



Kurzdarstellung

In der vorgelegten Forschungsarbeit wird die adsorptive Abtrennung von chromophoren Verunreinigungen aus imidazolbasierten ionischen Flüssigkeiten umfassend betrachtet. Durch thermische Beanspruchung bilden sich chromophore Zersetzungsprodukte, die sich in einem techn. Prozess anreichern sowie dessen Betrieb stören. Beispielhaft wird die ionische Flüssigkeit 1-Ethyl-3-Methylimidazoliumacetat (EMIMAc) betrachtet, deren Einsatz große Potentiale in der Cellulosederivatisierung birgt. Aus dem Beispielfall abgeleitete Erkenntnisse der Reinigung können auf imidazolbasierte ionische Flüssigkeiten aus thermischer Belastung angewendet werden.

Die Eignung verschiedener Adsorbentien zur spezifischen Entfernung von Chromophoren aus EMIMAc wird in einem Screening dargestellt. Die porösen Materialien werden charakterisiert, um vorteilhafte, spezifische Adsorbenseigenschaften wie Oberfläche, Porenvolumen und chemische Oberflächenbeschaffenheit auf den erzielten Entfärbungserfolg zu diskutieren. Aktivkohle zeigt hierbei die besten Entfärbungseigenschaften und verringert die Extinktion um bis zu 96 %.

Die Entfärbung von EMIMAc wird durch zwei identifizierte Mechanismen bestimmt: (i) Entfärbung durch Alterung von Chromophoren und (ii) Entfärbung durch physikalische Adsorption von Chromophoren an Aktivkohle. Anhand etablierter kinetischer Modelle aus der Flüssigphasenadsorption wird die Entfärbungskinetik über Geschwindigkeitskonstanten k_i beschrieben. Die bestimmten Modellparameter sind jedoch durch Stofftransporteffekte sowie die beiden Entfärbungsmechanismen überlagert. Ein vorgestelltes, mechanistisches Entfärbungsmodell ermöglicht die differenzierte Beschreibung der jeweiligen Mechanismen. Die Aktivierungsenergie der thermischen Alterung von Chromophoren wurde zu $(50,1 \pm 2,4)$ kJ mol⁻¹ bestimmt. Weiterhin wird der äußere Stofftransport anhand der dimensionslosen Kennzahlen (Re , Sc , Sh) und der intrapartikuläre Stofftransport diskutiert. Dabei wird der Stofftransport entscheidend mit der Temperatur verbessert. Hierdurch steigt das Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten von physikalischer Adsorption zu thermischer Alterung bei 90 °C auf Faktor 20 an. Das mechanistische Entfärbungsmodell zeigt, dass die Entfärbungskinetik von EMIMAc stark stofftransportlimitiert ist und als geschwindigkeitslimitierender Schritt die Entfärbung bestimmt.

Die Erkenntnisse aus statischen Messungen werden auf die dynamische Entfärbung an einem Festbett übertragen und anhand von Durchbruchkurven evaluiert. Aufgrund von Verweilzeiten kleiner einer Minute wird die dynamische Entfärbung hauptsächlich durch physikalische Adsorption bestimmt. Hierbei sind kleine Leerrohrgeschwindigkeiten (0,8 m h⁻¹) und höhere Temperaturen wie 70 °C vorteilhaft für die Entfärbung. Auch in dynamischen Entfärbungsversuchen ist der Stofftransport geschwindigkeitslimitierend.

Der Mehrwert der Arbeit wird durch ein differenziertes Verständnis der Entfärbung von EMIMAc erlangt. Zusammenfassend lassen sich aus den gewonnenen Erkenntnissen optimale Betriebsparameter zur Entfärbung imidazolbasierter ionischer Flüssigkeiten nach thermischer Belastung diskutieren sowie allgemeine Auslegungskriterien zur statischen oder dynamischen Entfärbung ableiten.



Abstract

This contribution evaluates the purification of thermally stressed 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EMIMAc) from chromophores. EMIMAc possesses a great potential as direct dissolution media for biopolymers like cellulose. Prior to purification, EMIMAc was used in cellulose processing and underwent a strong formation of chromophores due to high temperatures. In processes with a closed recycle-loop these chromophores accumulate and negatively affect the process operability. In more general, findings from the purification of EMIMAc can be expanded to the purification of thermally stressed imidazolium based ionic liquids.

The purification of thermally stressed EMIMAc was evaluated in a screening with different adsorbent materials. Further, specific adsorbent properties like surface area, pore volume and surface polarity were evaluated for the obtained purification result. Activated carbon with a relative non-polar surface showed superior purification properties and decreases the absorbance by 96%.

It was found that the purification of EMIMAc is based on two mechanisms: (i) purification by thermal aging of chromophores and (ii) purification by physical adsorption of chromophores onto activated carbon. Different kinetic models from liquid phase adsorption were used to describe the observed purification. Therewith, rate constants k_t were determined and discussed. Unfortunately, the purification is overlapped by mass transport phenomena and the different purification mechanisms. Hence, only lumped model parameters can be obtained. To differentiate between different purification mechanisms a mechanistic purification model is used to describe the experimental data in good accordance. Hereby, the activation energy of thermal aging of chromophores can be determined to $(50.1 \pm 2.4) \text{ kJ mol}^{-1}$. Dimensionless quantities like Re -, Sc - and Sh -number were used to evaluate the outer mass transport during static batch experiments. It was found that, temperature increases the rate of physical adsorption onto activated carbon 20-fold compared to thermal aging of chromophores at $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Further, the mechanistic purification model showed that the intraparticle mass transport is the rate determining step during purification.

Results from static measurements were evaluated in a dynamic purification set-up with a packed bed adsorber. Therefore, breakthrough-curves of EMIMAc were measured at different temperatures and superficial liquid velocities. The dynamic purification with a packed bed is mainly determined by physical adsorption of chromophores on activated carbon due to residence times smaller than one minute. It was found, that the purification greatly benefits from low superficial liquid velocity (0.8 m h^{-1}) and high temperature ($70 \text{ }^\circ\text{C}$). Similar as in static measurements, the intraparticle mass transport was found as the rate determining step during the dynamic purification process.

This contribution creates value through the differentiated characterization of the purification of thermally stressed EMIMAc. In summary it can be said, that optimal process conditions for the static and dynamic purification of imidazolium based ionic liquids after thermal stress were discussed and general process design parameters were determined.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

(E_0-E)	Extinktionsänderung / a.u.
(E_0-E_∞)	Extinktionsänderung im Gleichgewichtszustand / a.u.
\bar{C}^*	Mittlerer Stoffmengenanteil auf dem Adsorbens im Gleichgewicht / mol _i mol _{ges} ⁻¹
\bar{d}_p	Mittlerer Porendurchmesser / nm
\bar{C}	Mittlerer Stoffmengenanteil auf dem Adsorbens zur Zeit t / mol _i mol _{ges} ⁻¹
\dot{V}	Volumenstrom / ml min ⁻¹
$[A]$	Stoffmengenanteil A / mol _A mol _{ges} ⁻¹
$[A]_0$	Stoffmengenanteil von Stoff A zu Beginn / mol _A mol _{ges} ⁻¹
$[A]_\infty$	Stoffmengenanteil von Stoff A im Gleichgewicht / mol _A mol _{ges} ⁻¹
A	Absorption / a.u.
A	Frequenzfaktor / h ⁻¹
A, B, C, D	Anpassungsparameter einer hyperbolischen bzw. Potentialfunktion / a.u.
a_{spez}	Spezifische Porenoberfläche / m ² g ⁻¹
B	Bettausbeute / %
c	Lichtgeschwindigkeit / m s ⁻¹
C	Achsenabschnitt / mol _i mol _{ges} ⁻¹
$c(t)$	Stoffmengenanteil zur Zeit t / mol _i mol _{ges} ⁻¹
c_0	Anfangsgehalt an Chromophoren / mol _{EMIMAc} mol _{ges} ⁻¹
d	Schichtdicke / m
D	Durchmesser / m
D	Diffusionskoeffizient / m ² s ⁻¹
D_1	Gleichgewichtsparameter 1 des Double Exponential Model / a.u.
D_2	Gleichgewichtsparameter 2 des Double Exponential Model / a.u.
d_i	Innendurchmesser / mm
d_{Partikel}	Partikeldurchmesser / m
E	Energie eines Lichtquants / eV
E	Extinktion / a.u.



E_0	Extinktion zum Zeitpunkt $t=0$ s / a.u.
E_∞	Extinktion im Gleichgewicht / a.u.
E_a	Aktivierungsenergie / kJ mol^{-1}
E_{Bind}	Bindungsenergie / kJ mol^{-1}
F_i	Siebklassen / -
h	Planck'sches Wirkungsquantum $6,626\ 070\ 040 \cdot 10^{-34}$ J s
H	Höhe / m
H_{MTZ}	Höhe der Massentransferzone / mm
I	Lichtstärke / cd
k	Absorptionskoeffizient / a.u.
k^*	Zusammengefasste Reaktionsgeschwindigkeit / h^{-1}
k_1	Geschwindigkeitskonstante des Modells pseudo-1. Ordnung / min^{-1}
K_1	Geschwindigkeitskonstante 1 des Double Exponential Model / h^{-1}
k_2	Geschwindigkeitskonstante des Modells pseudo-2. Ordnung / min^{-1}
K_2	Geschwindigkeitskonstante 2 des Double Exponential Model / h^{-1}
k_B	Boltzmann-Konstante = $1,38065 \cdot 10^{-23}$ J K^{-1}
k_f	Geschwindigkeitskonstante einer hyperbolischen Anpassung/ min^{-1}
k_i	Geschwindigkeitskonstante / h^{-1}
k_{id}	intrapartikuläre Geschwindigkeitskonstante / $\text{mol}_i \text{ mol}_{\text{ges}}^{-1} \text{ min}^{-0,5}$
k_L	Stoffübergangskoeffizient des LDF-Modells / s^{-1}
K_{ow}	Verteilungskoeffizient eines Octanol-Wasser Gemisches / -
k_s	Geschwindigkeitskonstante des Lagergren Modells/ min^{-1}
L	Länge / mm
m_a	Adsorbensmasse / g
m_{DBK}	Geradensteigung einer linearen Durchbruchkurve / ml^{-1}
n	Achsenabschnitt einer Geradengleichung / a.u.
n	Reaktionsordnung / -
n	Adsorptionsparameter / -
n_i	Molanteil / $\text{mol}_i \text{ mol}_{\text{ges}}^{-1}$
p	Druck / Pa
p_c	korrigierter Druck / Pa
q_e	Gleichgewichtsbeladung / $\text{mol}_i \text{ mol}_n^{-1}$



q_t	Beladung zum Zeitpunkt t / mol _i mol _n ⁻¹
r	Radius / m
R_0	Universelle Gaskonstante = 8,314 J K ⁻¹ mol ⁻¹
RCF	Relative Centrifugal Force / m s ⁻²
r_p	Partikelradius / m
T	Temperatur / K
t	Zeit / min
T_m	Schmelztemperatur / K
T_s	Siedetemperatur / K
u	Molekulargewicht / g mol ⁻¹
V	Volumen / cm ³
V_i	Elutionsvolumina der normierten Extinktion i / ml
V_{spez}	Spezifisches Porenvolumen / cm ³ g ⁻¹
w	Strömungsgeschwindigkeit / m s ⁻¹
w	Entfärbungsleistung / %
w_{leer}	Leerrohrgeschwindigkeit / m h ⁻¹
x_w	Wassergehalt / g _{Wasser} g _{ges} ⁻¹
z_k	Korrekturfaktor / -
ΔE_{GGW}	Extinktionsänderung durch physikalische Adsorption im Gleichgewicht / a.u.
Δh_v	Verdampfungsenthalpie / kJ mol ⁻¹

Griechische Symbole

$\dot{\gamma}$	Scherrate / s ⁻¹
β	Stoffübergangskoeffizient / m ³ s ⁻¹ m ⁻²
γ	Oberflächenspannung / kg s ⁻²
ε	molarer Extinktionskoeffizient / L cm mol ⁻¹
ε	Porosität / -
η	Dynamische Viskosität / kg m ⁻¹ s ⁻¹
θ	Kontaktwinkel / °
λ	Wellenlänge / nm
ν	Kinematische Viskosität / m ² s ⁻¹



ρ	Dichte / kg m^{-3}
τ	Verweilzeit / s

Indices

1%/10	1 %-iger Massenverlust nach 10 h
Adsorption	Bezug auf die physikalische Adsorption von Chromophoren an Aktivkohle
Adsorbens	Adsorbens
AK	Aktivkohle
Alterung	Bezug auf die thermische Alterung von Chromophoren
aus	Ausgang
cell	Cellulose
DGF	Aktivkohle Typenbezeichnung
ein	Eingang
EMIMAc	1-Ethyl-3-Methylimidazoliumacetat
ges	Gesamt
krit	Kritisch
leer	Leerrohr
onset	Beginn der Zersetzung
spez	Spezifische Größe
Start	Zu Beginn des Versuchs
t	Zum Zeitpunkt t
total	Bezug auf alle auftretenden Entfärbungsmechanismen
Wasser	Wasser

Abkürzungen und Akronyme

Ac	Acetat
AK	Aktivkohle
BET	Brunauer–Emmett–Teller
BMIM	1-Butyl-3-Methylimidazolium
Cl	Chlor
DBK	Durchbruchskurve
DTG	Differenz-Thermoanalyse



EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EMIM	1-Ethyl-3-Methylimidazolium
EMIMAc	1-Ethyl-3-Methylimidazoliumacetat
EZ	Equilibrium Zone
IC	Ionenchromatographie
IL	Ionische Flüssigkeiten (engl. Ionic Liquids)
LDF	Linear Driving Force
MIM	1-Methylimidazolium
MTZ	Massentransportzone
NHC	<i>N</i> -Heterocyclische Carbene
NMMO	<i>N</i> -Methylmorpholin- <i>N</i> -oxid
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
ppb	Parts per Billion
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTIL	Room Temperature Ionic Liquids
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UV/vis	Ultra Violet / Visible Light
VE	Vollentsalz
WRV	Wasserrückhaltewert (engl. water retention value)

Dimensionslose Kennzahlen

Reynolds-Zahl	$Re = \frac{\rho w d_{\text{partikel}}}{\eta}$
---------------	--

Schmidt-Zahl	$Sc = \frac{v}{D}$
--------------	--------------------

Sherwood-Zahl	$Sh = 2 + z_k \frac{(Re Sc)^{1,7}}{1+(Re Sc)^{1,2}}$
---------------	--



1 Einleitung

Ionische Flüssigkeiten (engl. *Ionic Liquids*, IL) bieten aus der Klasse von Lösungsmitteln durch ihre speziellen Eigenschaften vielschichtige Vorteile gegenüber konventionellen Lösungsmitteln. Ihr grundlegender Aufbau besteht, wie bei Salzen, aus Kat- und Anionen. Ihr salzähnlicher Strukturaufbau verschafft ihnen auch den Namen der flüssigen Salze oder *molten salts*. Anders als z. B. bei Natriumchlorid ($T_m = 801\text{ °C}$) besitzen IL eine niedrige Fest-Flüssig Übergangstemperatur. In die Untergruppe der *Room-Temperature Ionic Liquids* (RTIL) liegt diese sogar $<100\text{ °C}$ [1]. Hierbei wird die Bildung eines festen Kristallgitters durch die Größe der Alkyl-Seitenketten beeinflusst, wodurch der flüssige Aggregatzustand über weite Temperaturbereiche vorherrscht. Dabei ist der Dampfdruck vernachlässigbar gering [2]. Zusätzlich bietet die extreme Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten von Kat- und Anionen die Grundlage physikochemische Eigenschaften wie Schmelzpunkt, chemisches Potential und Viskosität zielgerichtet auf eine Anwendung einzustellen [3,4]. Diese Besonderheiten von IL eröffnen ein breites Interessensfeld in Forschung und Entwicklung, wie z. B. in der homogenen Katalyse [5–7], als nicht verdampfende Elektrolyte [8] oder auch als Lösungsmittel in der Cellulosederivatisierung [9–11].

Diese Besonderheiten stellen IL in den Fokus derzeitiger wissenschaftlicher Arbeiten für den Einsatz als Lösungsmedium in der Cellulosefaserherstellung. Unter anderem ermöglicht der Einsatz von 1-Ethyl-3-Methylimidazoliumacetat (EMIMAc) einen breiten Viskositätsbereich zur direkten Auflösung und vielfältigen Verarbeitung von Cellulose in besonders hohen Gehalten [12]. Somit lassen sich über verschiedene Spinnetechniken, Cellulosefasern, Garne, oder auch Fließstoffe darstellen [9]. Die erhaltenen Fasereigenschaften wie Dehnung und Festigkeit sind vergleichbar zu konventionellen Herstellungsprozessen, die Schlaufenfestigkeit ist aber deutlich erhöht. Als direktes Lösungsmittel wird durch den Einsatz von EMIMAc die Prozessführung deutlich vereinfacht [13]. Dies führt dazu, dass der Herstellungsprozess von Cellulosefasern unter Verwendung von IL ökonomisch vorteilhafter und zukunftssicherer ist im Gegensatz zu industriell etablierten Lösungsmedien wie *N*-Methylmorpholin-*N*-oxid oder Natronlauge/Kohlenstoffdisulfid.

Die Literatur zeigt, dass der Einsatz von IL in der Celluloseherstellung durch ihre thermische, chemische und mechanische Stabilität beeinträchtigt werden kann. Die thermische Stabilität von IL wird systematisch überschätzt, wodurch es beim Überschreiten der thermischen Stabilität zum Abbau und der Anreicherung von Zerfallsprodukten kommt [14–16]. Dies führt bei Prozesstemperaturen von ca. 120 °C während der kontinuierlichen Cellulosefaserherstellung über mehrere Zyklen zu Veränderungen von EMIMAc. Durch die andauernde thermische Belastung während der Kreislaufführung reichern sich hochsiedende Verunreinigungen und Chromophore



an [17]. Dieses lässt sich über eine gelb-bräunliche Verfärbung direkt beobachten. Neben den physikochemischen Veränderungen der IL werden die mechanischen Fasereigenschaften negativ verändert und diese durch Chromophore verfärbt, wodurch nachgeschaltete Bleichschritte nötig werden.

Mit Blick auf aktuelle Forschungsarbeiten zeigt sich, dass EMIMAc unter thermischer Belastung bereits bei Temperaturen >100 °C durch Bildung von flüchtigen Zersetzungsprodukten degradiert [14]. Imidazolbasierte IL im Allgemeinen und EMIMAc speziell sind besonders temperaturempfindlich. Dabei können Nebenreaktionen an der C2-Position innerhalb des Imidazolrings auftreten und hochreaktive Carbene entstehen, welche unkontrolliert weiter reagieren [18,19]. Wie bei der Cellulosefaserherstellung bereits beschrieben, beobachtete auch Clough *et al.* während der Zersetzung von EMIMAc durch thermische Belastung eine starke Chromophorenbildung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts [14]. Daher ist die UV/vis-Spektroskopie durch ihre besonders hohe Sensitivität bis in den ppb-Bereich (parts per billion) zur Analyse geeignet. Weiterhin kann es bereits während der Synthese imidazolbasierter IL durch hohe Reaktionstemperaturen zur Bildung von Chromophoren kommen [1,20]. Die chemische Natur der Chromophore bleibt bis heute jedoch teilweise ungeklärt. Es wird allerdings angenommen, dass es sich hierbei um Nebenreaktionen des Imidazolrings und mögliche C2-Addukte dessen handelt [21,22].

Um nun den Einsatzbereich imidazolbasierter IL aufgrund ihrer begrenzten thermischen Stabilität zu erweitern ist die spezifische Abtrennung chromophorer Verunreinigungen essentieller und aktueller Forschungsgegenstand. Auch aufgrund des hohen Preises (1.500 € pro 100 g EMIMAc) als Spezialchemikalie einiger IL, kann durch eine Reinigung deren Wiedereinsatz nach thermischer Belastung ökonomisch sowie ökologisch vorteilhaft sein. Die Abtrennung von hochsiedenden, chromophoren Verunreinigungen durch physikalische Adsorption ist hierbei besonders vielversprechend. Poröse Materialien wie Zeolithe, Silica Gele, Aluminiumoxide, Molekularsiebe, C₁₈ funktionalisierte Silane oder auch Aktivkohlen wurden in der Literatur bereits diskutiert [17,23–26]. Der Reinigungsprozess durch physikalische Adsorption von Chromophoren ist allerdings nicht tiefgehend untersucht und verstanden. So wird das Verfahren der Adsorption oft als ‚Mittel zum Zweck‘ eingesetzt, um z. B. spektroskopisch reine IL zu erzeugen und diese weiter zu verarbeiten.

Daher werden in dieser Arbeit verschiedene Adsorbentien auf ihre Eignung zur Entfärbung von EMIMAc nach thermischer Belastung aus dem Celluloseprozess untersucht. Ein zentraler Punkt ist dabei die Beschreibung des Einflusses verschiedener Betriebsparameter wie Temperatur, Partikelgröße des Adsorbens oder auch der Anfangsgehalt an chromophoren Verunreinigung. Methodisch werden statische Messungen für die kinetische Betrachtung der Entfärbung sowie auch dynamische Messungen in einem Festbett durchgeführt und diskutiert. Die erhaltenen Daten werden mit verschiedenen kinetischen Modellen aus der Flüssigphasenadsorption verglichen. Daraus abgeleitet werden Geschwindigkeitsparameter bereitgestellt und der Einfluss des Stofftransports auf die Entfärbung untersucht. Ferner wird auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse ein mechanistisches Entfärbungsmodell vorgestellt. Somit können übertragungsfähige, optimale Prozessbedingungen zur spezifischen Entfärbung von EMIMAc aus thermischer Belastung bereitgestellt werden. Vor dem Hintergrund, dass ähnliche Zersetzungsprodukte für imidazolbasierte IL aus thermischer Belastung entstehen, ist das Entfärbungsverfahren universell anwendbar.



2 Stand des Wissens

Der aktuelle Stand des Wissens beinhaltet die drei Kernpunkte dieser Arbeit. Zu Beginn werden ionische Flüssigkeiten und deren physikochemischen Eigenschaften sowie verbreitete Verunreinigungen und Möglichkeiten diese abzutrennen umfassend vorgestellt, Kapitel 2.1. Weiterhin wird in Kapitel 2.2 die Adsorption als thermodynamisches Trennverfahren beschrieben und Stofftransportphänomene vor dem Hintergrund kinetischer Modelle sowie der Dynamik in einem Festbett vorgestellt. Als letzter Punkt wird in Kapitel 2.2 die Cellulosefaserherstellung unter Einsatz von ionischen Flüssigkeiten dargestellt. Dieser Prozess dient beispielhaft für die thermische Belastung imidazolbasierter ionischer Flüssigkeiten während der Prozessierung und daraus abgeleitet werden Herausforderungen dargestellt. Jedes Teilgebiet ist durch eine umfassende Literaturrecherche in die relevante Forschungsarbeit auf dem jeweiligen Gebiet eingebettet und dargestellt. Zusammenfassend wird der Forschungsbedarf im Kontext dieser Arbeit erläutert.

2.1 Ionische Flüssigkeiten – eine besondere Klasse von Lösungsmitteln

Ionische Flüssigkeiten besitzen ein breites Spektrum an Eigenschaften und daher weite Anwendungsbereiche in Forschung und Industrie. Sie gehören zur Klasse der Lösemittel und sind genau wie Salze aus Kationen und Anionen aufgebaut. Im Falle imidazolbasierter IL bildet ein heterocyclischer aromatischer Fünfring mit zwei Stickstoffatomen das Kation-Grundgerüst. Dieser kann durch beliebige Seitengruppen funktionalisiert und in seinen chemischen Eigenschaften verändert werden. Auch das Anion kann in seiner Beschaffenheit variieren von einfachen anorganischen Halogeniden bis zu langkettig verzweigten Acetalen. Dadurch können diese *Designer Solvents* in ihren chemischen Eigenschaften der IL für den Einsatzzweck angepasst werden [1]. Diese Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten breitet das Anwendungsfeld ionischer Flüssigkeiten stetig weiter aus [27]. So finden IL reges Forschungsinteresse in der Elektrochemie als neuartige Elektrolyte durch ihr breites elektrochemisches Fenster [8], homogene Katalysatoren, welche gleichzeitig als Lösemittel fungieren [7] bzw. auch an der IL immobilisiert werden können, oder in polymerisierter Form z. B. als poröses Material [28]. Ein besonders großer Bereich eröffnet sich für maßgeschneiderte Lösungsmittel, wie z. B. in der Celluloseveredlung [9]. Hier bieten IL