbausteine (SBU) (entnommen aus Baerlocher et al. 2007)

Des Weiteren gibt es auch noch die Composite Building Units, die für eine weitere und genauere Klassifizierung der einzelnen Strukturen herangezogen werden können. (Baerlocher et al. 2007).

Im Grundgerüst des Fauajsits findet man das SBU 6-6 (D6R) als Verbindungsglied der Sodalithkäfige (siehe Abb. 4).

Kapitel 1.2: Faujasit

Erstmals wurde das Mineral Faujasit 1867 von *Damour* vom Kaiserstuhl (Baden-Württemberg, Deutschland) beschrieben. Die Struktur wurde von *Berghoff et al.* (1956,

1958) gelöst. Sie gehört zu den weitest geöffneten Frameworktypen aller natürlicher Zeolithe, mit 51% leerem Zellraum im dehydratisierten Zustand. Baur (1964) lokalisierte 40% der Kationen innerhalb des Sodalithkäfigs, welcher auch als β -Käfig, oder Kuboktahedron bezeichnet wird. (Gottardi & Galli 1978; Berghoff et al. 1956; Berghoff et al. 1958; Baur 1964).

Allgemein enthält der Faujasit mit der vereinfachten chemischen Formel $(\text{Na,Ca,Mg,K})_5(\text{Si,Al})_{12}\text{O}_{24} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, 52-68 Na-Atome, 10-20 Ca-Atome, 3-9 Mg-Atome und 1-6 K-Atome. (Smith 1988). In der folgenden Graphik ist die Struktur des Faujasits dargestellt.

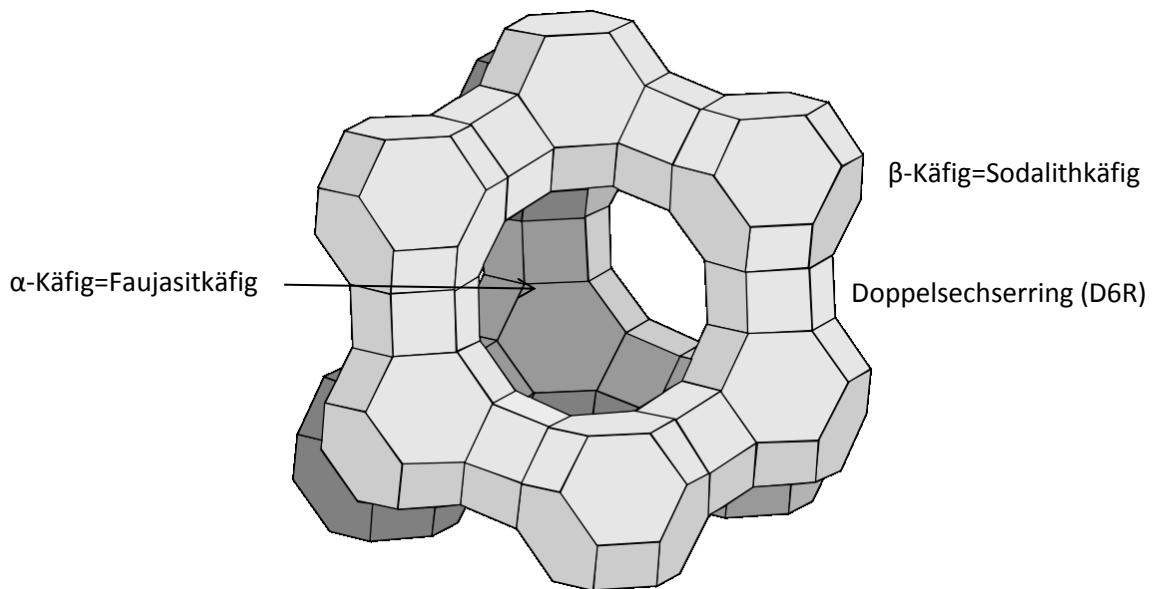


Abb. 4: entnommen und modifiziert aus http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faujasite_structure2.svg

Faujasit besitzt eine kubische Struktur und Raumgruppe $Fd\bar{3}Z$ als Symmetrie. Pro Elementarzelle besitzt dieser 8 Sodalithkäfige, 8 Superkäfige und 16 hexagonale Prismen. (Baerlocher et al. 2007).

Die großen Elementarzellen des Faujasites beinhalten 192 $(\text{Si,Al})\text{O}_4$ Tetraeder. In den synthetisch hergestellten Zeolithen X, Y, die dieselbe Struktur wie der Faujasit aufweisen, und dem Faujasit selbst verhält sich das Verhältnis von Al, N_{Al} und dem Si/Al Verhältnis wie folgt (Breck 1974):

$$N_{\text{Al}} = \frac{192}{1+R}$$

R ergibt sich hierbei aus folgendem Verhältnis: $R = N_{Si}/N_{Al}$. Die Al-Kationen in der Elementarzelle variieren hierbei zwischen 77 und 96. (Breck 1985). Das Si/Al Verhältnis ist auch der Unterschied zwischen den synthetisierten Formen Zeolith X und Y. Wenn dieses < 3 ist handelt es sich um Zeolith X, wenn dieses > 3 ist, dann liegt Zeolith Y vor. (Scherzer 1989).

Die Verbindung zwischen den einzelnen Sodalithkäfigen stellen die doppelten D6R oder hexagonale Prismen her. Diese enthalten 12 $(Si,Al)-O_4$ Tetraeder welche mit sechs Kationenaufenthaltsorten definiert sind. (Breck 1985).

Kapitel 1.3: Verwendung von Zeolithen

Zeolithe haben einen weitgefächerten Einsatzbereich. 2010 lag die Weltproduktion von natürlichen Zeolithen bei ca. 2.8-3.1 Mio. Tonnen (Virta 2010).

Zeolithe haben ein dreidimensionales Netzwerk gut angeordneter Mikroporen. Dieses ermöglicht Diffusionsprozesse und kann die Aktivität bei chemischen Reaktionen limitieren. (Tao et al. 2006; Kärger & Ruthven 1992).

Als Ionenaustauscher finden Zeolithe bei der Speicherung von Schadstoffen und radioaktiver Isotope wie Strontium, Cäsium oder Jod Verwendung. Bei dem AKW-Unglück in Fukushima im Jahre 2011 wurde überlegt Zeolithe für dieses Problem anzuwenden. Diese können nämlich radioaktive Isotope in ihre Poren aufnehmen und einschließen. (www.spiegel.de/Briseño 2011). Für diese katalytische Aktivität eines Zeolithes sind die sauren Gruppen sowie die elektrostatischen Felder innerhalb der Zeolithe verantwortlich. Mit dieser Eigenschaft lassen sich maßgeschneiderte Katalysatoren entwickeln. (Tao et al. 2006; Kärger & Ruthven 1992).

Heutzutage werden Zeolithe in großen Mengen in der Landwirtschaft verwendet. Sei es als Schwermetallabsorber im Bereich der Düngung, oder als Nahrungsergänzung bei Tieren, etwa Klinoptilolith und Mordenit. (Mumpton & Fishman 1977; Mumpton 1984).

Eine weitere wichtige Rolle spielen Zeolithe in der Produktion von Treibstoffen und wichtigen Rohmaterialen aus Erdöl. Mit einer Jahresproduktion von 625 Millionen Tonnen im Jahre 2004 repräsentiert das FCC-Verfahren den zweitwichtigsten katalytischen Prozess.

Als eine aktive Reaktionskomponente findet man im Katalysator Zeolith H-Y. (*Berger et al. 2005*).

Die typische Größe für FCC Partikel liegt zwischen 30 µm und 100 µm. Diese Partikel enthalten Zeolithkristalle in einer sogenannten Matrix. (*Kortunov et al. 2005*).

Das Verfahren selbst besteht aus einem dreistufen-Prozess: Reaktion, Produktseperation und Regeneration. In dem Verfahren werden langkettige Kohlenwasserstoffrückstände der Glockenbodendestillationskolonnen auch als schwere Öle bezeichnet, in leichtere Produkte konvertiert. Ein saurer USHY Zeolith, eine aktive Alumina Matrix, eine inerte Matrix (Kaolin) und ein Bindemittel sind hauptverantwortlich für die enorme Anzahl an Reaktionen während des FCC Verfahrens. Die Temperaturen bei denen dieses Verfahren produktiv ist, belaufen sich auf ca. 420-520 °C, also 700-800 K. (*Pinheiro et al. 2012*).

Kapitel 1.4: Synthesemethoden

In der Literatur sind drei verschiedene Wege angegeben um Zeolitheinkristalle zu synthetisieren. Diese wären auf der einen Seite der Syntheseweg nach *Charnell* (1971), andererseits der Syntheseweg nach *Delprato* (1989) und drittens der nach *Bibby & Dale* (1985). *Charnell* verwendete erstmals Triethanolamin als komplexbindenden Ligand. *Delprato* verwendete anstelle von Triethanolamin Kronenether. *Bibby & Dale* synthetisierten erstmals Einkristalle mithilfe der Solvothermalsynthese. *Charnell* stellte zuerst zwei Lösungen her. Auf der einen Seite eine Siliziumlösung und auf der anderen Seite eine Aluminiumlösung. Für die Siliziumlösung benutzte er als Quelle Natriummetasilikat und für die Aluminiumlösung Natriumaluminat. Vor der Zugabe von TEA wurden beide Lösungen durch einen Filter mit 0.2 µm gereinigt. Anschließend wurde beiden Lösungen Triethanolamin hinzugefügt. Nach der Zugabe wurden beide Lösungen für 5 Minuten gerührt und anschließend zusammengemischt. Dieses entstandene Gel wurde anschließend in eine Polypropylenflasche gegeben. Nach 3-5 Wochen war Zeolith X mit einer Größe von 100 µm - 140 µm auskristallisiert (*Charnell* 1971).

Delprato fertige wie *Charnell* auch zwei Grundlösungen an. Diesen fügte er jedoch Kronenether hinzu. Anders als *Charnell* stellte er jedoch das Gel nicht in einen

Trockenschrank bei 85 °C sondern in einen Autoklaven mit 110 °C. Die Kristallitgröße betrug nur 5 µm. (*Delprato et al. 1990*).

Bibby & Dale synthetisierten erstmals 1985 Sodalith in einer Solvothermalsynthese. Dazu verwendeten sie ein nicht wässriges Medium und fügten diesem als Siliziumquelle Kieselsäure hinzu. Als komplexbildender Ligand wurde hier einerseits Ethylenglycol als auch Propanol verwendet. Als Natriumquelle diente Natriumhydroxid oder aufgeschäumtes Silica. Die Kristallisationsdauer betrug bei 150 °C zwischen 15-25 Tage. Die Kristallgröße konnte bis zu 30 µm erreichen. Bei höherem Si/Al Verhältnis konnte beobachtet werden, dass die Morphologie sich mehr in Richtung okt./dodek. Kristalle hin verändert. Bei niedrigerem Al-Anteil nahm auch die Größe der Kristalle ab. Hierbei lag diese nunmehr zwischen 5 µm-20 µm. (*Bibby & Dale 1985*).

In der anschließenden Tabelle 1 sind noch einmal die grundlegenden Unterschiede der drei oben angeführten Synthesewege dargestellt.

Tabelle 1: Synthesemethoden

Chemische Bestandteile	Charnell	Delprato	Bibby und Dale
Na₂O	3.5-4.9	2.4	Keine Angabe
Al₂O₃	1.0	1.0	Keine Angabe
SiO₂	2.2-3.6	10.0	Keine Angabe
H₂O	385-522	140	Keine Angabe
TEA Kronenether Propanol	7.0-10.1	0.5-1.0	Keine Angabe
d_{cryst}max/(µm)	100-140	5	30
Si/Al	1.3-1.5	3.8-5	Keine Angabe
Kristallisationsdauer in Wochen	3-5	Abhängig von Wasserstoff Na₂O/Al₂O₃-Verhältnis	2-3.5

Man kann erkennen, dass *Charnell* mit Abstand die größten Kristalle hervorbrachte. *Bibby und Dale* brachten dazu im Vergleich um ca. 100 µm kleinere Kristalle. *Delprato* hatte die kleinsten Kristalle mit nur 5 µm. Weiters auffällig ist auch das große Si/Al Verhältnis bei

Delprato im Gegensatz zu *Charnell*. Auch in Bezug auf die Dauer der Kristallisation konnte *Charnell* relativ genaue Aussagen treffen.

Kapitel 2: Material und Methoden

Kapitel 2.1: Synthesenherstellung

Die hergestellten Synthesen des Zeolithes X wurden nach dem Rezept von *Charnell* durchgeführt. Die Bezeichnungen NaX 050, NaX 075, NaX 100, NaX 150, NaX 200, NaX 250 und NaX 300 beziehen sich auf den im Verhältnis zu den anderen Gemengteilen immer größer werdenden TEA-Anteil. Bei NaX 075/65° bezieht sich die zweite Zahl auf die Temperatur die im Unterschied zu den anderen um 10° Celsius niedriger war. Eine genaue Mengenangabe ist der anschließenden Tabelle 3 zu entnehmen. Durch den einheitlichen Herstellungsprozess für alle Zeolithe in dieser Arbeit werden die einzelnen Schritte, wie die Herstellung des Synthesegels und der anschließenden Filtration zur Gewinnung der Kristallite, exemplarisch an Zeolith NaX 100 dargestellt.

Für die Synthese des Zeolithes mit Bezeichnung NaX 100 wurden am Anfang zwei Gele hergestellt, ein Aluminiumgel (Al-Gel) und ein Siliziumgel (Si-Gel). In zwei Bechergläsern wurde jeweils deionisiertes Wasser von jeweils 175 ml pro Gelansatz und das jeweilige Pulver für die beiden Ansätze zusammengefügt. Die Herstellung des Si-Gels erfolgte mit Natriummetasilikat (Sigma Aldrich S4392-250G) und für das Al-Gel mit Natriumaluminat (Riedel de Håen 13404). Alle Lösungen wurden mit einem Magnetrührer bis zur vollständigen Auflösung des Feststoffes gerührt. Anschließend wurde TEA (Sigma Aldrich 33726) in den in Tabelle 3 aufgelisteten Verhältnissen zugesetzt und die Lösungen für 65h gerührt. Das Si-Gel hatte einen pH-Wert von 13,5 und das Al-Gel einen pH-Wert 13,2. Nach weiteren 24 Stunden konnte die Bildung von Eisenoxiden (Magnetit) beobachtet werden, die als Ausfällungsprodukt am Magnetrührstäbchen sichtbar wurde. Danach erfolgte die Filtration durch einen Säure-Basen Filter mit 0,2 µm Porengröße der Firma Santorius-Stedim. Um ein schnelleres Durchfließen durch diesen zu ermöglichen wurde die Filtrationsapparatur zusätzlich an eine Laborpumpe (KNF Neuberger Laborpart) angeschlossen. Nachdem beide Gele filtriert waren, wurden diese mit einem großen Rührgerät (Nickel und Kunz) mit 250 U/min während 5 min zu einem homogenen Gemisch verrührt. Anschließend wurde diese

Suspension in eine Nalgenflasche abgefüllt. Diese wurde wiederum in ein mit Silikon Öl gefülltes Becherglas für eine gleichbleibende Temperatur gestellt. Zusätzlich wurde unter die Nalgenflasche noch Glaswolle gegeben um einen weiteren Schutz für die gleichbleibende Temperatur zu erhalten. Anschließend wurde das Becherglas samt Nalgenflasche in einen Trockenschrank (WTB Brüder) mit 75°C gestellt. Bei der Synthese von NaX 075 wurden die Proben zusätzlich bei 65°C behandelt, wodurch es möglich war auch den Einfluss der Temperatur zu untersuchen.

Nach 28 Tagen wurden die am Flaschenboden sedimentierten Kristallite aus dem Trockenschrank entnommen. Um die Kristalle aus der Flasche zu bekommen, wurde der flüssige Anteil entfernt, der pH-Wert lag bei 13.5. Nachgespült wurde mit demineralisiertem Wasser. Mit einem Spatel wurden die am Rand der Flasche befindlichen Kristalle abgekratzt. Anschließend wurde dieses Gemisch auf Filterpapier (S&S Filter Paper Circles) gegeben um die Flüssigkeit mit einem Büchnerfilter abzunutschen. Die so erhaltenen Kristallite wurden eine Woche lang bei 65°C getrocknet. Die anschließende Tabelle 2 zeigt die verwendeten Reinstchemikalien, deren Reinheit und Verunreinigungen in Form von Nebenelementen an. In Tabelle 3 sind die molaren Mengen der verwendeten Reinstchemikalien plus den Ertrag der jeweiligen Synthesen. Die (Abb. 5-10) zeigen die Synthesen des NaX 075/75°, NaX 100 und NaX 150 zu Beginn und am Abnutzungstag.

Tabelle 2: Verwendete Reinstchemikalien

Name	Formel	Firma	Reinheit	Nebenelemente
Natriummetasilikat	Na ₂ SiO ₃ +9H ₂ O	Sigma-Aldrich	≥98%	Keine Angabe
Natriumaluminat	NaAlO ₂	Sigma-Aldrich	≥99%	Fe ₂ O ₃
Triethanolamin	C ₆ H ₁₅ NO	Sigma-Aldrich	≥99%	Fe, SO ₄
Kaliumhydroxidpellets	KOH	Fluka Chemicals	97%	-----
Natriumhydroxidpellets	NaOH	Merck KGA	97%	Cl, SO ₄ , Pb, Al, Fe,

Tabelle 3: Überblick über die Synthesen

Zeolith plus Temperatur	Wasser H ₂ O n(mol)	Natriummetasilikat Na ₂ SiO ₃ +9H ₂ O n(mol)	Natriumaluminat NaAlO ₂ n(mol)	TEA C ₆ H ₁₅ NO n(mol)	Ausbeute Kristallin in [g]	Ausbeute Amorph in [g]
NaX 050 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	0.5	-----	15.1
NaX 075 bei 65°C	19.45	0.085	0.1225	0.75	12.0	-----
NaX 075 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	0.75	13.4	-----
NaX 100 Bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	1.00	10.1	-----
NaX 150 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	1.50	-----	16.1
NaX 200 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	2.00	7.5	12.6
NaX 250 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	2.50	13.0	-----
NaX 300 bei 75°C	19.45	0.085	0.1225	3.00	2.1	-----

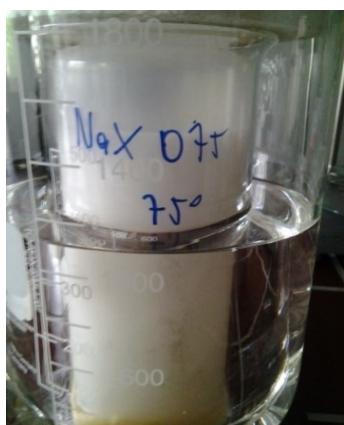


Abb. 5: NaX 075/75°
Herstellungstag

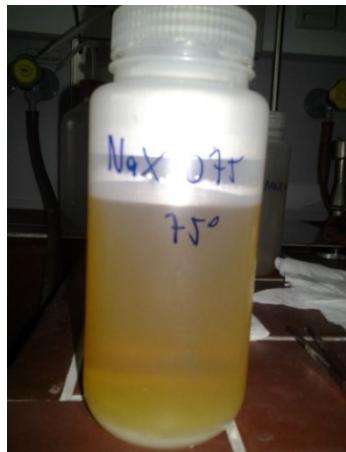


Abb. 6: NaX 075/75°Abnutschungstag



Abb. 7: NaX 100 nach 5 Tagen;
erkennbar ist eine Absetzung des
Amines



Abb. 8: NaX 100 Abnutzungstag



Abb. 9: NaX 150 Herstellungstag

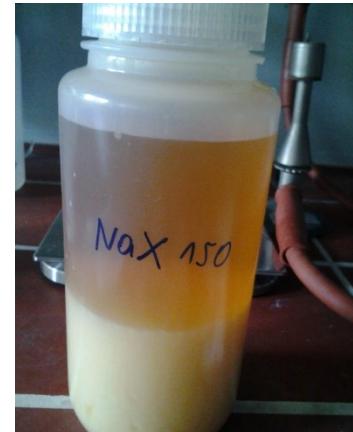


Abb. 10: NaX 150 Abnutzungstag

Kapitel 2.2: Methoden

Kapitel 2.2.1: Kristallgrößenbestimmung

Für statistische Berechnungen im Bereich der deskriptiven Statistik im Rahmen dieser Arbeit wurden pro NaX -Synthese jeweils 31 Kristalle vermessen. Die Messungen erfolgten mit dem Leica M165 C Binokular siehe (Abb. 12). Als Bildverarbeitende Software wurde die Leica Application Suite verwendet (V 4.2.0). Der Vergrößerungsfaktor lag bei 10. Um die Kristalle auf dem Glasplättchen ausmachen und dementsprechend vermessen zu können wurde einen Brechungsindex von $n=1.45$ verwendet.

Es wurde geschaut, welche Probe jeweils die größten bzw. die kleinsten Kristalle hervorbrachte. Des Weiteren wurden die Standardabweichung und auch das arithmetische Mittel in Form der Durchschnittsgröße berechnet.



Abb. 11: Leica M165 C Binokular aus
<http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#>

Kapitel 2.2.2: Pulver-Röntgendiffraktometrie

Mittels Pulver-Röntgendiffraktometrie lässt sich eine quantitative Phaseninformation aus Multikomponentenmischungen erhalten. (*Bish & Howard 1988*).

Der Beweis für die Oberflächenrauhigkeit durch körnige Strukturen von Proben geht auf *Wolff (1956)* zurück. Dafür verwendete er eine spezielle Lumineszenz und stellte dadurch eine Reduktion, in Form von kleineren Streuwinkeln, der Intensität im Reflektionsfall fest. (*Suortti 1972*).

Die Korngröße der verwendeten Probe ist am besten zwischen 1 µm -10 µm. Durch die mechanische Beanspruchung beim Reiben, kann es infolge der Erwärmung zu Phasenumwandlungen der Probe kommen. (*Allmann 2003*).

Bei der herkömmlichen Phasenanalyse wurden die Proben jeweils gemahlen und anschließend in einen Probenträger gegeben. Dieser wurde dann mithilfe eines Stempels flachgedrückt. Gemessen wurde bei den Phasenanalysen von 5-55 °2θ mit jeweils 0.02

$^{\circ}2\theta$ /Schritt und 2 s Messdauer pro Schritt. Bei den Austauschreaktionen wurde die Zeit auf 3 s verlängert um eventuelle Unterschiede zu verdeutlichen.

Für die Pawley-Verfeinerung (*Dinnerbier & Billinge 2008*) wurde das gemahlene Pulver auf einem Siliziumplättchen, welches vorher mit ein wenig Fett eingerieben wurde um die Probe haftend zu machen, aufgebracht. Wichtig war, darauf zu achten, dass das Pulver eine geschlossene Fläche auf dem Si-Plättchen bildete um Artefakte im Vorhinein zu vermeiden. Anschließend wurde dieses mit einer Glasplatte in den Träger gepresst. Für die Pawley-Verfeinerung wurden die Proben zwischen 5°-120 ° 2θ gemessen. Gemessen wurde mit der Schrittweite 0.02 ° 2θ und jeweils 4 s pro Schritt. Die eingestellte Stromstärke lag bei 40 mA und die Spannung bei 40 kV. Verwendet wurde das Pulverdiffraktometer X'Pert der Firma Phillips Abb. 12 mit einer Kupfer K-Alpha Strahlung.



Abb. 12: Pulverröntgendiffraktometer X'Pert der Firma Phillips
<http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#Equipment>

Kapitel 2.2.3: Thermogravimetrie

Obwohl die frühe Entwicklung der Thermogravimetrie schon 1903 begann, wird dieses analytische Werkzeug erst seit 65 Jahren eingesetzt. (*Earnest 1984*).

„Thermogravimetrie (TG) ist eine Technik in welcher die Masse einer Substanz als Funktion der Temperatur oder der Zeit beobachtet wird, während die Probe einem kontrollierten Temperaturprogramm ausgesetzt ist“ (Zitat aus *Thermogravimetry (TG) of polymers; DIN EN ISO 11358, Seite 2, Nov. (1997)*).

Man unterscheidet zwei verschiedene Modi in der Thermogravimetrie: Auf der einen Seite den Temperatur-Scanning Modus und auf der anderen den Isothermen Modus. In dieser Arbeit wurde der Temperatur-Scanning Modus verwendet um zu untersuchen bei welchen Temperaturen sowohl Wasser als auch organische Anteile, falls vorhanden, entweichen. (*Thermogravimetry (TG) of polymers; 1997; DIN EN ISO 11358*)

Die erhaltenen Daten werden dann in der Form: Massenverlust und prozentualer Massenverlust pro Zeit und Temperaturkurve wiedergegeben.

Für diesen Massenverlust gibt es zwei unterschiedliche Formeln: Einerseits für einstufigen und andererseits für mehrstufigen Verlust. (*Thermogravimetry (TG) of polymers (1997)*).

Formel für einstufigen Verlust:

$$M_L = \frac{m_s - m_f}{m_s} \times 100$$

m_f = Masse in Milligramm bei der Finalen Temperatur

m_s = Masse in Milligramm, vor dem Aufheizen

Formeln für mehrstufigen Verlust:

$$M_{L1} = \frac{m_s - m_i}{m_s} \times 100$$

m_i = Masse in Milligramm, bei erster Stufe

m_s = Masse in Milligramm vor dem Erhitzen

$$M_{L2} = \frac{m_i - m_f}{m_s} \times 100$$

m_i = Masse in Milligramm bei der zweiten Starttemperatur

m_f = Masse in Milligramm bei der zweiten Endtemperatur

m_s = Masse in Milligramm vor dem Erhitzen



Abb. 13: Darstellung der Thermogravimetriemessgerätes Firma Mettler-Toledo aus
<http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#Equipment>

Die Proben selbst wurden in Korund-Tiegel eingefüllt. Um vergleichbare Messergebnisse zu erzielen wurde versucht vom ersten Tiegel an in etwa das gleiche Gewicht, zwischen 15 mg-16 mg, in jeden Tiegel einzuwiegen. Der Temperaturmessbereich lag zwischen 50-630 °C. Die Messungen selbst fanden unter Normdruck mit einer Aufheizungsrate von 5 °C pro Minute statt. Das Gerät selbst hat einen 34-fach Probenwechsler, der es ermöglichte mehrere Proben in einem Durchlauf zu messen. Die Ergebnisse wurden in einem Massenverlust über Temperatur Diagramm dargestellt.

Kapitel 2.2.4: NMR-Spektroskopie

„NMR ist ein physikalisches Phänomen welches gebraucht wird um Molekulare Eigenschaften anhand der ungleichmäßigen Bewegung der Atomkerne in einem magnetischen Feld mit Wellen im Radiofrequenzbereich zu untersuchen.“ (Blümlich 2005).

Heutzutage findet die NMR-Methode Großteils Verwendung in der Medizin, aber auch in der Mineralogie. In dieser Naturwissenschaft gibt sie Aufschluss über das Verhalten der Atome zueinander aber auch über deren Struktur in Molekülen. (Blümlich 2005; Chester & Derouane 2009).

Die obig genannte Definition besagt nichts anderes, als dass Atomkerne verschiedene Spins besitzen. Unter Spin versteht man die Eigendrehung eines Atoms um sich selbst. Man unterscheidet Alpha und Betaspins. Der Kernspin wird mit einem großen I gekennzeichnet. Ein anderer Name dafür ist auch Angular Momentum. Man unterscheidet Kernspins mit $I=<1/2$, $I=1/2$ und $I=>1/2$. Dieser kann aber nur in Zusammenhang mit einem magnetischen Feld gemessen werden. Da die Atome Elektronen besitzen induzieren sie ein eigenes Magnetisches Feld. Dieses wiederum schirmt diese von dem externen magnetischen Feld ab. Der Unterschied zwischen beiden wird dann gemessen und ist wie ein Fingerabdruck für jedes einzelnes Moleköl. (*Blümlich 2005*).

Im Folgenden ist auch ist die Magnetquantenzahl wichtig. Diese gibt Auskunft über die Orientierung im Magnetfeld selbst. Sie kann Werte von $m=-l,...,l$ annehmen. Die Magnetquantenzahl selbst wird mit der Formel $2l+1$ angegeben. Weiters für die Beschreibung wichtig ist die Lamourgeschwindigkeit. Diese entsteht durch die Kreisbahn der Spins in einem Magnetfeld. Sie ist proportional zur Magnetfeldstärke B_0 . Die Lamourfrequenz, welche sich aus der Lamourgeschwindigkeit berechnen lässt ist gleichzeitig auch die sogenannte „Resonanzbedingung“. Dies gibt den Zustand an, bei dem die Kerne höhere Energieniveaus erreichen indem eingestrahlte elektromagnetische Energie dieselbe Wellenlänge wie die Lamourfrequenz besitzt. (*Merten & Willmann 2005*).

$$\nu_0 = \frac{\gamma_1}{2\pi} B_0$$

ν_0 Geschwindigkeit

B_0 Mag.Flux-Geschwindigkeit (mag.Feldstärke)

γ_1 Winkel

2π Winkelgeschwindigkeit

Um anzugeben ob ein Atom mit NMR untersucht werden kann, wird das gyromagnetische Verhältnis verwendet. Je kleiner die Werte, desto schlechter ist dieser Kern untersuchbar. Dadurch, dass diese Atome aus noch kleineren Partikeln bestehen bedient man sich zur Beschreibung der Kernspins der Quantenmechanik. Beschrieben werden diese Interaktionen der Dipole der Kerne untereinander mit dem sogenannten totalen Hamiltonian. (*Chester &*

Derouane 2009). Diese beschreiben alle physikalischen Interaktionen eines Dipol-Dipol Systems die für so ein System relevant sind.

$$\hat{H} = \hat{H}_{II} + \hat{H}_{IS} + \hat{H}_{csa} + \hat{H}_q$$

H_{II} : homonukleare magnetischer dipol-dipol Interaktion

H_{IS} : heteronukleare magnetischer dipol-dipol Interaktion

H_{csa} : Anistoroper Chemischer Schutzschild

H_q : Quadropolare Interaktion

Kerne, bei denen $I>1/2$ ist, werden mit den ersten drei Termen beschrieben (*Chester & Derouane 2009*).

Kapitel 2.2.5: Rasterelektronenmikroskopie

Um die vorhandenen Phasen exakter bestimmen zu können sowie um Aufschluss zu bekommen welche Art von Zwillingen vorhanden sind, wurden Untersuchungen mit einem REM der Firma FEI (siehe Abb. 14) durchgeführt. Die Röhrenspannung betrug 10kV für die Bilderaufnahme mit einer Spotgröße von 5. Die Vergrößerung der aufgenommenen Bilder lag zwischen 1000x und 5000x-facher. Pro NaX-Phase wurden ungefähr 20, von ihrer Form her eckige und 20 runde Einkristalle auf ein Kohlenstoffplättchen gesetzt. Diese wurde wiederum vorher auf einen Probenträger gelegt. Die Kristalle unterschieden sich sowohl in der Größe als auch in der Transparenz. Bei der Auswahl der Kristalle wurde daher darauf geachtet eine möglichst große Bandbreite zu gewährleisten um möglichst viele Daten der synthetisierten Kristalle zu erhalten.

Eine Kohlenstoffbedämpfung wurde nicht durchgeführt, da man im Vorhinein nicht wusste ob die Kristalle durch eingeschlossenes Wasser, immerhin bis zu 14,96 Gewichtsprozent

ausgehend von der allgemeinen stöchiometrischen Formel (siehe Seite 9), dem Hochvakuum bei 1.94×10^{-4} Pascal im REM standhalten würden.



Abb. 14: Rasterelektronenmikroskop der Firma FEI entnommen aus
<http://lithosphere.univie.ac.at/petrology/infrastructur/sem-fib-system/>

Kapitel 3: Ergebnisse und Diskussion

Kapitel 3.1: Ergebnisse der Synthesen

Der Ansatz des NaX 100 stand vier Wochen im Trockenschrank um Kristallite zu bilden. Ausgehend von dieser Annahme, wurde untersucht wie sich eine eventuelle Zugabe und eine Verringerung des TEA- Anteiles auf die Kristallisierungsdauer auswirken. Da es bei der Originalsynthese 4 Wochen in Anspruch nahm, wurde die Theorie aufgestellt, dass eine 50 % Erhöhung der Zugabe an TEA auch eine Zunahme der Synthesedauer von 2 Wochen, insgesamt 6 Wochen im Falle des NaX 150, ergeben würde. Diese lineare Abhängigkeit bestätigte sich bei einem Großteil der Synthesen (siehe Abb. 20). Am längsten zum auskristallisieren brauchte der Ansatz des NaX 300 mit einer Dauer von 12 Wochen (Abb. 20). Die Differenz zwischen NaX 075 und NaX 100 beträgt ungefähr eine Woche, da nur 25 % mehr TEA enthalten sind als im ursprünglichen Rezept. Ein weiterer Faktor, der die Dauer einer Synthese zur Auskristallisation verlängert, ist die Temperatur. Wie man anhand des

Beispiels des NaX 075/65° sehen kann verlängert sich diese um eine Woche bei einer Differenz von 10 °C. Dies ist in der folgenden Graphik (Abb. 15) ersichtlich.

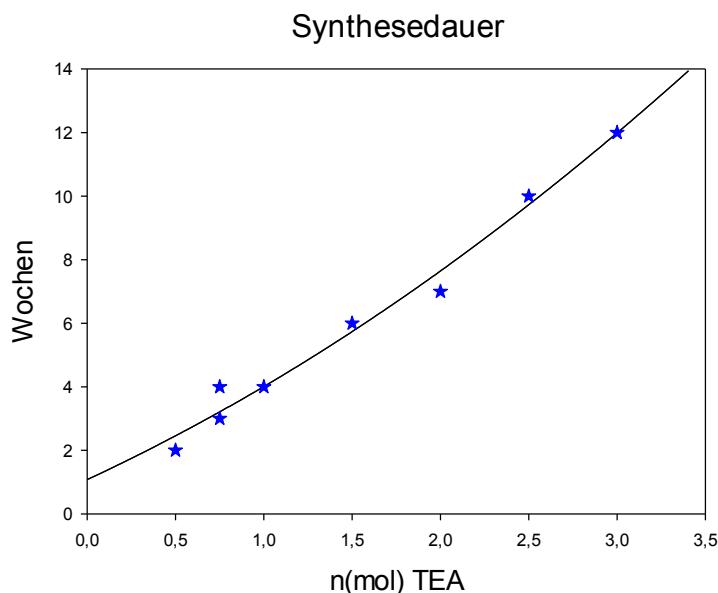


Abb. 15: Kristallisationsdauer der einzelnen Synthesen

Das beigemengte TEA hatte nicht nur Auswirkungen auf die Dauer der Kristallisation, sondern auch auf die Größe der Kristalle. In der folgenden Grafik erkennt man, dass die Durchschnittsgröße mit steigendem TEA-Anteil zunimmt. Bei einem 75% Anteil des TEA, NaX 075/65° und NaX 075/75°, ausgehend vom Originalansatz, NaX 100, erhält man Kristalle mit einer Durchschnittsgröße von rund 51 µm (Abb. 16). Diese Vergrößerung der synthetisierten Faujasitkristalle setzt sich dann mit weiterer Erhöhung des Anteiles an TEA immer weiter fort. Am deutlichsten sticht jedoch der NaX 250 hervor mit einer Durchschnittsgröße von 109 µm. Der Grund für diese Zunahme liegt in der komplexierenden Wirkungsweise des TEA. Je mehr vorhanden ist, desto mehr Al³⁺-Ionen werden langsamer in die Kristallstruktur eingebaut und somit hat diese mehr Zeit zu wachsen und somit größere Kristalle hervorzubringen. Der Gebrauch von TEA als ein Additiv zur Zeolithsynthese von A und X hat sowohl Auswirkungen auf die Viskosität des Reaktionsmedium, als auch auf die Reaktivität von Aluminium bei der Keimbildung. (Yang et al. 2005).

Tabelle 4: Statistik Durchschnittsgröße; Werte gerundet

	Mittelwert	Standardabw.	Min.	Max.
NaX 075/65°	46 µm	7	30 µm	61 µm
NaX 075/75°	54 µm	5	41 µm	65 µm
NaX 100	50 µm	7	38 µm	71 µm
NaX 150	62 µm	4	55 µm	73 µm
NaX 200	62 µm	8	35 µm	75 µm
NaX 250	109 µm	21	56 µm	144 µm
NaX 300	81 µm	12	53 µm	100 µm

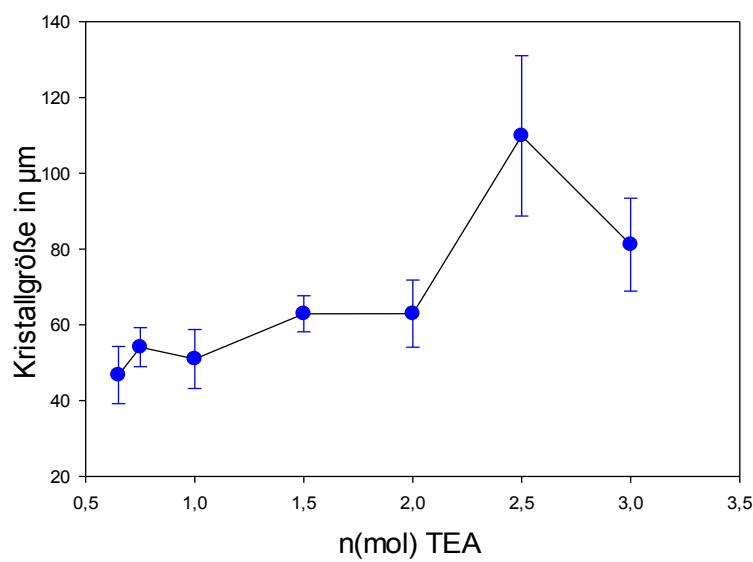


Abb. 16: Durchschnittliche Kristallgröße der einzelnen Synthesen

Anhand der nächstfolgenden Grafiken (Abb. 17-23) sieht man die Kristallgrößenverteilungen der einzelnen Synthesen anhand von Histogrammen graphisch dargestellt. Pro Synthese wurden 31 Kristalle gemessen (Tabellen 9 und 10, Anhang). Grund hierfür dürfte der zu niedrige TEA-Anteil sein. Man kann erkennen, dass die Kristallgröße mit steigendem TEA-Anteil größer wird. Die Graphik ist zweigeteilt, um die Ergebnisse der einzelnen Synthesen besser miteinander vergleichen zu können. Wie man sehen kann hat auch die Temperatur einen Einfluss auf das Kristallwachstum, Vergleich NaX 075/65° mit NaX 075/75°. Die Größen der einzelnen Kristallite sind in den Tabellen im Anhang zusammengefasst. Bei der mechanischen Beanspruchung infolge des Vorbereitens für die Pulver-Röntgendiffraktometrie fiel auf, dass dies die Kristallstruktur selbst zerstört und am Beispiel des Zeolithes zu Wasseraustritt aus den Poren führt. Beobachtet wurde dieser Vorgang bei NaX 150 und NaX200.

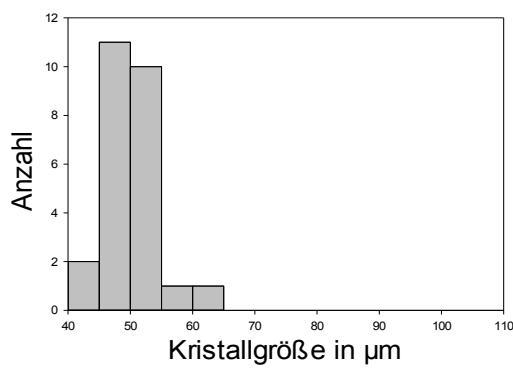


Abb. 17: Kristallgrößen der Synthese NaX 075/65°

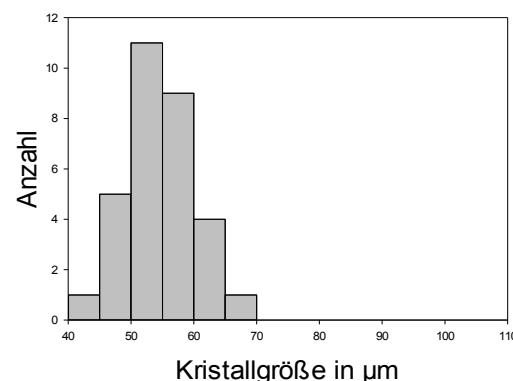


Abb. 18: Kristallgrößen der Synthese NaX075/75°

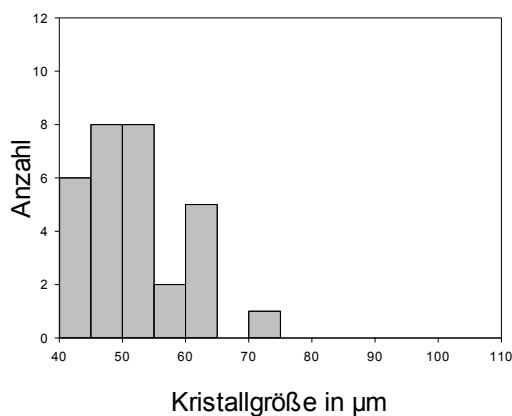


Abb. 19: Kristallgrößen der Synthese NaX 100

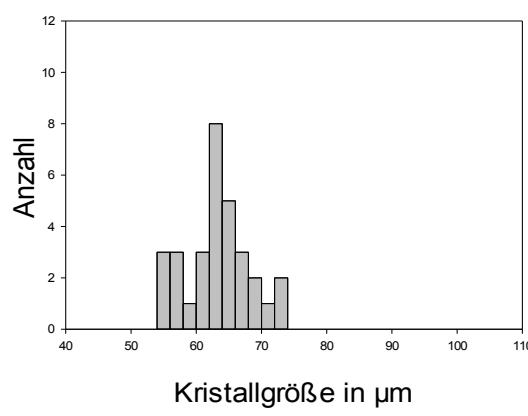


Abb. 20: Kristallgrößen der Synthese NaX 150

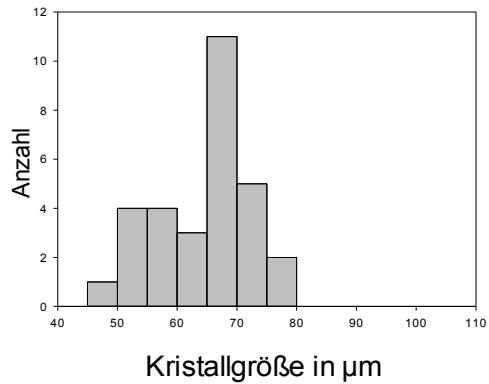


Abb. 21: Kristallgrößen der Synthese NaX 200

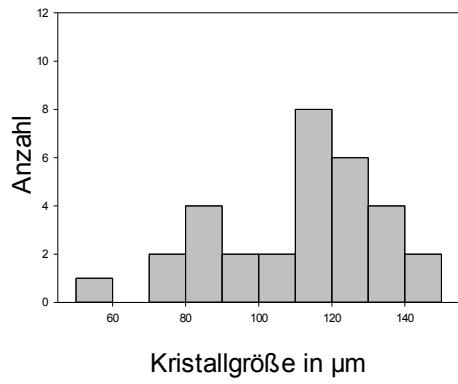


Abb. 22: Kristallgrößen der Synthese NaX 250

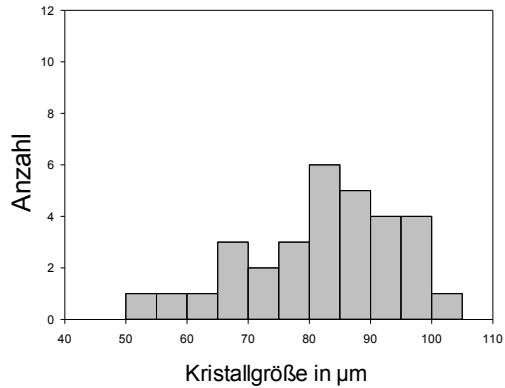


Abb. 23: Kristallgrößen der Synthese NaX 300

Kapitel 3.2: Pulver-Röntgendiffraktometrie

Bei der Pulver-Röntgendiffraktometrie wurde mithilfe der Pawley-Verfeinerung (*Dinnebier & Billinge 2008*) versucht die Größe der Elementarzellen er einzelnen Synthesen zu bestimmen. Bei den Austauschreaktionen ist auch noch zu beobachten, dass bei der 1 molaren KOH die Elementarzelle um 1-2 % größer wurde. Bei Natrium schrumpfte diese jedoch um bis zu 5.9 %. In den folgenden Tabellen und Graphiken können diese Werte entnommen werden. Der Δ -Wert steht für den Größenvergleich innerhalb der Synthesen. Der $\Delta 2$ -Wert ist der Vergleich der Originalsynthesen mit den jeweiligen Austauschreaktionen, z.B. NaX 075/75° mit 1m KOH NaX 075/75°. In den Tabellen 5-7 sind die Zellparameter und die Differenzen angeführt. In den (Abb. 24-28) sind die Daten der Δ und $\Delta 2$ -Werte graphisch dargelegt.

Tabelle 5: Zellparameter Originalsynthese

	a(Å)	V(Å) ³	Δ-Wert
NaX 075/65°	25.025	15672.26	
NaX 075/75°	25.031	15683.88	0.006
Nax 100	25.026	15673.42	-0.005
NaX 150	25.002	15630.23	-0.024
NaX 200	24.980	15604.62	-0.022
NaX 250	25.180	15964.00	0.200
NaX 300	24.964	15558.74	-0.216

Tabelle 6: Zellparameter 1m NaOH

	a(Å)	V(Å) ³	Δ-Wert	Δ2-Wert
NaX 075/65°	24.52	14744.26		-0.504
NaX 075/75°	25.03	15680.07	0.508	-0.002
Nax 100	25.03	15674.27	-0.003	0.000
NaX 150	24.52	14749.38	-0.502	-0.478
NaX 200	24.52	14742.16	-0.004	-0.460
NaX 250	24.99	15609.88	0.47	-0.190

Tabelle 7: Zellparameter 1m KOH

	a(Å)	V(Å) ³	Δ-Wert	Δ2-Wert
NaX 075/65°	25.19	15994.38		0.170
NaX 075/75°	25.20	15995.71	0.001	0.165
Nax 100	25.14	15892.99	-0.054	0.116
NaX 150	25.11	15827.10	-0.035	0.105
NaX 200	25.09	15796.89	-0.016	0.111
NaX 250	25.12	15868.57	0.029	-0.060

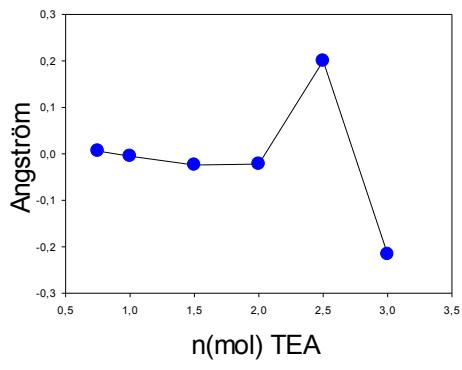


Abb. 24: Δ -Wert Originalsynthese

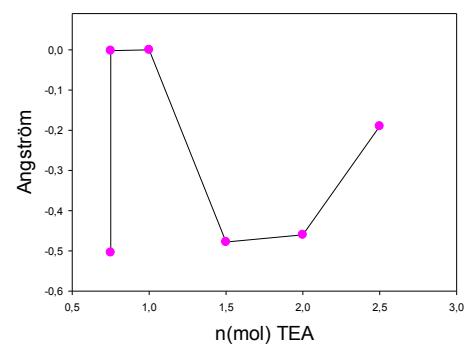


Abb. 25: $\Delta 2$ -Wert 1m NaOH

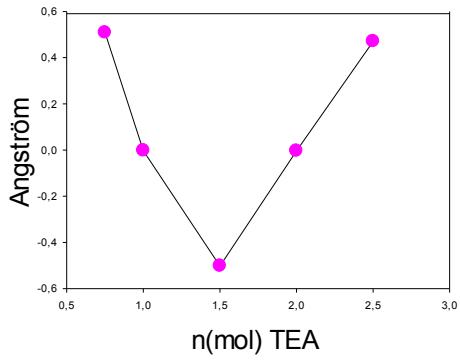


Abb. 26: Δ -Wert Austauschreaktion 1m NaOH

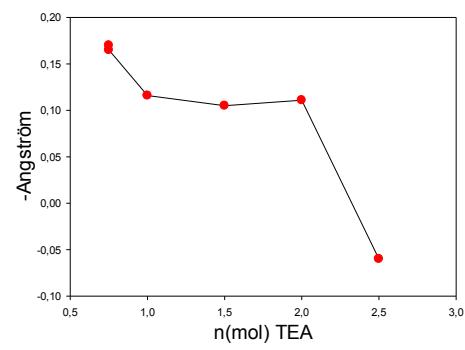


Abb. 27: $\Delta 2$ -Wert der Austauschreaktionen 1m NaOH

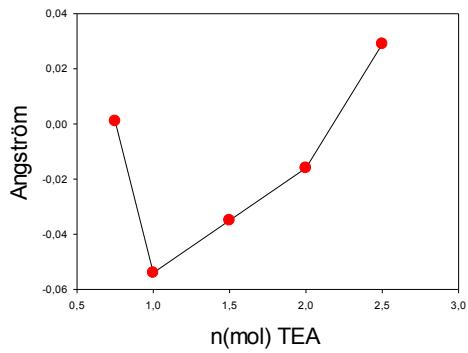


Abb. 28: Δ -Wert Austauschreaktion 1m KOH

Bei den Diffraktogrammen (Abb. 29 und 30) erkennt man bei NaX 150 im Unterschied zu NaX 100 der Originalphasen zwischen 14° - 36° 2θ eine leichte Erhöhung des Untergrundes. Dies deutet auf einen amorphen Anteil in Form des TEA hin. Bestätigt wird dies durch die Thermogravimetrie anhand einerseits des hohen Verlustes an Material im Vergleich mit anderen Synthesen und andererseits durch die schwarze Farbe des Materials nachdem Erhitzen. Diese deutet auf das Verbrennen organischen Materials hin.

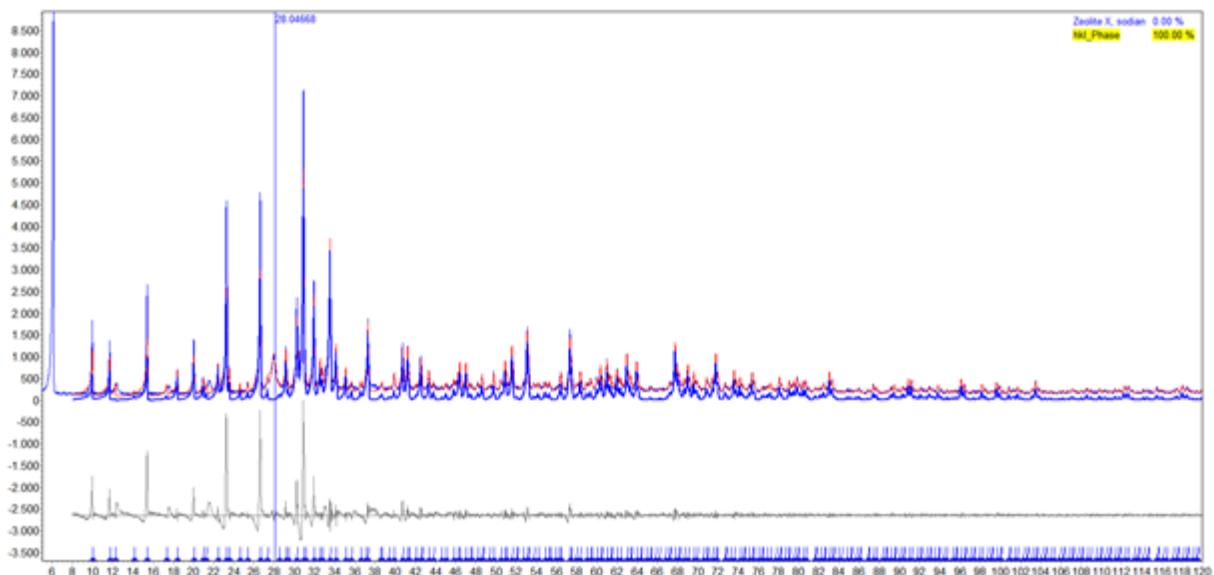


Abb. 29: Pawley-Verfeinerung von NaX 100

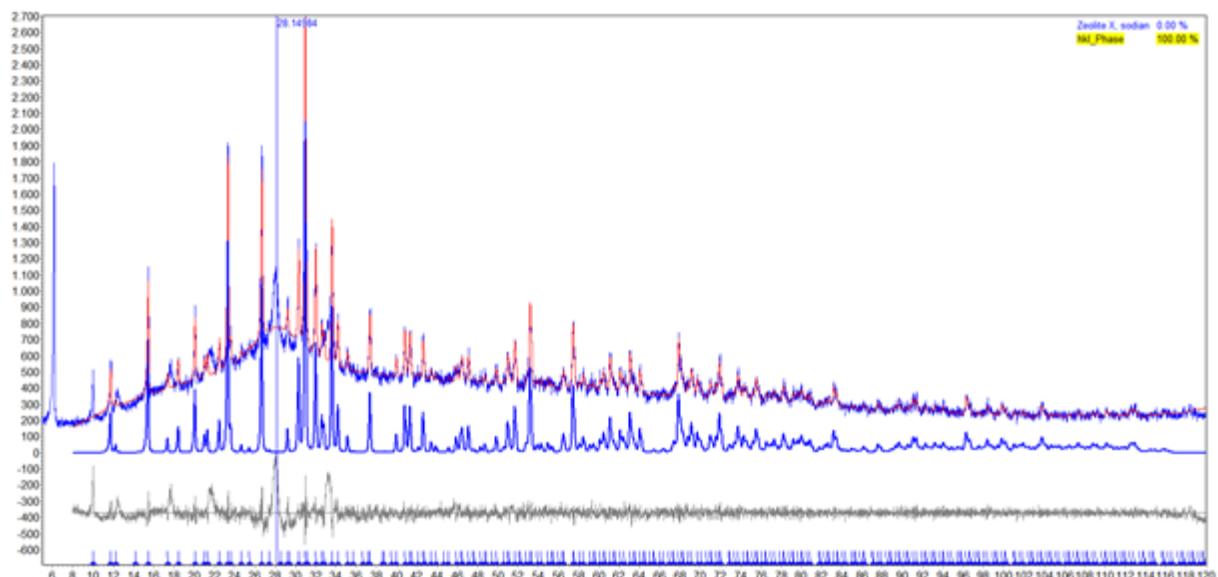


Abb. 30: Pawley-Verfeinerung des NaX 150

Kapitel 3.3: Thermogravimetrie

In der folgenden Grafik (Abb. 34) ist zu sehen, dass die Synthesen NaX 075/75° und NaX 100 sich sehr ähnlich sind. Genauso verhält es sich mit NaX 150 zu NaX 200. Anhand der Kurvenform von NaX 150 und NaX 200 ist erkennbar (vgl. Kapitel 4.3), dass deutlich mehr organisches Material vorhanden ist, als in den übrigen drei Synthesen. Dies bestätigt auch Farbe des Inhaltes der Tiegel (Abb. 32 und 33), nach dem sie aus der Probenkammer entnommen wurden. Im Vergleich dazu ein Bild des NaX 100 (Abb. 31) unmittelbar nach der Entnahme aus der Probenkammer nach Beendigung der Messung.



Abb. 31: NaX 100 keine Farbveränderung erkennbar



Abb. 32: NaX 150 Farbveränderung-deutlich geschwärzt; Hinweis auf organisches Material



**Abb. 33: NaX 200 Farbveränderung-deutlich
geschwärzt**

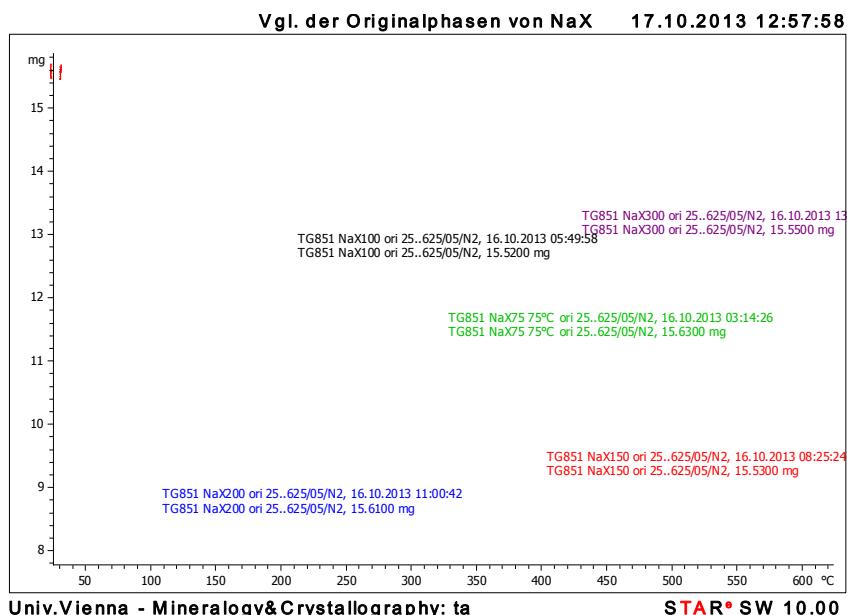


Abb. 34: Darstellung der einzelnen Synthesen anhand ihres TG-Profiles

In der nachfolgenden Graphik (Abb. 35) sind die prozentualen Verluste der Gewichte wiedergegeben. Im Anhang in den Tabellen 11-14 sind die Gewichte, sowohl in Milligramm als auch in Prozent tabellarisch, zusammengefasst. Man kann erkennen, dass bei den Originalsynthesen bei NaX 150 und NaX 200 die Verluste am deutlichsten sind. Anzunehmen ist, dass für diese Verluste TEA als amorpher Bestandteil verantwortlich ist. Bei den Austauschreaktionen ist die Tendenz, dass mit steigender TEA-Zugabe der Verlust abnimmt.

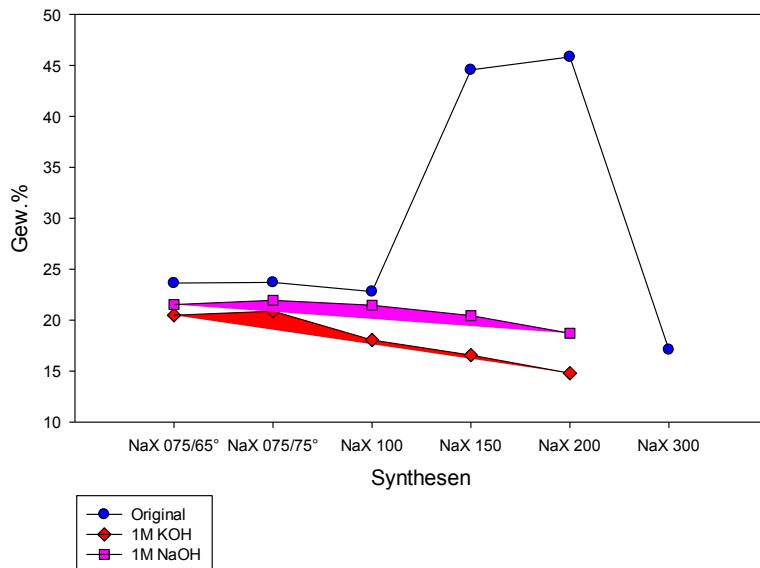


Abb. 35: Prozentualer Gewichtsverlustverlust während der Thermogravimetrie der einzelnen Synthesen

Kapitel 3.4: NMR-Spektroskopie

In den nachfolgenden Graphiken (Abb. 36 und 37) sind die NMR-Spektren von NaX 075/75° und NaX 075/95° dargestellt. Bei NaX 075/95° handelt es sich um eine Synthese von Dr. Christian Lengauer. Beim NaX erkennt man eine scharfe Bande die auf eine Phase, den Zeolith X, hindeutet. Verwendet wurde für diese Messung das ^{27}Al Spektrum.

In (Abb. 37) sieht man sowohl eine Phase des Zeolith A (LTA) und des Zeolith X. Diese zwei Banden überschneiden da sich beide Zeolithphasen in nur in geringem Umfang in den T-O Abständen und T-O-T Winkeln unterscheiden. Die Daten, in Tabelle 8 dargestellt, stammen aus der Vermessung der Struktur des Zeolith A und X mit dem Programm Mercury 3.1.

Tabelle 8: Winkel und Abstände der Zeolithe A und X

	Zeolith X	Zeolith A
T-O-T	140.53° & 145.18°	145.18° & 154.14°
T-O	1.645 Å	1.610 Å

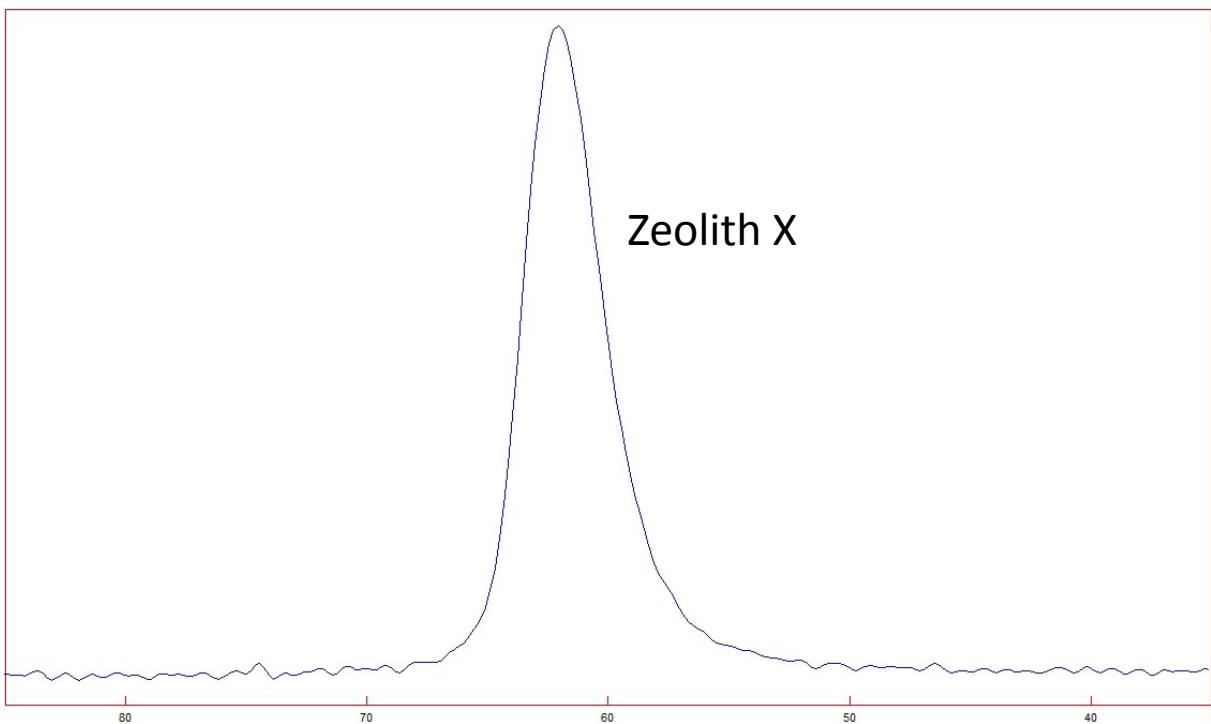


Abb. 36: ^{27}Al NMR-Spektroskopische Aufnahme des NaX 075/75° (bereitgestellt von Dr. Christian Lengauer)

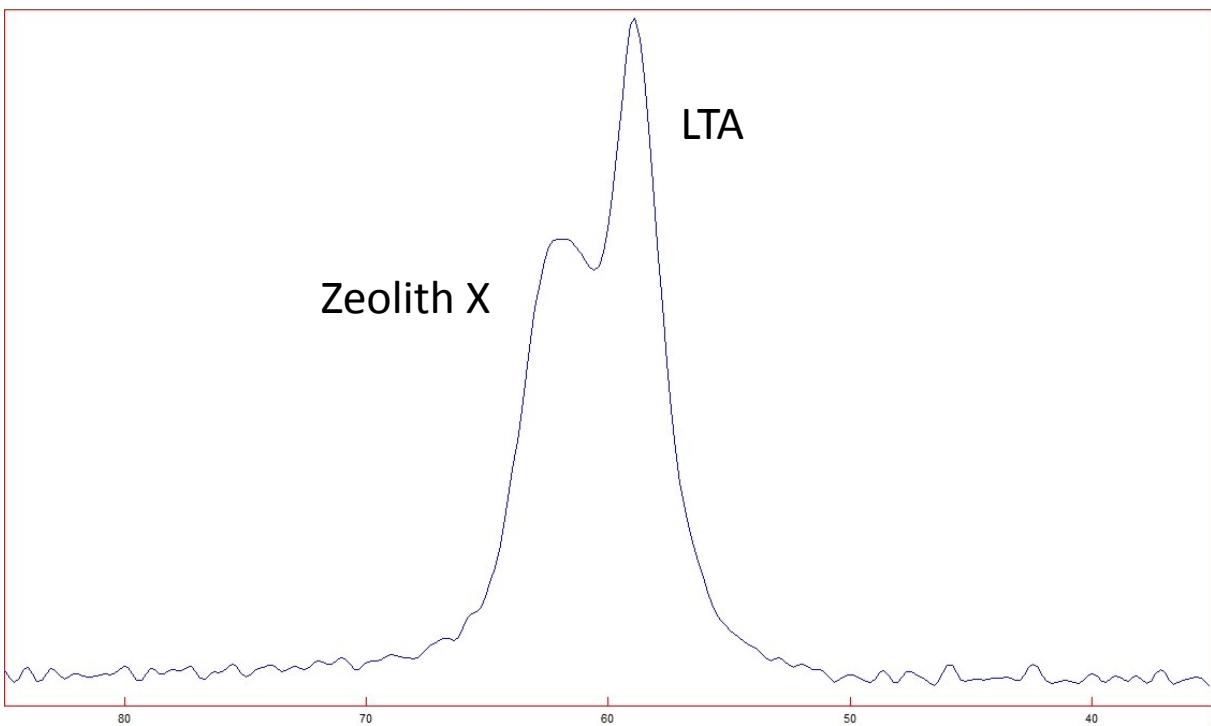


Abb. 37: ^{27}Al NMR-Spektroskopische Aufnahme des NaX 075/95° (bereitgestellt von Dr. Christian Lengauer)

Kapitel 3.5: Rasterelektronenmikroskopie

Die Aufnahmen des REM dienten dazu um vorhandene Phasen anhand ihrer Form näher bestimmen zu können. Die Bilder wurden nur von den Originalphasen aufgenommen. Beim NaX 150 und NaX 200 sieht man sehr stark an der Oberfläche verunreinigte Kristalle. Bei den würfelförmigen Kristallen handelt es sich um Zeolith A, bei den kugelförmigen um Zeolith P und die Oktaeder um Zeolith X. Alle drei vorkommenden Phasen (A,P und X) sind in (Abb. 38) dargestellt. Weiters fällt auf, dass die Faujasitkristalle in der Mitte eine bauchige Ausbuchtung besitzen. Bei den Verzwilligungen die in der Aufnahme, siehe (Abb. 39), zu sehen sind, handelt es sich um den Spinell-Typ mit Verwachsung in Richtung [111]. Die Verunreinigungen in (Abb. 40) lassen auf TEA schließen. Damit bestätigt sich wiederum die Annahme, dass es sich bei dieser Phase, die im Pulverdiffraktogramm als leichte Erhöhung erscheint (Abb. 30) zu sehen ist, um TEA handelt.

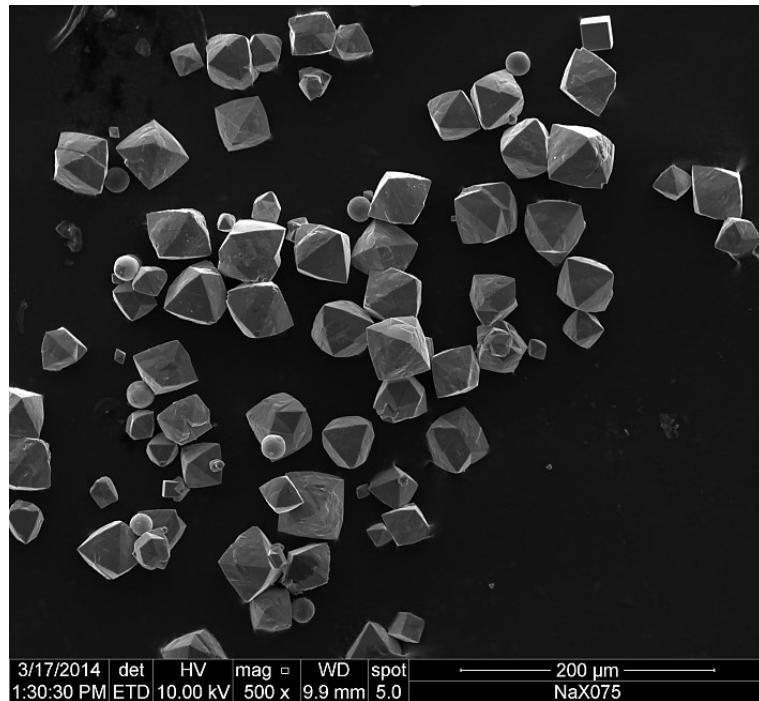


Abb. 38: Zeolith A und X mit vereinzelt auftretenden Zeolith P Kristallen bei 500x-facher Vergrößerung aus der Synthese
NaX 075/75°

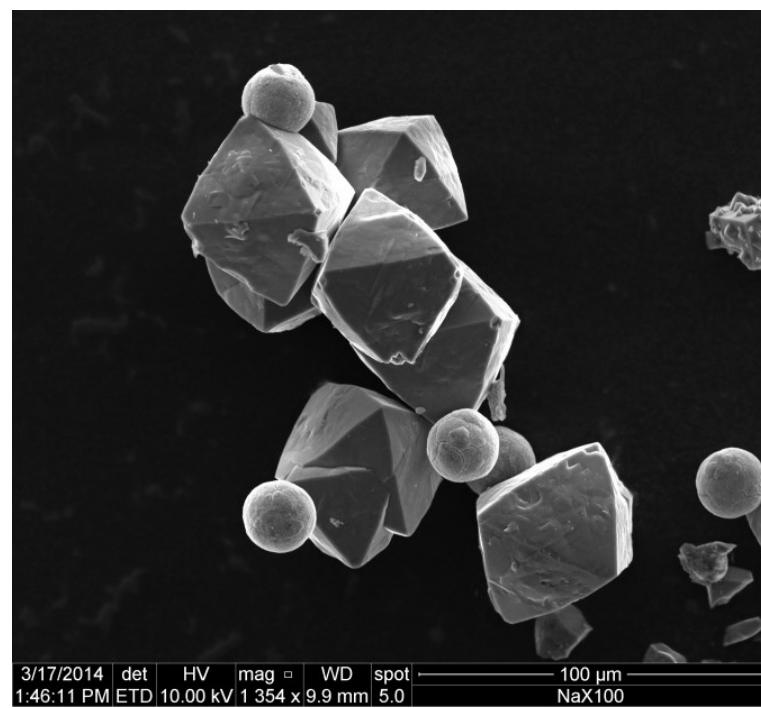


Abb. 39: Zeolith X und P Kristalle der Synthese NaX 100 bei 1000x Vergrößerung

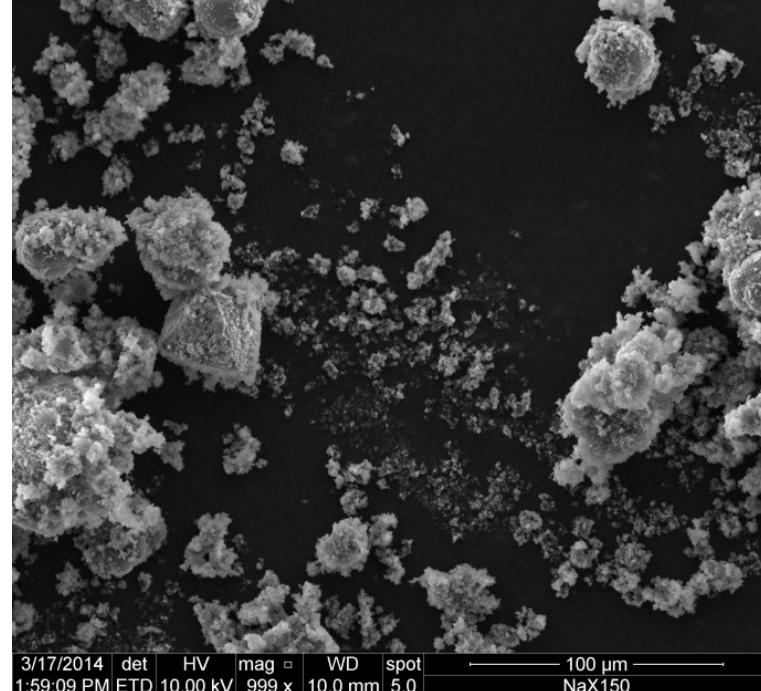


Abb. 40: Abbildung der Synthese des NaX 150; erkennbar deutlich das TEA als Verunreinigung bei 500x Vergrößerung

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass die von *Charnell* (1971) veröffentlichten Kristallgrößen der Na-Faujasit (Zeolith X) von 140 µm erreicht werden konnten. Es wurde ersichtlich, dass die Kristallgrößen mit steigendem Triethanolamin (TEA)-Verhältnis zugenommen haben und sich im Gegenzug die Größe der Elementarzellen verkleinerten. Bei geringerem TEA-Anteil konnten im Falle des NaX 050 keine Kristalle synthetisiert werden. Die Austauschreaktionen brachten die erwarteten Ergebnisse. Die Elementarzelle wurde mit KOH größer und mit NaOH kleiner. Im Vergleich der beiden Basen wurden jedoch größere Unterschiede bei NaOH hervorgerufen. Bei steigendem TEA-Verhältnis konnte beobachtet werden, dass die Zunahme der Synthesedauer um ein Vielfaches verlängert wurde.

Andere wesentliche Faktoren sind auch die Umgebung, in der Synthese stattfindet. Ein Beispiel hierfür können Bodenerschütterungen sein die die Kristallisation negativ beeinflussen können. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Kristallisation ist die Temperatur. Bei 10° Celsius weniger verlängerte sich die Dauer der Synthese um eine Woche wie man anhand des Beispiels NaX075 sowohl bei 65°C als auch bei 75°C sehen konnte. Auch andere Zeolithphasen, wie etwa der Zeolith P und der Zeolith A, erkennbar in den REM-Bildern (Abb.38 und Abb.39), wurden synthetisiert. Die Austauschreaktionen brachten die erwarteten Ergebnisse. Bei KOH nahm die Größe der Elementarzelle zu und bei NaOH verkleinerte sie sich wieder.

In Zukunft könnte man versuchen höhere TEA-Verhältnisse zu erstellen um zu schauen, ob sich der Trend der länger dauernden Synthesen fortsetzt. Daneben könnte man probieren mit Kronenether ähnliche Versuche zu starten wie *Delprato* (1990) und diese Ergebnisse mit den vorangegangenen Experimenten zu vergleichen. In dieser Arbeit wurden keine Kronenether verwendet da diese sehr teuer in der Anschaffung sind. Daneben wäre noch zu ermitteln wie sich die Synthesen bei eventuell noch niedrigeren Temperaturen <65°C verhalten.

Abstract

In this study it was demonstrated that the crystal sizes of Na faujasite (zeolite X) published by Charnell (1971) could be achieved up to 140 microns. It was seen that crystal sizes have increased with triethanolamine (TEA) content and the size of the unit cell was reduced. At lower TEA contents no Na-X crystals could be synthesized. The cation exchange experiments revealed the expected results. The unit cell increased with KOH and diminished with NaOH. Comparing the two bases, however, major differences with NaOH were obvious. With increasing TEA content a severe prolongation of synthesis time was observed.

Another important factor is the environment the synthesis takes place, e.g. ground vibrations which adversely affect the crystallization. Another important factor for the crystallization is temperature. At 10 °C less the duration of the synthesis extended by one week as it was observed by sample NaX075 at 65 °C and 75 °C. As byproducts other zeolite phases such as zeolite P and zeolite A, as seen from the SEM images (Fig.31 and 32), were synthesized. The exchange reactions brought the expected results.

For further activities one could try to create batches with higher TEA ratios to verify the trend of prolonged synthesis duration. In addition, one could evaluate similar experiments with crown ethers instead of TEA, as published by Delprato (1990), and to compare these results with the previous experiments. In addition, one could find out the syntheses characteristics at lower temperatures <65 °C.

Quellenverzeichnis

Literatur-Referenzen:

- Allmann R.: Pulverröntgendiffraktometrie; 2 Auflage; Kapitel D.1, Seite 84; (2003).
- Auerbach Scott M., Barrado Kathleen A., Prabir K. Dutta.: Handbook of zeolite science and technology; Kapitel 1; p.4; (2003).
- Baerlocher Ch., Mc Cusker L.B., Olson D.H.: Atlas of Zeolite Frameworktypes; 6.überarbeitete Auflage; (2007).
- Barrer R.M.: Hydrothermal chemistry of zeolites. London: Academic Press; (1982).
- Baur W.: On the Cation and Water Position in Faujasite; American Mineralogist 49, 697-704; (1964).
- Berger Ch., Rakoczy R.A., Gläser R. und Weitkamp J.: Synthesis and catalytic performance of large zeolite Y crystals; Elsevier- Microporous and Mesoporous Materials 83, 333-334; (2005).
- Bergerhoff G., Koyama H., Nowacki W.: Zur Kristallstruktur der Mineralien der Chabazit und der Faujasitgruppe. Experientia (Basel) Vol. 12, 418-419; (1956).
- Bergerhoff G., Baur W.H., Nowacki W.: Über die Kristallstrukturen des Fauajsits; Neues Jahrbuch Mineralogisches Monatssheft; 1958; 193-200; (1958).
- Bhatia S.: Zeolite Catalysis: Principles and Applications; Boca Raton: CRC Press; (1990).
- Bibby D.M. and Dale M.P.: Synthesis of silica-sodalite from non-aqueous systems; Letters to Nature; Nature, Vol. 317, 157-158; (1985).
- Billinge S.J.L., Robert E.: Powder Diffraction: Theory and Practice; Kapitel 5.6.2.1; Seite 154; (2008).
- Bish D.L. and Howard S.A.: Quantitative phase analysis using the Rietveld Method; J.Appl.Crys. 21, 86-91; (1988).
- Blümlich B.: Essential NMR for scientists and Engineers; Springer Verlag; (2005).
- Breck D.W.: Zeolite; Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use; Kapitel 2I; Seite 72-74; (1985).
- Breck D.W.: Zeolite molecular sieves. New York: Wiley; (1974).
- Carla I. C. Pinheiro †, Joana L. Fernandes ‡, Luis Domingues †, Alexandre J. S. Chambel †, Inês Graça †, Nuno M. C. Oliveira §, Henrique S. Cerqueira #, and Fernando Ramôa R. †: Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation and Control; Ind. Eng. Chem. Res. 51, 1-29; (2012).

Charnell J.F.: Gel Growth of Large zeolite X crystals; Journal of Crystal Growth 8, 291-294; (1971).

Chester A.W. and Derouane E.G.: Zeolite characterization and catalysis; Seite 65; (2009).

Coombs D.S., Alberti A., Armbruster Th., Artioli G., Colella C., Galli E., Grice J., Liebau F., Mandarino J.A., Minato H., Nickel E.H., Passaglia E., Peacor D.R., Quartieri S., Rinaldi R., Ross M., Sheppard R.A., Tillmanns E., Vezzalini G.: Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names; Eur.J.Mineral, 10, 1037; (1998).

Delprato F., Delmotte L., Guth J.L., Huve L.: Synthesis of new silica-rich cubic and hexagonal faujasites using crown-ether based supramolecules as templates; Zeolites Vol. 10; (1990).

Dyer A.: An introduction to zeolite molecular sieves. New York: Wiley; (1988).

Earnest Charles M.: Modern Thermogravimetry; Analytical Chemistry, Vol. 56, No. 13, 1471A; (1984).

Glauco G. and Ermanno G.: Minerals and Rocks; Natural Zeolites; Kapitel 4.6, Seite 214-216; (1978).

Kärger J., Ruthven D.M.: Diffusion in zeolites and other microporous materials; Wiley, New York; (1992).

Kortunov P., Vasenkoy S., Kärger J., Fé Elía M., Perez M., Stöcker M., Papadopoulos G. K., Theodorou D., Drescher B., McElhiney G., B. Bernauer, Krystl V., Kočířík M., Zikánová A., Jirglová H., Berger Ch., Gläser R., Weitkamp J., and Hansen E. W.: Diffusion in fluid catalytic cracking catalysts on various displacement scales and its role in catalytic performance; Chem. Mater. 17, 2466-2474; (2005).

Markl G.: Minerale und Gesteine: Mineralogie-Petrologie-Geochemie; 2.Auflage; Kapitel 1, Seite 72; (2008).

Merten Ch., Jan W.: Physikalische Grundlagen der Spektroskopie; 1. korrigierte Auflage; Seite 51-55; (2005).

Mumpton F.A. and Fishman P.H.: The application of natural zeolites in animal science and agriculture; J.Anim.Sci. 45, 1188-1203; (1977).

Mumpton F.A.: Using zeolites in agriculture; Chapter 8, Department of the Earth Sciences, State University College, Brockport, New York; (1984).

Pramata P. and Dutta P.K.: Zeolites: A Primer; (2003).

Scherzer J.: Octane Enhancing; Zeolitic FCC Catalysts; Scientific and technical aspects; Catalysis Review 31; (1989).

Smith Joseph V.: Topochemistry of zeolites and related materials, Chem.Rev. 88, 149-182; (1988).

Suortti P.: Effects of Porosity and surface roughness on the X-Ray intensity reflected from a powder specimen; J. Appl. Cryst. 5, 325; (1972).

Szostak R.: Handbook of Molecular Sieves; New York: Van Nostrand Reinhold; (1992).

Thermogravimetry (TG) of polymers; DIN EN ISO 11358, Nov.; (1997).

Tschernich R.W.: Zeolites of the World. Phoenix: Geoscience Press; (1992).

Virta R.L.: 2009 Minerals Yearbook; US Geological Survey; (2010).

Yang X., Albrecht A., Jürgen C.: Revision of Charnells procedure towards the synthesis of large and uniform crystals of zeolite A and X; Elsevier- Microporous and Mesoporous Materials 90, 53-61; (2005).

Yousheng T., Hirofumi K., Lloyd A. and Katsumi K.: Mesopore Modified Zeolites; Preparation, characterization and applications; Chem.Rev. 106, 896-910; (2006).

Internet-Referenzen:

<http://scheinpflug.privat.t-online.de/zeolithe.htm> 13.8.2014

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/fukushima-mineralschwaemme-sollen-radioaktive-teilchen-aufsaugen-a-758141.html>, 08.08.2013

<http://nrmima.nrm.se//imalist.htm> The New IMA List 1.10.2014

<http://www.iza-structure.org/databases/pdf.htm> 13.8.2014

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung einiger Frameworktypen nach der Größe (entnommen aus Zeolites: A Primer; Pramata et al., 2003)

Abb. 2: Na-Faujasit aus Kaiserstuhl (Baden-Württemberg, Deutschland; weißer Überzug ist der Faujasit)

Abb. 3: Netzwerkbausteine (SBU) aus Baerlocher et al. 2007

Abb. 4: entnommen und modifiziert aus
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faujasite_structure2.svg

Abb. 5: NaX 075/75° Herstellungstag

Abb. 6: NaX 075/75° Abnutzungstag

Abb. 7: NaX 100 nach 5 Tagen; erkennbar ist eine Absetzung des Amines

Abb. 8: NaX 100 Abnutzungstag

Abb. 9: NaX 150 Herstellungstag

Abb. 10: NaX 150 Abnutzungstag

Abb. 11: Leica M165 C Binokular aus <http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#>

Abb. 12: Pulverröntgendiffraktometer X'Pert der Firma Phillips
<http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#Equipment>

Abb. 13: Darstellung der Thermogravimetriemessgerätes Firma Mettler-Toledo aus
<http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung.htm#Equipment>

Abb. 14: Rasterelektronenmikroskop der Firma FEI entnommen aus
<http://lithosphere.univie.ac.at/petrology/infrastructure/sem-fib-system/>

Abb. 15: Kristallisationsdauer der einzelnen Synthesen

Abb. 16: Durchschnittliche Kristallgröße der einzelnen Synthesen

Abb. 17: Kristallgrößen der Synthese NaX 075/65°

Abb. 18: Kristallgrößen der Synthese NaX075/75°

Abb. 19: Kristallgrößen der Synthese NaX 100

Abb. 20: Kristallgrößen der Synthese NaX 150

Abb. 21: Kristallgrößenvergleich der Synthese NaX 200

Abb. 22: Kristallgrößenverteilung der Synthese NaX 250

Abb. 23: Kristallgrößenverteilung der Synthese NaX 300

Abb. 24: Δ-Wert Originalsynthese

Abb. 25: Δ-Wert 2 1m NaOH

Abb. 26: Δ-Wert Austauschreaktion 1m NaOH

Abb. 27: Δ-Wert der Austauschreaktionen 2 1m NaOH

Abb. 28: Δ-Wert Austauschreaktion 1m KOH

Abb. 29: Pawley-Verfeinerung von NaX 100

Abb. 30: Pawley-Verfeinerung des NaX 150

Abb. 31: NaX 100 keine Farbveränderung

Abb. 32: NaX 150 Farbveränderung-deutlich geschwärzt

Abb. 33: NaX 200 Farbveränderung-deutlich geschwärzt

Abb. 34: Darstellung der einzelnen Synthesen anhand ihres TG-Profiles

Abb. 35: Prozentualer Gewichtsverlustverlust während der Thermogravimetrie der einzelnen Synthesen

Abb. 36: ^{27}Al NMR-Spektroskopische Aufnahme des NaX 075/75° (bereitgestellt von Dr. Christian Lengauer)

Abb. 37: ^{27}Al NMR-Spektroskopische Aufnahme des NaX 075/95° (bereitgestellt von Dr. Christian Lengauer)

Abb. 38: Zeolith A und X mit vereinzelt auftretenden Zeoplith P Kristallen bei 500x-facher Vergrößerung aus der Synthese NaX 075/75°

Abb. 39: Zeolith X und P Kristalle der Synthese NaX 100 bei 1000x Vergrößerung

Abb. 40: Abbildung der Synthese des NaX 150; erkennbar deutlich das TEA als Verunreinigung bei 500x Vergrößerung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Synthesemethoden

Tabelle 2: Verwendete Reinstchemikalien

Tabelle 3: Überblick über Synthesen

Tabelle 4: Statistik Durchschnittsgröße

Tabelle 5: Zellparameter Originalsynthese

Tabelle 6: Zellparameter 1m NaOH

Tabelle 7: Zellparameter 1m KOH

Tabelle 8: Winkel und Abstände der Zeolithe A und X

Tabelle 9: Kristallgröße

Formel 10: Kristallgrößen

Tabelle 11: Prozentualer Verlust Originalsynthesen

Tabelle 12: Prozentualer Verlust 1m NaOH

Tabelle 13: Prozentualer Verlust 1m KOH

Tabelle 14: Gewichtsangaben zur Thermogravimetrie aller Synthesen und der Austauschreaktionen

Anhang

Tabelle 9: Kristallgrößenverteilung der Synthesen NaX 075/65°- NaX 150

NaX 075/65°	NaX 075/75°	Nax 100/75°	NaX 150/75°
46	51	45	67
32	62	59	62
37	59	41	56
49	56	48	69
45	55	50	56
44	52	49	64
51	53	61	61
50	41	54	63
47	52	46	64
53	59	54	63
30	55	43	70
49	65	42	63
39	47	38	67
35	47	42	65
52	57	52	68
61	61	42	57
41	60	48	63
47	59	45	61
53	57	54	61
45	51	49	55
30	54	53	67
54	49	50	73
49	50	63	64
54	52	71	62
45	52	61	65
54	60	55	59
59	57	51	55
48	54	47	72
51	53	62	62
50	49	43	55
49	48	62	62
Mittelwert	46	54	51
Max.Wert	61	65	71
Min.Wert	30	41	38
Varianzen	59	26	61
Standardabweichung	7	5	8
Anzahl	31	31	31
SS	1817.9	818.7	1879
			708

Formel 10: Kristallgrößenverteilung der Synthesen NaX 200- NaX 300

	NaX 200/75°	NaX 250/75°	NaX 300/75°
	59	92	83
	73	127	88
	68	112	77
	70	86	69
	71	87	75
	66	84	80
	67	128	87
	66	132	82
	67	78	70
	52	76	60
	72	120	88
	70	110	96
	62	112	86
	49	115	83
	35	98	100
	53	131	98
	68	115	86
	51	136	66
	69	133	91
	59	121	97
	65	141	84
	67	144	57
	65	128	96
	53	122	72
	62	117	92
	75	56	90
	60	110	65
	69	102	81
	59	101	90
	75	83	75
	55	110	53
Mittelwert	63	110	81
Max.Wert	75	144	100
Min.Wert	35	56	53
Varianzen	77	447	150
Standardabweichung	9	21	12
Anzahl	31	31	31
SS	2395	13875	4657

Tabelle 11: Prozentualer Verlust Originalsynthesen

Synthesen Original	Stufen	Prozentualer Verlust	Temperatur in °C
NaX 075/65°	1 Stufe	-4.906	0°-70°
	2 Stufe	-16.4266	70°-150°
	3 Stufe	-2.3057	150-370
		-23.6383	
NaX 075/75°	1 Stufe	-4.1593	0°-80°
	2 Stufe	-1.3983	80°-290°
	3 Stufe	-1.1472	290°-385°
		-23.7048	
NaX 100	1 Stufe	-5.1276	0°-80°
	2 Stufe	-13.7196	80°-210°
	3 Stufe	-3.953	210°-370°
		-22.8002	
NaX 150	1 Stufe	-2.6872	0°-60°
	2 Stufe	-3.1825	60°-90°
	3 Stufe	-9.0145	90°-170°
	4 Stufe	-23.3399	170°-340°
	5 Stufe	-6.3408	340°-520°
		-44.5649	
NaX 200	1 Stufe	-4.5563	0°-70°
	2 Stufe	-5.4701	70°-110°
	3 Stufe	-29.7820	110°-220°
	4 Stufe	-3.1425	220°-350°
	5 Stufe	-2.8853	350°-440°
		-44.8362	
NaX 300	1 Stufe	-1.3255	0°-60°
	2 Stufe	-1.9936	60°-90°
	3 Stufe	-7.6357	90°-140°
	4 Stufe	-3.6029	140°-240°
	5 Stufe	-2.5473	240°-500°
		-17.105	

Tabelle 12: Prozentualer Verlust 1m NaOH

Synthesen 1m NaOH	Stufen	Prozentualer Verlust	Temperatur in °C
NaX 075/65°	1 Stufe	-2.2318	0°-70°
	2 Stufe	-19.3004	70°-400°
		-21.5322	
NaX 075/75°	1 Stufe	-1.8467	0°-60°
	2 Stufe	-19.5233	60°-400°
	3 Stufe	-0.5773	400°-620°
		-21.9473	
NaX 100	1 Stufe	-2.0957	0°-65°
	2 Stufe	-18.9683	65°-435°
	3 Stufe	-0.4033	435°-620°
		-21.4673	
NaX 150	1 Stufe	-1.8712	0°-60°
	2 Stufe	-11.0458	60°-155°
	3 Stufe	-4.6473	155°-240°
	4 Stufe	-2.403	240°-475°
	5 Stufe	-0.4817	475°-600°
		-20.449	
NaX 200	1 Stufe	-1.2232	0°-60°
	2 Stufe	-10.3051	60°-140°
	3 Stufe	-4.2714	140°-220°
	4 Stufe	-2.921	220°-550°
		-18.7207	

Tabelle 13: Prozentualer Verlust 1m KOH

Synthesen 1m KOH	Stufen	Prozentualer Verlust	Temperatur (Grad Celsius)
NaX 075/65°	1 Stufe	-0.8214	0-50°
	2 Stufe	-19.3382	50°-445°
	3 Stufe	-0.3246	445°-610°
		-20.4842	
NaX 075/75°	1 Stufe	-20.5583	0°-450°
	2 Stufe	-0.3244	450°-600°
		-20.8827	
NaX 100	1 Stufe	-0.3943	0°-40°
	2 Stufe	-16.8518	40°-430°
	3 Stufe	-0.8072	430°-620°
		-18.0533	
NaX 150	1 Stufe	-11.0631	0°-190°
	2 Stufe	-4.6446	190°-415°
	3 Stufe	-0.862	415°-620°
		-16.5697	
NaX 200	1 Stufe	-9.1492	0°-160°
	2 Stufe	-5.6473	160°-550°
		-14.7965	

Tabelle 14: Gewichtsangaben zur Thermogravimetrie aller Synthesen und der Austauschreaktionen- gerundet auf zwei Nachkommastellen

Ansatz	TEA-Anteil	Anfangsgewicht in [mg]	Verlustgewicht [mg]	Endgewicht [mg]	Tiegel plus Inhalt [mg]	Tiegel [µg]	reh. Gew. [mg]	Differenz zu Anfangsgewicht [mg]
NaX 075-65°C	0.75	15.55	3.7	11.9	202.1	186.7	15.4	0.15
NaX 075-75°C	0.75	15.63	3.7051	11.9	184.42	168.83	15.59	0.04
NaX 100	1	15.52	3.5385	12.0	185.96	170.52	15.44	0.08
NaX 150	1.5	15.53	6.9209	8.6	179.99	167.36	12.63	2.9
NaX 200	2	15.61	0.01	15.6	179.6	170.91	8.69	6.92
NaX 250	2.5			0				
NaX 300	3	15.55	2.6598	12.9	187.32	172.33	14.99	0.56
1m KOH NaX 075/65°	0.75	15.71	3.1825	12.5	202.5	186.93	15.57	0.14
1m KOH NaX 075/75°	0.75	15.6	3.2214	12.8	203.45	188.2	15.25	0.35
1m KOH NaX 100	1	15.61	2.7627	12.8	199.38	184.15	15.23	0.38
1m KOH NaX 150	1.5	15.53	2.5733	12.9	204.95	189.81	15.14	0.39
1m KOH NaX 200	2	15.48	2.2905	13.2	199.48	184.28	15.2	0.28
1m NaOH NaX 075/65°	0.75	15.85	3.4128	12.4	202.54	187.05	15.49	0.36
1m NaOH NaX 075/75°	0.75	16.15	3.4605	12.7	197.79	181.97	15.82	0.33
1m NaOH NaX 100	1	15.87	3.3493	12.5	214.04	198.42	15.62	0.25
1m NaOH NaX 150	1.5	15.57	3.1162	12.4	195.62	180.89	14.73	0.84
1m NaOH NaX 200	2	15.49	2.8999	12.6	196.17	181.52	14.65	0.84

Danksagung

Ich möchte mich allen voran bei ao. Univ. Prof. Dr. Christian Lengauer für die Bereitstellung des Themas und die unermüdliche Hilfe bei jeglichen Messungen herzlichst bedanken. Weiters möchte ich ao. Prof. Dr. Herta Effenberger für die Bereitstellung der Chemikalien und des Labors danken, ohne deren diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Mein weiterer Dank gilt Dr. Christian Baal vom Institut für Paläontologie der Universität Wien für die Erklärung und Hilfe beim Umgang mit dem Rasterelektronenmikroskop FEI InspectS. In weiterer Folge möchte ich mich auch bei Dr. Helmuth Pristarcz und Dr. Dominik Talla für die Hilfe beim Messen der Pulverröntgendiffraktometrie und die Instandhaltung des Pulverdiffraktometers bedanken. Neben obig erwähnten Personen gilt mein Dank auch allen Mitarbeitern des Institutes für Mineralogie und Kristallographie der Universität Wien die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Mein weiterer Dank gilt Doris Schmid, BSc., MSc. vom Department für Umweltgeowissenschaften der Universität Wien für das Korrekturlesen der Arbeit. Der größte Dank gilt natürlich meiner Mutter welche mir die finanzielle Grundlage für meine Ausbildung ermöglichte.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Schwechat, 20.10.2015

Unterschrift (Markus Wildner)

Curriculum Vitae

Markus Wildner, BSc.

Mappesgasse 2/2/9
2320 Schwechat, Austria
Tel.Nr: 0660/2586154

mail: markus.wildner@gmx.at



Geburtstag: 12. Dezember 1988
Geburtsort: Wien
Nationalität: Österreich
Familienstand: ledig

Ausbildungen:

- 1995 - 1999: Volksschule Mannswörth
9/1999 - 6/2007: BG/BRG Schwechat, Matura
7/2007 – 3/2008: Zivildienst beim Roten Kreuz Schwechat
seit 10/2008: Studium des Bachelorstudiums Erdwissenschaften an der Universität Wien
Thema der Bachelorarbeit: Oberflächendefekte an Erzmineralen
Betreuer: Ao. Univ. Prof. Eugen Libowitzky
seit 10/2012: Masterstudium Erdwissenschaften mit Schwerpunkt in Mineralogie und Kristallographie
Thema der Masterarbeit: Einkristallsynthesen an mikroporösen Phasen des Faujasittyps
Betreuer: Ao. Univ. Prof. Christian Lengauer

Berufspraxis:

- 3/2008 bis dato: Freiwilliger Rettungssanitäter beim Roten Kreuz
7/2008 – 12/2008: Billa Feinkostverkäufer (Teilzeitbeschäftigung)
8/2011 bis 12/2013: Billa Feinkostverkäufer (Teilzeitbeschäftigung)

- 10/2013 bis 2/2014: Projektmitarbeit am Institut für Mineralogie und Kristallographie der Universität Wien
- 6/2014-9/2014: Tierarztpraxis (Die Tierdoktorin) Ord. Dr. Sandra Lohninger
- 5/2015- 7/2015: Flughafen Wien AG als Flugzeugabfertigungsmitarbeiter
- 8/2015-dato: Spar Feinkostmitarbeiter (Vollzeit)

Sonstige Qualifikationen:

- Sprachen: Deutsch (Muttersprache)
Englisch (Sehr Gut)
Spanisch (Grundkenntnisse)
Latein (Schulkentnisse)
- Führerschein: Klasse B
- Hobbies: Lesen, Radfahren; Rotes Kreuz: Praxisanleiter, SEF, Ausbildung zum Notfallsanitäter; Führungskräfteausbildung Ebene 1
- Computerkennt.: MS Office, Bentley Microstation V8