

**1 Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller</i></b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Das Lösungsmittel MEG</b> .....	<b>6</b>
1.1.1	<i>Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG</i> .....	9
1.1.2	<i>Dichte von MEG</i> .....	9
1.1.3	<i>Oberflächenspannung von MEG</i> .....	10
1.1.4	<i>Spezifische Wärmekapazität von MEG</i> .....	10
1.1.5	<i>Wärmeleitfähigkeit von MEG</i> .....	10
1.1.6	<i>Dynamische Viskosität von MEG</i> .....	11
1.1.7	<i>Resonanzspektrometrische Untersuchung von MEG</i> .....	11
<b>1.2</b>	<b>Das Lösungsmittel Wasser</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Das Lösungs- und Reaktionsmittel Wasser</b> .....	<b>13</b>
1.3.1	<i>Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser</i> .....	13
1.3.2	<i>Löslichkeit von Wasser in Luft</i> .....	17
1.3.3	<i>Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Wasser</i> .....	18
1.3.4	<i>Verdampfungsenthalpie von Wasser</i> .....	19
<b>1.4</b>	<b>Das Lösungsmittelgemisch MEG/Wasser</b> .....	<b>22</b>
1.4.1	<i>Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG/Wasser</i> .....	29
1.4.2	<i>Mischungsenthalpie MEG/Wasser</i> .....	31
1.4.3	<i>Dampf/Flüssigkeits-Gleichgewicht MEG/Wasser</i> .....	34
1.4.4	<i>Wärmeleitfähigkeit und Spezifische Wärmekapazität MEG/Wasser</i> .....	35
1.4.5	<i>Dichte MEG/Wasser</i> .....	35
1.4.6	<i>Viskosimetrische Untersuchung MEG/Wasser</i> .....	36
1.4.7	<i>Refraktometrische Untersuchung MEG/Wasser</i> .....	36
<b>1.5</b>	<b>Das Reaktionssystem Monoethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>39</b>
1.5.1	<i>Daten, Spezifikation, Daten</i> .....	39
1.5.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit MEA</i> .....	40
1.5.3	<i>Thermoanalytische Untersuchung von MEA und MEA -Carbamat</i> .....	41
1.5.4	<i>Infrarotspektrometrische Untersuchung</i> .....	43
1.5.5	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MEA</i> .....	44
1.5.6	<i>Mischungsenthalpie</i> .....	45
1.5.7	<i>Viskosität von MEA</i> .....	46
1.5.8	<i>Dichte wässriger MEA-Lösungen</i> .....	52
1.5.9	<i>Brechungsindex wässriger MEA-Lösungen</i> .....	55
1.5.10	<i>Wärmekapazität von MEA</i> .....	56
1.5.11	<i>Verdampfungsenthalpie von MEA</i> .....	56
1.5.12	<i>Dampf/Flüssig-Gleichgewicht des Systems MEA/Wasser</i> .....	56
1.5.13	<i>Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	57

1.5.14	<i>Thermoanalytische Untersuchung</i> .....	65
<b>1.6</b>	<b>Das Reaktionssystem Diethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>69</b>
1.6.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	69
1.6.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit DEA</i> .....	69
1.6.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von DEA</i> .....	69
1.6.4	<i>Infrarotspektrometrische Untersuchung</i> .....	70
1.6.5	<i>Behandlung einer DEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	71
<b>1.7</b>	<b>Das Reaktionssystem Triethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>79</b>
1.7.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	79
1.7.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit TEA</i> .....	79
1.7.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration TEA</i> .....	79
1.7.4	<i>Behandlung einer TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	80
1.7.5	<i>Kommentar</i> .....	88
<b>1.8</b>	<b>Das Reaktionssystem Natriumhydroxid/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>89</b>
1.8.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	89
1.8.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit Natriumhydroxid</i> .....	89
1.8.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von NaOH</i> .....	89
1.8.4	<i>Behandlung einer 1,432 m%igen NaOH-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	90
<b>1.9</b>	<b>Das Reaktionssystem Natriumcarbonat/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>99</b>
1.9.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	99
1.9.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit Natriumcarbonat</i> .....	99
1.9.3	<i>Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	99
<b>1.10</b>	<b>Das Reaktionssystem tert. Pentylamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>108</b>
1.10.1	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TPA</i> .....	108
1.10.2	<i>Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	108
<b>1.11</b>	<b>Das Reaktionssystem Monomethylethyldiamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>116</b>
1.11.1	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MMEDA</i> .....	116
1.11.2	<i>Behandlung einer 2,724 m%igen MMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	116
<b>1.12</b>	<b>Das Reaktionssystem N,N,N',N'-Tetramethylethyldiamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>125</b>
1.12.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	125
1.12.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit TMEDA</i> .....	125
1.12.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TMEDA</i> .....	126
1.12.4	<i>Behandlung einer TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	126
	<i>Eine 3,11m%ige TMEDA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit</i> .....	126
<b>1.13</b>	<b>Das Reaktionssystem Monoethyldiamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>135</b>
1.13.1	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit MEDA</i> .....	135
1.13.2	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MEDA</i> .....	135
1.13.3	<i>Behandlung einer 7,67 m%igen MEDA-Lösung in Wasser mit CO</i> .....	136

1.13.4	<i>Kommentar</i> .....	145
<b>1.14</b>	<b>Das Reaktionssystem Diethylentriamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>147</b>
1.14.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Daten</i> .....	147
1.14.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit DETA</i> .....	147
1.14.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von DETA</i> .....	147
1.14.4	<i>Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	148
<b>1.15</b>	<b>Das Reaktionssystem Triethylentetramin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>157</b>
1.15.1	<i>Allgemeines, Daten, Spezifikation</i> .....	157
1.15.2	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit TETA</i> .....	157
1.15.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TETA-</i> .....	157
1.15.4	<i>Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	158
<b>1.16</b>	<b>Das Reaktionssystem Pentaethylenhexamin/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>167</b>
1.16.1	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEHA</i> .....	167
1.16.2	<i>Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	167
<b>1.17</b>	<b>Das Reaktionssystem Polyethylenimin PEI25000/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>177</b>
1.17.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Eigenschaften Daten von PEI25000</i> .....	177
1.17.2	<i>Infrarotspektrometrische Untersuchung</i> .....	177
1.17.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI25000</i> .....	178
1.17.4	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEI25000</i> .....	178
1.17.5	<i>Behandlung einer 3,14 m,%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	179
<b>1.18</b>	<b>Das Reaktionssystem Polyethylenimin PEI60000/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>186</b>
1.18.1	<i>Allgemeines, Spezifikation, Eigenschaften Daten von PEI60000</i> .....	186
1.18.2	<i>Infrarotspektrometrische Untersuchung</i> .....	186
1.18.3	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI60000</i> .....	187
1.18.4	<i>Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEI60000</i> .....	188
1.18.5	<i>Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	189
<b>1.19</b>	<b>Das Reaktionssystem Polyethylenimin branched(MW800)/Wasser/CO<sub>2</sub></b> .....	<b>198</b>
1.19.1	<i>Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI800</i> .....	200
1.19.2	<i>Viskosimetrische Untersuchung von PEI800</i> .....	201
1.19.3	<i>Wärmekapazität von PE800</i> .....	203
1.19.4	<i>Thermoanalytische Untersuchung von PEI800</i> .....	203
1.19.5	<i>Desorptionenthalpie <math>\Delta H_d</math></i> .....	204
1.19.6	<i>Behandlung einer 2,10 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	205
1.19.7	<i>Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	212
1.19.8	<i>Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	222
1.19.9	<i>Behandlung einer 11,85%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub></i> .....	231
1.19.10	<i>Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C</i> .....	240
1.19.11	<i>Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C</i> .....	243
1.19.12	<i>Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C</i> .....	246

Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

1.19.13	<i>Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C .....</i>	249
1.19.14	<i>Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>.....</i>	258
1.19.15	<i>Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG mit CO<sub>2</sub>.....</i>	266
1.20	<b>PEI800 versus MEA.....</b>	<b>272</b>
1.20.1	<i>Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>....</i>	274
1.21	<b>Energetische Bilanzierung.....</b>	<b>282</b>
2	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>295</b>

## 1.1 Das Lösungsmittel MEG

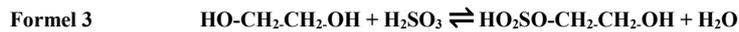
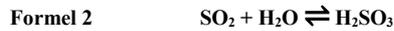
Das Ergebnis des Lösungsmittelscreenings sind hochsiedende, stark protische Glykole und Glykolether. Polymere Ethylenglykole und nichtprotische Glykolether sind gerade hinsichtlich ihres teilweise inhomogenen Mischungsverhaltens mit Polyethyleniminen und Wasser sowie thermischer Transporteffekte durch Azeotrope und Wasserdampfflüchtigkeit nicht geeignet. Im Leistungsvergleich zum Standardlösungsmittel Wasser ergibt sich im Speziellen MEG, ein vicinales Diol mit zwei primären Hydroxygruppen. MEG ist bei Raumtemperatur eine farb- und geruchlose, schwach viskose Flüssigkeit (CAS Registry Number: 107-21-1, Summenformel:  $C_2H_6O_2$ , Molmasse: 62,07g/mol, Relatives C/H/O-Stoffmengenverhältnis (0,2/0,6/0,2), Relatives C/H/O-Massenverhältnis (0,387/0,097/0,516), Prozentuales C/H/O-Massenverhältnis (38,70%/9,69%/51,55)).

Die maßgeblichen Gründe für die Auswahl sind,

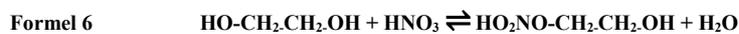
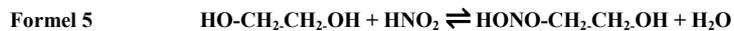
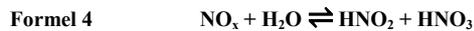
- dass MEG unter den thermischen Bedingungen der Flüssigphasenabsorption von  $CO_2$  gegen Polyethylenimine, Ammoniak und niedermolekulare organische Amine chemisch indifferent ist
- dass MEG ein zu Wasser vergleichbares Aufnahmevermögen für  $CO_2$  hat
- dass MEG im Temperaturbereich der  $CO_2$ -Absorption/Desorption von 10 °C bis 150 °C einen niedrigen Dampfdruck hat und damit im Vergleich zu Wasser unter den thermischen Bedingungen der  $CO_2$ -Desorption zwischen 85 und 130 °C praktisch nicht flüchtig ist,
- dass MEG bei Atmosphärendruck im Temperaturbereich von 10 °C bis 150 °C in allen Verhältnissen sowohl mit Wasser und PEI800, als auch mit den Umsetzungsprodukten PEI800-Carbamat, PEI800-Semihydrogencarbonat und PEI800-Hydrogencarbonat mischbar ist,
- dass MEG bei Atmosphärendruck nicht wasserdampfflüchtig ist und weder mit Wasser und PEI800 noch mit den Umsetzungsprodukten Azeotrope bildet,
- dass die kinematische Viskosität von MEG im Vergleich zu anderen geeigneten Polyolen und protischen Glykolethern relativ niedrig ist,
- dass die Gefahrstoffklassifizierung im Vergleich zu den Glykolethern des Selexolverfahrens relativ unbedenklich ist, da MEG keine Peroxide bildet,
- dass MEG eine sehr preiswerte und weltweit am Markt strategisch verfügbare Massenchemikalie ist,

- dass MEG sowohl als Reinstoff, als auch in Mischungen mit Wasser herausragend beforscht ist.

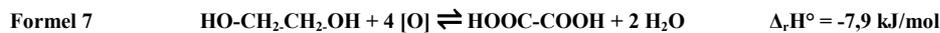
Bei hohen Drücken und Temperaturen >240 °C kann MEG mit Ammoniak nach



zu Schwefligsäureestern. In analoger Weise reagiert MEG mit  $\text{NO}_x$  und Wasser nach



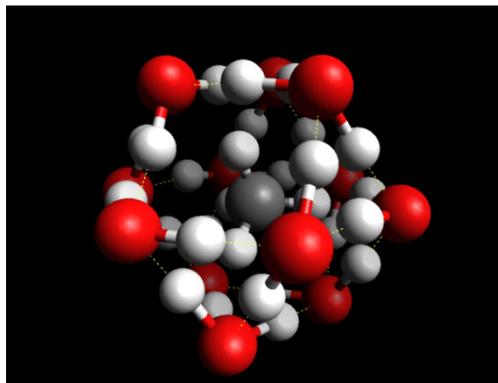
zu Salpetrig- und Salpetersäureestern des Diols. Gegen die chemische Einwirkung starker Oxidationsmittel ist Ethylenglykol instabil. In einer Reaktionsmischung aus  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  und Sauerstoff bei 80 °C und einem Druck von 3-10 bar wird MEG in Gegenwart von Vanadiumoxid und Eisen nach



zu Oxalsäure und Wasser oxidiert<sup>1</sup>. In der organischen Synthesechemie ist MEG eine wichtige Schutzgruppe für Carbonylfunktionen im neutral/alkalischen Milieu. So lassen sich Ketone und Aldehyde in Anwesenheit eines sauren Katalysators (PTSA) nach



unter kontinuierlicher Entwässerung zu 1,3-Dioxolanen umsetzen, die beständig sind gegen die Einwirkung von Basen und Nucleophilen. Die Carbonylfunktion läßt sich durch saure Hydrolyse der 1,3-Dioxolan-Schutzgruppe wieder reversibel zurückbilden.. In der technischen Erdgaslogistik wird Monoethylenglykol in Pipelines injiziert, um die Bildung von festem Methanhydrat (Methanklathrat) zu verhindern. Methanklathrate sind feste Einlagerungsverbindungen bei der das Methanmolekül von Wassermolekülen vollständig umschlossen ist<sup>2</sup>



**Abbildung 1** Methanklathrat

Ein Phänomen, das bei entsprechenden Temperatur- und Druckbedingungen in der Verarbeitung und Transporttechnik, speziell bei starken Druckwechseln in feuchten Methan-Gasströmen große Probleme und Pipeline-Blockaden verursachen kann. Im Zusammenhang mit einer möglichen zukünftigen Verwendung als Lösungsmittel für die Methangasraffination von wasserhaltigen Erdgas, Deponiegas, Grubengas, Frackinggas und Biogas ein interessanter Vorteil. Ethylenglykol wird als wasserlösliches Kühl- und Frostschutzmittel, als Enteiser, als Hydraulikflüssigkeit und als Wärmeübertragungsmedium verwendet. Aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften wird MEG als Entfeuchtungsmittel u.a. in der Gastrocknung verwendet. Als Synthesechemikalie wird MEG für die Herstellung von Polyethylenterephthalat PET und anderen Polyestern eingesetzt.

**Tabelle 1** Daten für Ethylenglykol (NIST-Datenbank)

Eigenschaften	Ethylenglykol MEG
CAS-Nummer	107-21-6
EG-Nummer	203-473-3
REACH- Registriernummer	01-2119456816-28
Summenformel	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
Molmasse	62,07 g/mol
Verbrennungsenthalpie	-1191 kJ/mol
Brechungsindex n <sub>D20</sub>	1,4318
Dichte	1,11g/mL (20 °C)
Kinematische Viskosität	20 mm <sup>2</sup> /s
Dynamische Viskosität	20,81 mPa*s
Schmelzpunkt (P=1013hPa)	-16 °C, -12,7 °C
Oberflächenspannung	
Schmelzenthalpie	160,43 kJ/kg, 9,958 kJ/mol (-16 °C)
Siedepunkt (P=1013hPa)	197,6 °C
Dampfdruck (20 °C)	0,053 mbar bzw. 5,3 Pa
Verdampfungsenthalpie (T = 100 °C)	1007 kJ/kg, 62,5 kJ/mol
Spezifische Wärmekapazität (20 °C; 0,1 MPa))	2,4 kJ/(kg*s)
Wärmeleitfähigkeit (20 °C, 0,1 MPa))	0,25 W/(m*K)
Δ <sub>f</sub> H°(l)	-455 kJ/mol
Δ <sub>f</sub> H°(g)	-389 kJ/mol

CO <sub>2</sub> -Löslichkeit (20 °C)	0,23 m%
CO <sub>2</sub> -Diffusionskoeffizient (25 °C)	2,03 cm <sup>2</sup> /s
Hansen Löslichkeitsparameter	d <sub>D</sub> = 17,0, d <sub>F</sub> = 11,0, d <sub>H</sub> = 26,0
Prandtl-Zahl (20 °C)	ca. 300
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung für Ethylenglykol	
H-Sätze (Hazard statements)	H: 302 und H 373
P-Sätze (Precautionary statements)	keine P-Sätze
EU-Gefahrstoffkennzeichnung	 Xn gesundheitsschädlich
R -Sätze	R 22
S-Sätze	S 2

Ethylenglykol kann oberhalb des Flammpunktes von 111 °C entzündliche Dampf-Luft-Gemische mit den Explosionsgrenzen 3,2 - 43 Vol.%(Luft) bilden. Die Zündtemperatur beträgt 410 °C. Der Stoff ist somit in der Temperaturklasse T2.

### 1.1.1 Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG

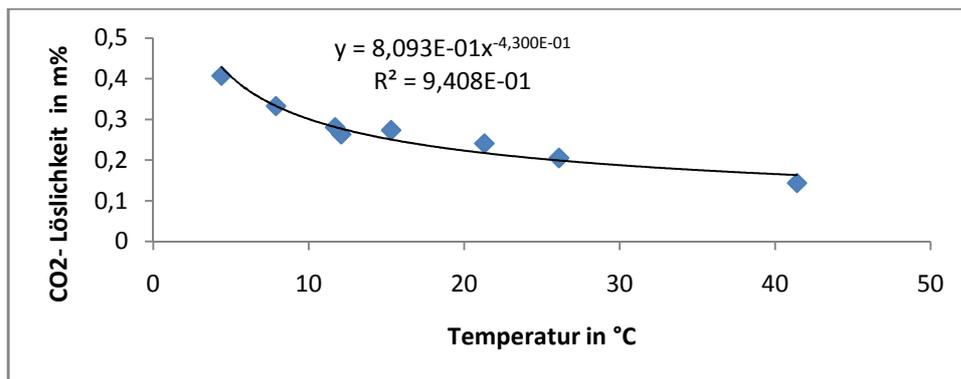


Abbildung 2 Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG in Gew.% CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck für den Temperaturbereich von 5 bis 40°

### 1.1.2 Dichte von MEG

Die Dortmundener Datenbank benennt für Ethylenglykol Dichten bei Atmosphärendruck 98 kPa für den Temperaturbereich von 283 K bis 473 K <sup>3 4 5 6</sup>. Die Dichte von MEG im Temperaturbereich von 10 bis 200 °C bei 98 kPa nimmt mit zunehmender Temperatur annähernd linear ab. Der Verlauf der Dichte mit zunehmender Temperatur läßt sich mathematisch durch eine lineare Funktion mit einem Regressionskoeffizienten R>0,999 sehr gut beschreiben

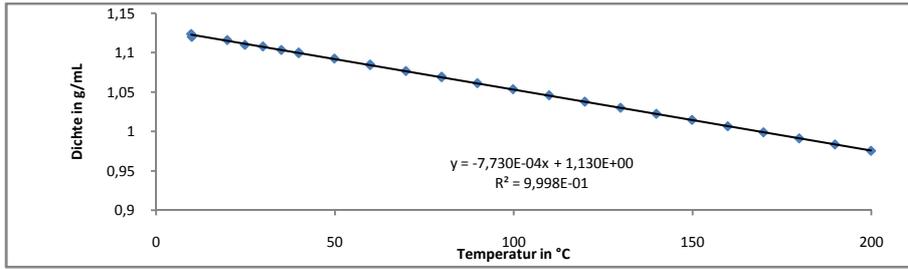


Abb. 3 Dichte von MEG im Temperaturbereich von 10 bis 200 °C bei 98 kPa

### 1.1.3 Oberflächenspannung von MEG

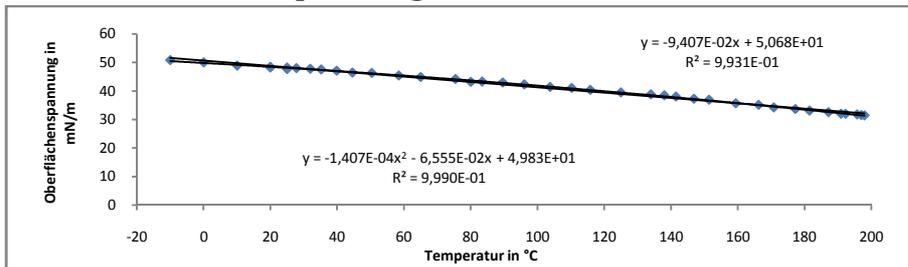


Abb. 4 Oberflächenspannung von MEG im Temperaturbereich von -10 bis 200 °C

### 1.1.4 Spezifische Wärmekapazität von MEG

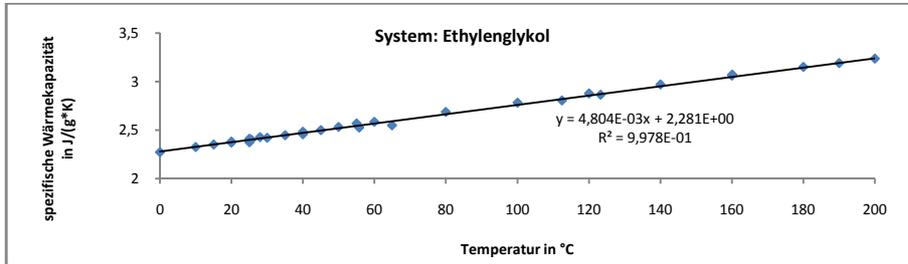


Abb. 5 Spezifische Wärmekapazität von MEG in J/(g\*K) in Abhängigkeit von der Temperatur in °C

### 1.1.5 Wärmeleitfähigkeit von MEG

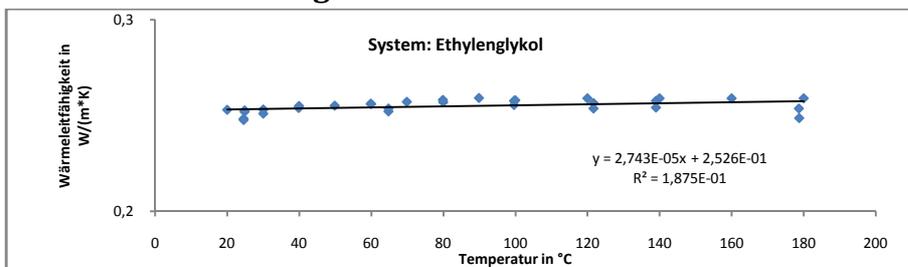


Abbildung 6 Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit von MEG bei Atmosphärendruck 1 bar in W/mK<sup>7</sup>

### 1.1.6 Dynamische Viskosität von MEG

Die Dortmundur Datenbank benennt für Ethylenglykol dynamische Viskositäten für den Temperaturbereich von 258,15 K bis 353,15 K bei Atmosphärendruck <sup>4 6 8 9 10 11</sup>. Die dynamische Viskosität von MEG im Temperaturbereich von -25 °C bis 80 °C bei 98 kPa nimmt mit zunehmender Temperatur stetig degressiv ab. Im Vergleich dazu ist die dynamische Viskosität von Wasser ungefähr 2 Zehnerpotenzen kleiner. Der Verlauf der dynamischen Viskosität im Temperaturbereich von -15 bis 80 °C gehorcht der Gesetzmäßigkeit nach Andrade.

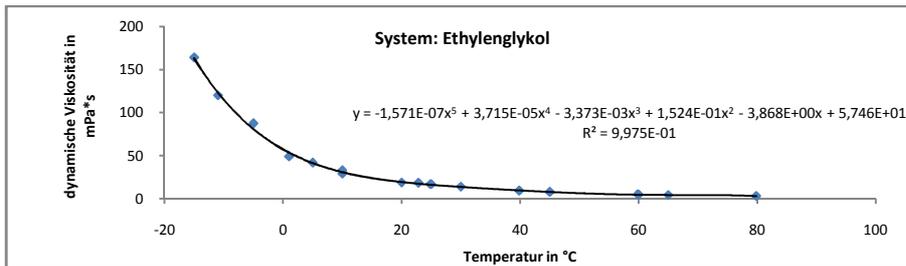


Abbildung 7 Einfluss der Temperatur auf die dynamische Viskosität von Ethylenglykol im Temperaturbereich von -25 °C bis 80 °C bei Atmosphärendruck

Mathematisch läßt sich der Verlauf durch Polynomapproximation mindestens 5.ten Grades mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,997$  hinreichend beschreiben#

### 1.1.7 Resonanzspektrometrische Untersuchung von MEG

Die an der UDE freundlicherweise gemessenen Resonanzspektren von Ethylenglykol (gelöst in D<sub>2</sub>O) stimmen mit Literatur- und Herstellerspektren vollständig überein.

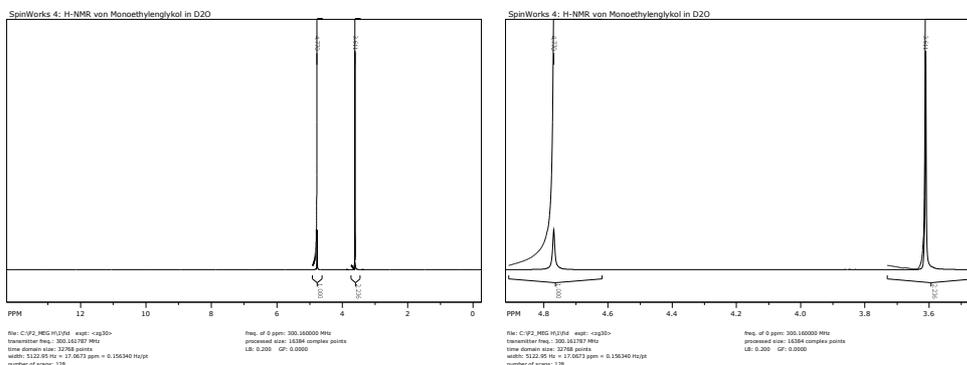


Abbildung 8 H-NMR(300MHz,D2O) von Monoethylglykol

# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

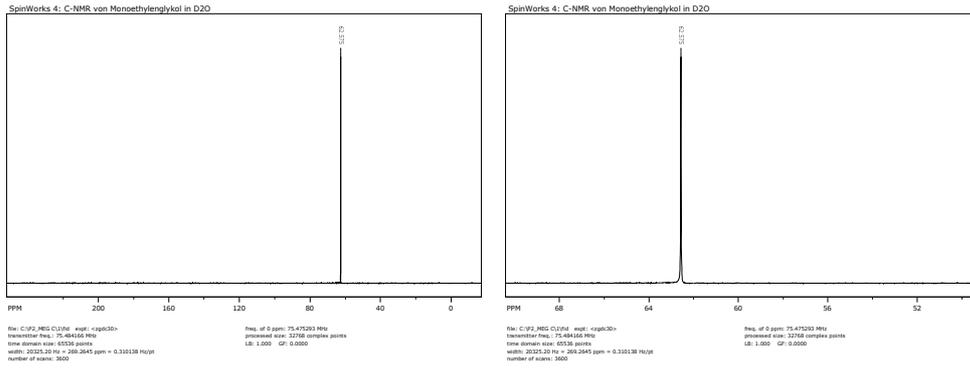


Abbildung 9 C-NMR(300MHz,D2O) von Monoethylglykol

## **1.2 Das Lösungsmittel Wasser**

### **1.3 Das Lösungs- und Reaktionsmittel Wasser**

Wasser ist in all seinen Zustandsformen einer der am besten beforschten Stoffe. In der Absorptionstechnik ist Wasser das protische Standardlösungsmittel für niedermolekulare Amine in der konventionellen Flüssigphasenwäsche von CO<sub>2</sub> und anderen aciden Fluiden aus Rauch-, Schwel- und Verbrennungsgasen. Für potentielle Anwendungen nichtwässriger Gaswaschmittelformulierungen muß generell berücksichtigt werden, dass Wasser praktisch ubiquitärer Bestandteil der Atmosphäre ist und generell bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe neben CO<sub>2</sub> als weiteres Reaktionsprodukt entsteht. Somit muß der Einfluss von Wasser auf nichtwässrige Waschmittelformulierungen grundsätzlich sorgfältig untersucht werden (CAS Registry Number: Summenformel: H<sub>2</sub>O, Molmasse: 18,000, Relatives H/O-Stoffmengenverhältnis: 0,666/0,333, Relatives H/O-Massenverhältnis: 0,111/0,889, Prozentuales H/O-Massenverhältnis: 11,11%/88,89%, Schmelzpunkt: 0 °C, Siedepunkt: 100 °C (P=1013hPa), Dichte: 1g/mL (20 °C), Brechungsindex n<sub>D</sub>:1,333 (20 °C)).

#### **1.3.1 Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser**

## SOLUBILITY OF CARBON DIOXIDE IN WATER AT VARIOUS TEMPERATURES AND PRESSURES

The solubility of CO<sub>2</sub> in water, expressed as mole fraction of CO<sub>2</sub> in the liquid phase, is given for pressures up to atmospheric and temperatures of 0 to 100 °C. Note that 1 standard atmosphere equals 101.325 kPa. The references give data over a wider range of temperature and pressure. The estimated uncertainty is about 2%.

### References

1. Carroll, J. J., Slupsky, J. D., and Mather, A. E., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 20, 1201, 1991.
2. Fernandez-Prini, R. and Crovetto, R., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 18, 1231, 1989.
3. Crovetto, R., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 20, 575, 1991.

t/°C	1000 × mole fraction of CO <sub>2</sub> in liquid phase						
	Partial pressure of CO <sub>2</sub> in kPa						
	5	10	20	30	40	50	100
0	0.067	0.135	0.269	0.404	0.538	0.671	1.337
5	0.056	0.113	0.226	0.338	0.451	0.564	1.123
10	0.048	0.096	0.191	0.287	0.382	0.477	0.950
15	0.041	0.082	0.164	0.245	0.327	0.409	0.814
20	0.035	0.071	0.141	0.212	0.283	0.353	0.704
25	0.031	0.062	0.123	0.185	0.247	0.308	0.614
30	0.027	0.054	0.109	0.163	0.218	0.271	0.541
35	0.024	0.048	0.097	0.145	0.193	0.242	0.481
40	0.022	0.043	0.087	0.130	0.173	0.216	0.431
45	0.020	0.039	0.078	0.117	0.156	0.196	0.389
50	0.018	0.036	0.071	0.107	0.142	0.178	0.354
55	0.016	0.033	0.065	0.098	0.131	0.163	0.325
60	0.015	0.030	0.060	0.090	0.121	0.150	0.300
65	0.014	0.028	0.056	0.084	0.112	0.140	0.279
70	0.013	0.026	0.052	0.079	0.105	0.131	0.261
75	0.012	0.025	0.049	0.074	0.099	0.123	0.245
80	0.012	0.023	0.047	0.070	0.093	0.116	0.232
85	0.011	0.022	0.044	0.067	0.089	0.111	0.221
90	0.011	0.021	0.042	0.064	0.085	0.106	0.211
95	0.010	0.020	0.041	0.061	0.082	0.102	0.203
100	0.010	0.020	0.039	0.059	0.079	0.098	0.196

TABLE 3. Calculated solubilities for carbon dioxide in water at various total pressures

Temperature (°C)	Solubility of CO in water at various total pressures (Solubility in mole fraction $\times$ 1000, pressure in kPa)					
	50	101.325	200	500	750	1000
0	0.670	1.362	2.68	6.58	9.72	12.75
10	0.479	0.962	1.90	4.68	6.93	9.11
20	0.340	0.704	1.398	3.47	5.14	6.77
25	0.291	0.609	1.216	3.02	4.49	5.92
30	0.251	0.531	1.065	2.66	3.95	5.22
40	0.186	0.409	0.835	2.11	3.14	4.16
50	0.135	0.319	0.669	1.72	2.57	3.41
60	0.091	0.247	0.544	1.435	2.16	2.88
70	0.047	0.185	0.444	1.220	1.86	2.48
80	0.006	0.127	0.357	1.050	1.62	2.18
90	--	0.067	0.277	0.908	1.426	1.94
100	--	--	0.195	0.782	1.265	1.74
110	--	--	0.106	0.662	1.119	1.57
120	--	--	0.003	0.537	0.977	1.412
130	--	--	--	0.400	0.828	1.253
140	--	--	--	0.238	0.662	1.083
150	--	--	--	0.042	0.466	0.887
160	--	--	--	--	0.277	0.653

TABLE 4. Calculated solubilities for carbon dioxide in water at various CO<sub>2</sub> partial pressures

Temperature (°C)	Solubility of CO in water at various partial pressures (Solubility in mole fraction $\times$ 1000, pressure in kPa)			
	50	101.325	200	500
0	0.671	1.355	2.66	6.52
10	0.477	0.963	1.89	4.65
20	0.353	0.713	1.400	3.45
25	0.308	0.622	1.223	3.01
30	0.271	0.548	1.077	2.66
40	0.216	0.437	0.858	2.12
50	0.178	0.359	0.706	1.75
60	0.150	0.304	0.598	1.480
70	0.131	0.264	0.520	1.288
80	0.116	0.236	0.463	1.148
90	0.106	0.214	0.422	1.046
100	0.098	0.199	0.391	0.971
110	0.093	0.188	0.370	0.917
120	0.089	0.180	0.354	0.880
130	0.086	0.175	0.345	0.856
140	0.085	0.172	0.339	0.844
150	0.085	0.172	0.338	0.841
160	0.085	0.173	0.340	0.846

Müller *et al.* (1988). The Wiebe and Gaddy (1941) vapor compositions are only at 101.325 kPa, although they have other data outside the range of this investigation. The values of Zawisza and Malesinska (1981) and Müller *et al.* (1988) with the prediction from this model are shown on Fig. 6. This represents a "true" prediction since the experimental vapor compositions were not used in the development of the model. The agreement between the model and the experimental data is good and hence, in some small measure, verifies the applicability of the model. Note, the curves intersect the  $x_1 = 1$  axis at the vapor pressure of water.

J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 20, No. 6, 1991

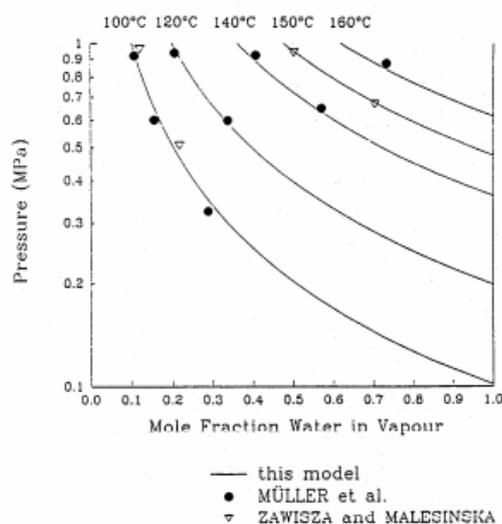


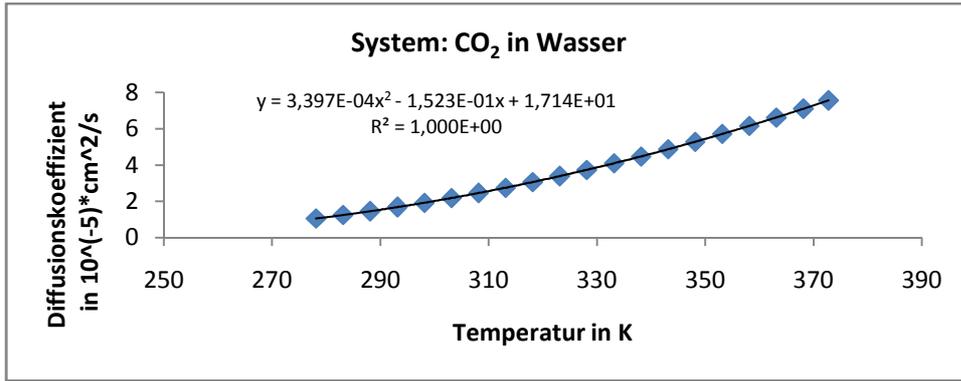
Fig. 6. Water content of the vapor in equilibrium with carbon dioxide solutions.

## 5. Conclusions

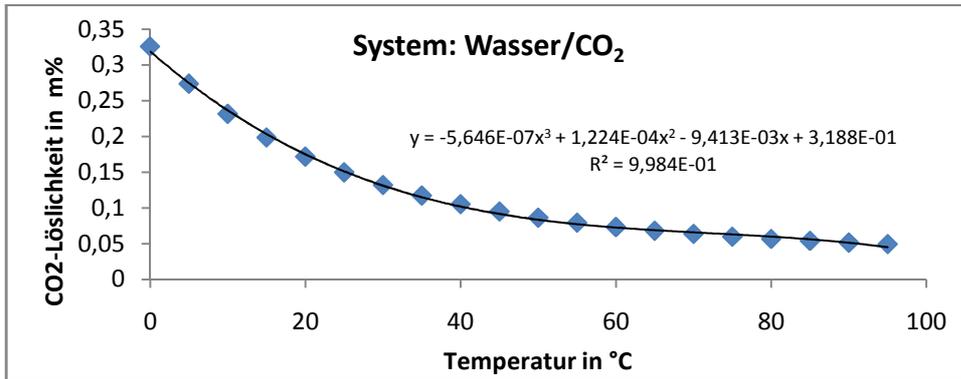
A large data base consisting of all the low pressure ( $P < 1$  MPa) solubility data for carbon dioxide in water was assembled. Using a model based on Henry's law the data were compared and graded. Several studies were shown to be of poor quality. As a result of this investigation a new correlation of the low pressure solubility was developed.

## 6. References

- Austin, W. H., E. Lacombe, P. W. Rand, and M. Chatterjee, 1963 J. Appl. Physiol. **18**, 301-304.  
 Barbero, J. A., L. G. Hepler, K. G. McCurdy, and P. R. Tremaine, 1983 Can. J. Chem. **61**, 2509-2519.  
 Bartels, H., and R. Wrbitzky, 1960 Pfluegers Archiv. **271**, 162-168.  
 Bartholomé, E., and H. Friz, 1956 Chem.-Ing.-Tech. **28**, 706-708.  
 Barton, J. R., and C. C. Hsu, 1971 J. Chem. Eng. Data **16**, 93-95.  
 Battino, R., and H. L. Clever, 1966 Chem. Rev. **66**, 395-463.  
 Berg, R. L., and C. E. Vanderzee, 1978 J. Chem. Thermo. **10**, 1113-1136.  
 Bohr, C., 1899 Ann. Phys. Chem. **68**, 500-525.  
 Bohr, C., and J. Bock, 1891 Ann. Phys. Chem. **44**, 318-343.  
 Böxkes, W., and G. Emig, 1969 Chem.-Ing.-Tech. **41**, 1273-1276.  
 Buch, K., 1925 Soc. Sci. Fennica Comm. Phys.-Math. **2**, (16), 1-9.  
 Buchanan, J. Y., 1874 Proc. Roy. Soc. (London) **22**, 485-495.  
 Bunsen, R., 1855a Ann. Chem. Pharm. **93**, 1-50.  
 Bunsen, R., 1855b Phil. Mag. ser. 4, **9**, 116-130, 181-201.  
 Bunsen, R., 1855c Ann. Chim. Phys. ser. 3, **43**, 496-507.  
 Cargill, R. W., and D. E. MacPhee, 1981a J. Chem. Res. (M) 2743-2755.  
 Cargill, R. W., and D. E. MacPhee, 1981b J. Chem. Res. (S) 232.  
 Carroll, J. J., and A. E. Mather, 1989 Geochim. Cosmochim. Acta **53**, 1163-1170.  
 Christoff, A., 1905 Z. Phys. Chem. **53**, 321-340.  
 Cox, J. D., and A. J. Head, 1962 Trans. Faraday Soc. **58**, 1839-1845.



Formel 9 Einfluss der Temperatur auf den Diffusionskoeffizienten von CO<sub>2</sub> in Wasser bei Atmosphärendruck



Formel 10 Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser im Temperaturbereich von 1 °C bis 90 °C unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck

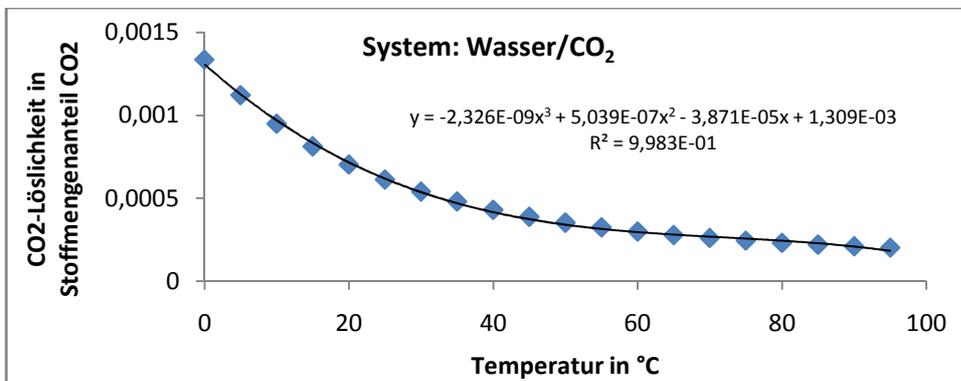


Abbildung 10 Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser unter isobaren Bedingungen im Temperaturbereich von 1 °C bis 90 °C bei Normaldruck und 101,33 kPa CO<sub>2</sub>-Dampfdruck

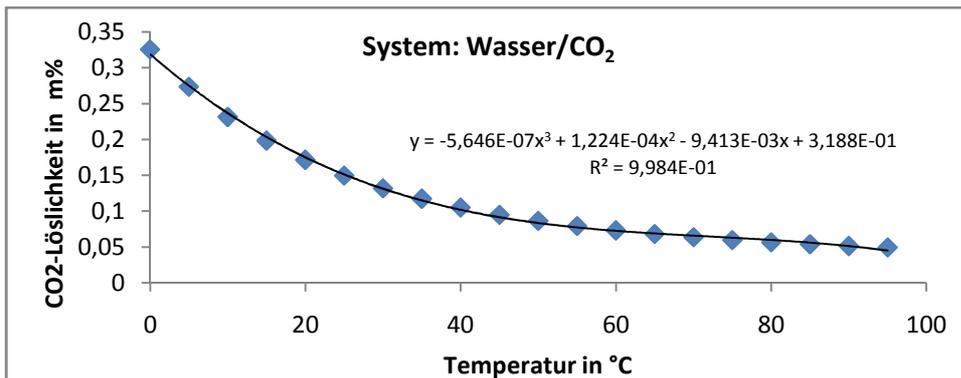


Abbildung 11 Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser im Temperaturbereich von 1 °C bis 90 °C unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck

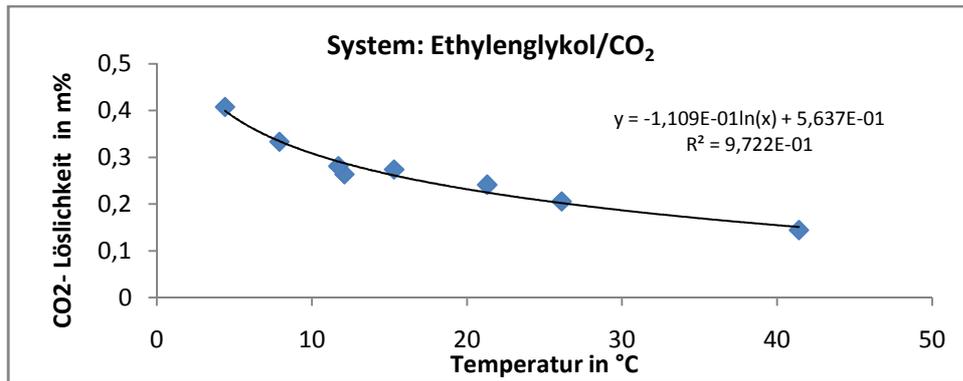


Abbildung 12 Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG in Gew.% CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck für den Temperaturbereich von 5 – 40 °C

### 1.3.2 Löslichkeit von Wasser in Luft

Die Wasserdampföslichkeit und der Wasserdampfdruck in Luft nehmen mit zunehmender Temperatur bis 100 °C progressiv zu.

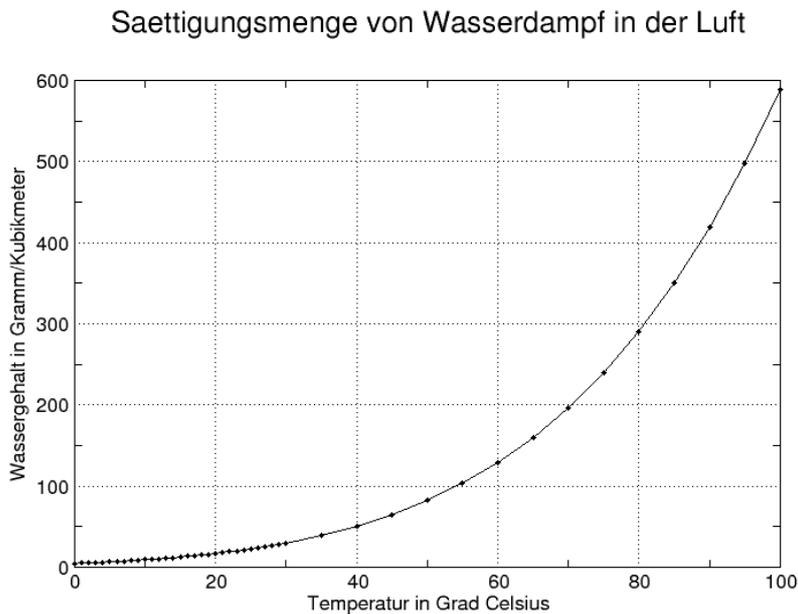


Abbildung 13 Einfluss der Temperatur auf die Sättigungslöslichkeit von Wasser in Luft bei Atmosphärendruck

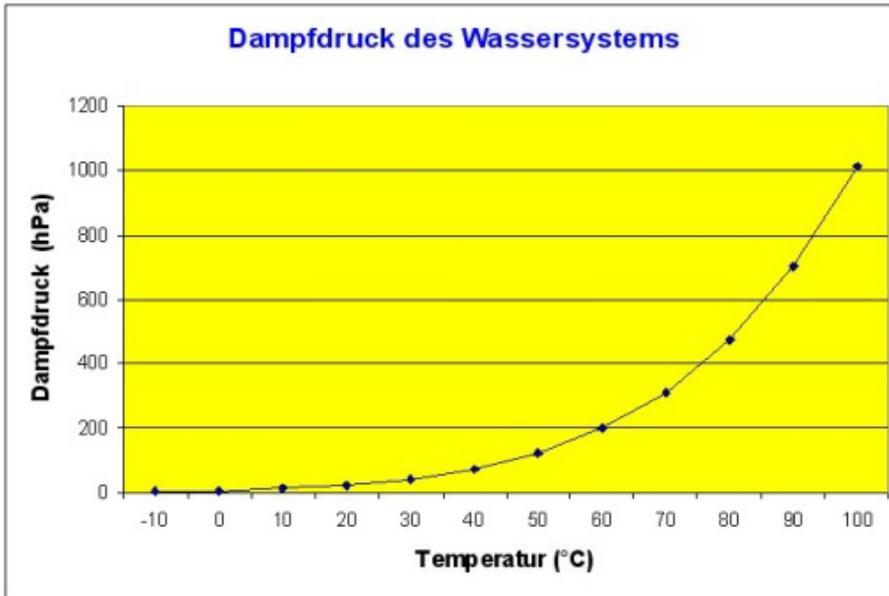


Abbildung 14 Einfluss der Temperatur auf den Dampfdruck von Wasser in Luft bei Atmosphärendruck

### 1.3.3 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Wasser

Im Temperaturintervall von 0 bis 100 °C bei Normaldruck steigt die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit zunehmender Temperatur marginal an, während die spezifische Wärmekapazität zunächst abnimmt, bei ca. 37 °C ein relatives Minimum durchläuft und dann wieder zunimmt.

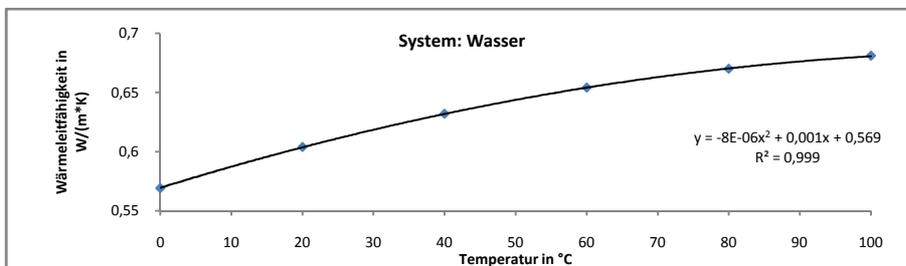


Abbildung 15 Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasser bei Atmosphärendruck <sup>7</sup>

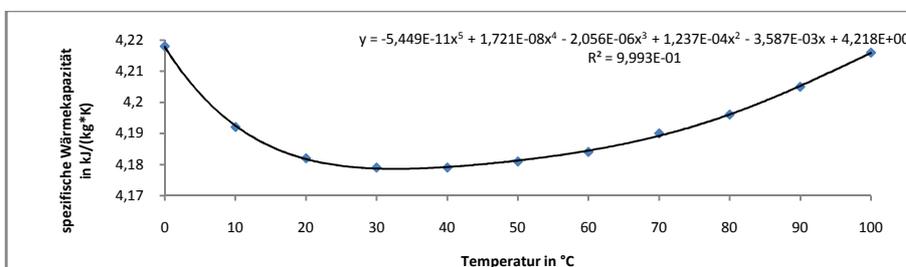


Abbildung 16 Einfluss der Temperatur auf die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser bei Atmosphärendruck <sup>7</sup>

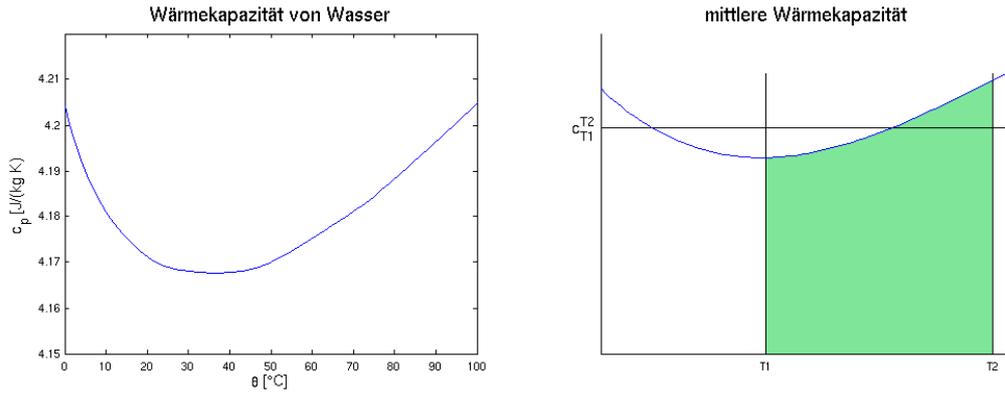


Abbildung 17 Spezifische Wärmekapazität von Wasser im Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C und mittlere Wärmekapazität von Wasser für einen Temperaturbereich T1 bis T2

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität bei Atmosphärendruck von der Temperatur im Temperaturintervall von 0° bis 100 °C läßt sich mathematisch durch Polynome 2.ter Ordnung mit Bestimmtheitsmaßen >0,999 sehr gut kalkulieren.

### 1.3.4 Verdampfungsenthalpie von Wasser

Im Temperaturintervall von 0 bis 100 °C bei Normaldruck nimmt die spezifische Verdampfungsenthalpie mit zunehmender Temperatur annähernd linear ab

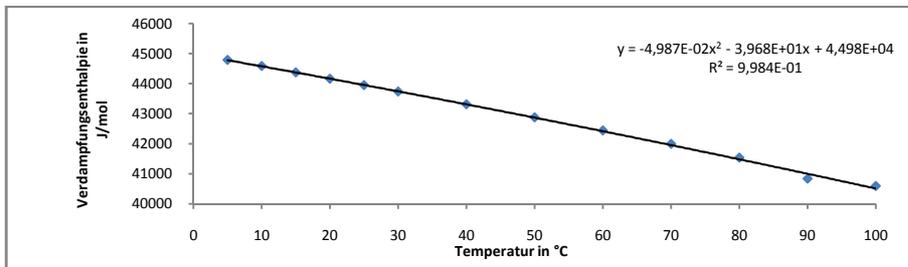


Abbildung 18 Einfluss der Temperatur auf die Molare Verdampfungsenthalpien von Wasser bei Atmosphärendruck von 5 °C bis 100 °C

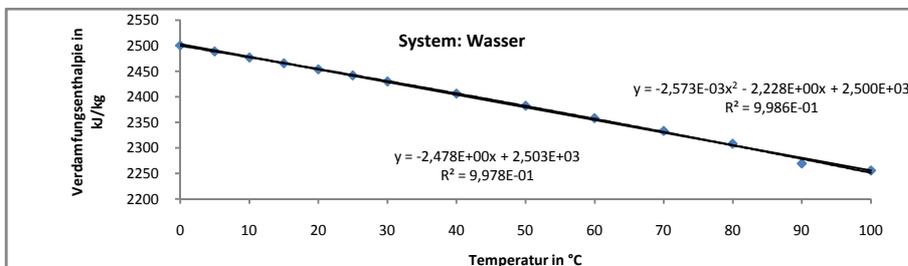


Abbildung 19 Einfluss der Temperatur auf die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei Atmosphärendruck <sup>12</sup>

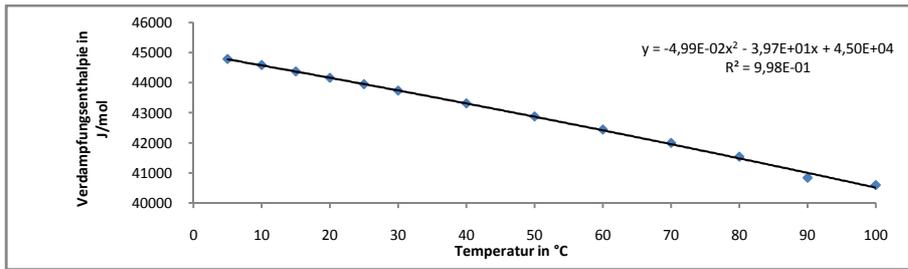


Abbildung 20 Einfluss der Temperatur auf die Molare Verdampfungsenthalpien von Wasser bei Atmosphärendruck von 5 °C bis 100 °C<sup>12</sup>

Die Abhängigkeit der Verdampfungsenthalpie von der Temperatur im Temperaturintervall von 0 bis 100 °C bei Atmosphärendruck läßt sich mathematisch durch Polynome 2.ter Ordnung mit Bestimmtheitsmaßen >0,998 gut kalkulieren.

### 1.3.4.1 Kinematische Viskosität von Wasser

Die Dortmunder Datenbank benennt für Wasser kinematische Viskositäten für den Temperaturbereich von 273,15 bis 373,15 K bei Atmosphärendruck. Die kinematische Viskosität von Wasser nimmt mit zunehmender Temperatur stetig degressiv ab.

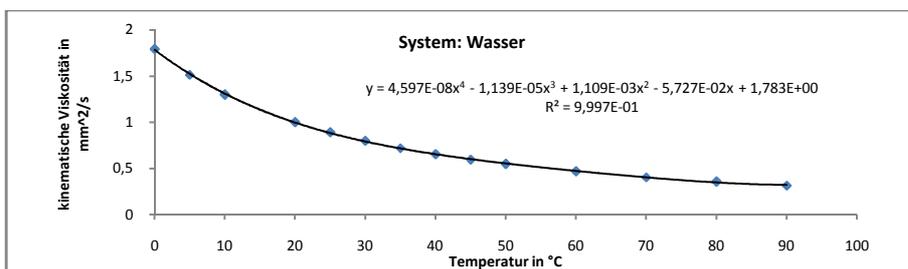
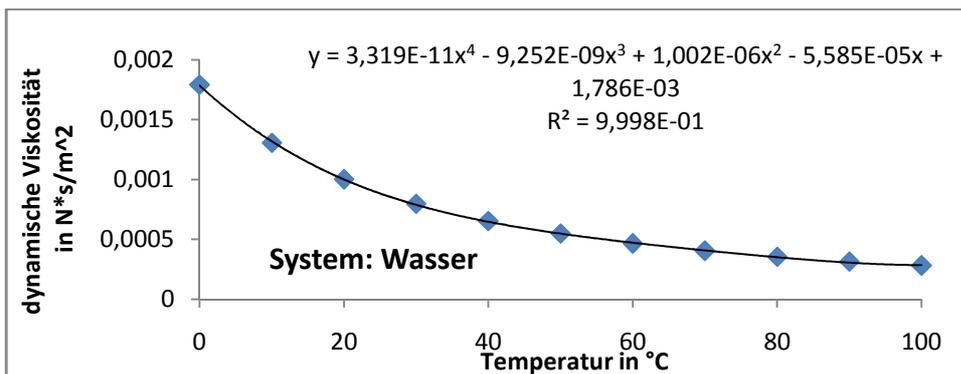
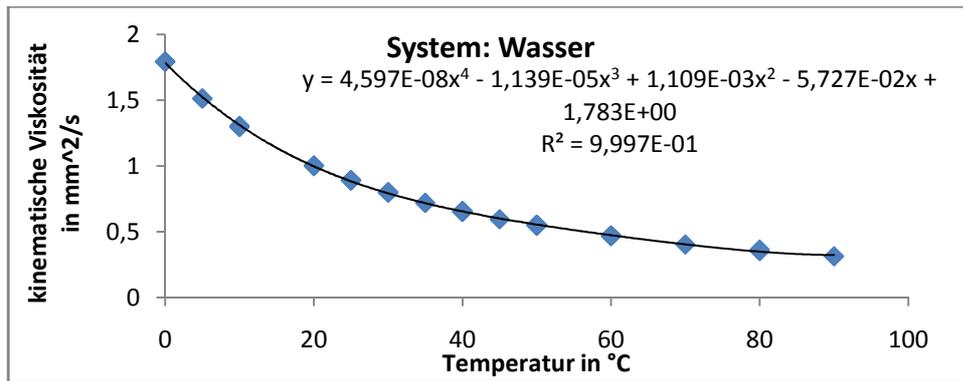


Abbildung 21 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität von Wasser<sup>13</sup> bei Atmosphärendruck

Der Verlauf der kinematischen Viskosität im Temperaturbereich von 0 bis 90 °C gehorcht der Gesetzmäßigkeit nach Andrade und läßt sich mathematisch durch Polynome mind. 3.ten Grades mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,997$  hinreichend beschreiben. Die kinematische Viskosität von Wasser ist gemittelt 2 Zehnerpotenzen kleiner als die von MEG.



Formel 11 Einfluss der Temperatur auf die dynamische Viskosität von Wasser<sup>7</sup>



Formel 12 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität von Wasser<sup>14</sup> bei Atmosphärendruck

#### **1.4 Das Lösungsmittelgemisch MEG/Wasser**

Ethylenglykol und Wasser sind bei Raumbedingungen in allen Verhältnissen homogen unter Wärmeentwicklung miteinander mischbar. Beide Komponenten sind polar protisch und wechselwirken über Wasserstoffbrückenbindungen. Die Mischungen sind geruchlose homogene Flüssigkeiten deren thermophysikalisches Verhalten beim Erwärmen hinsichtlich ihrer weitverbreiteten technischen Anwendungen als Frostschutzmittel und Wärmetauscherflüssigkeit ausgezeichnet beforscht sind, wie z.B. hinsichtlich physikalischer Eigenschaften und Werkstoffverträglichkeit der öffentliche Datensatz der Firma Pro Kühlsole GmbH, die modifizierte Ethylenglykol/Wasser Mischungen unter dem Warenzeichen Glycosol konfektioniert und diese weltweit am Markt anbietet. Die folgenden Abbildungen beschreiben den Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die Gefriertemperatur-, die Siedetemperatur, den Dampfdruck, die spezifische Wärme, die Dichte und die kinetische Viskosität<sup>15</sup>

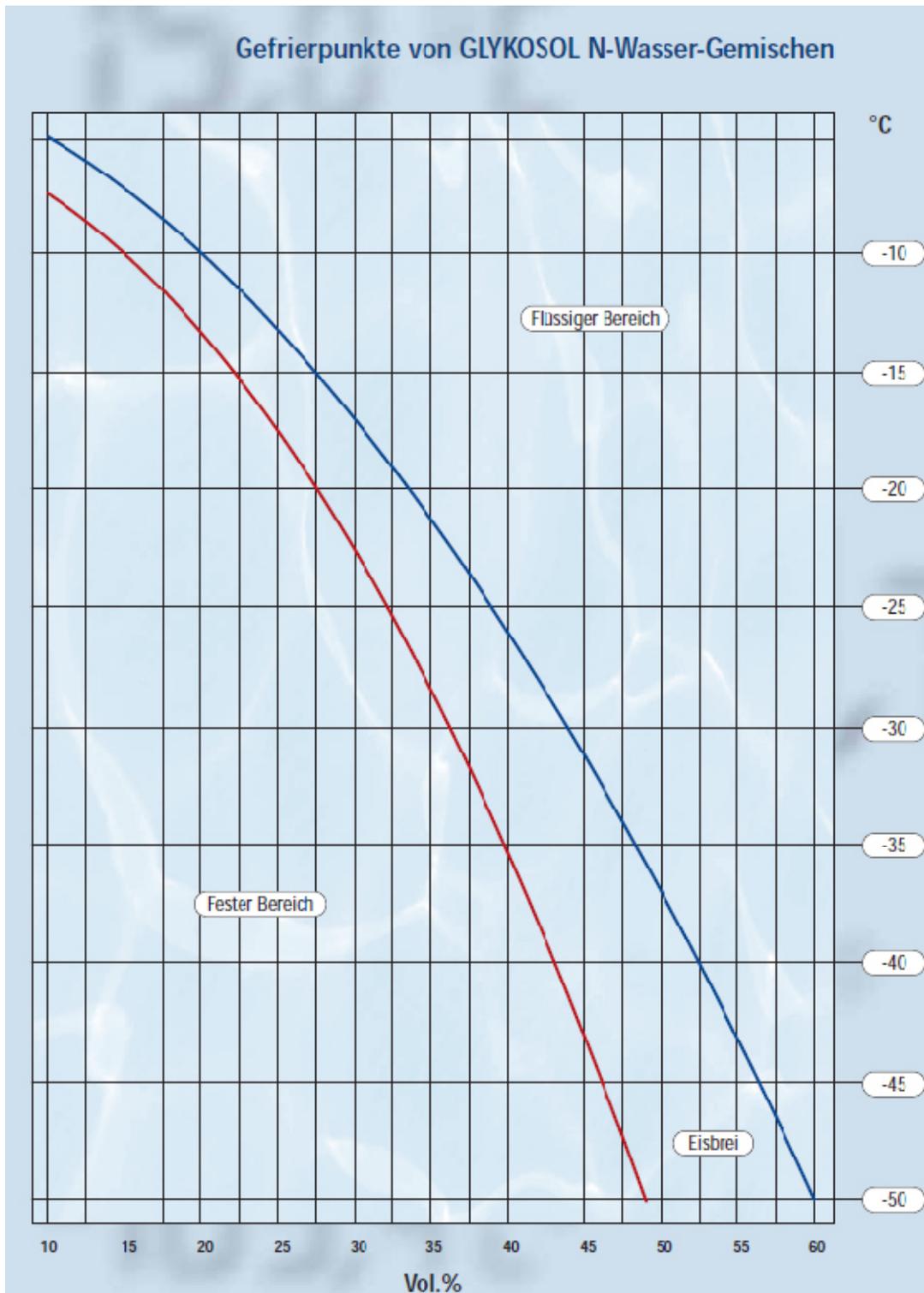


Abbildung 22 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die Gefrier- und Siedetemperatur, den Dampfdruck, die spezifische Wärme, die Dichte und die kinetische Viskosität <sup>15</sup>

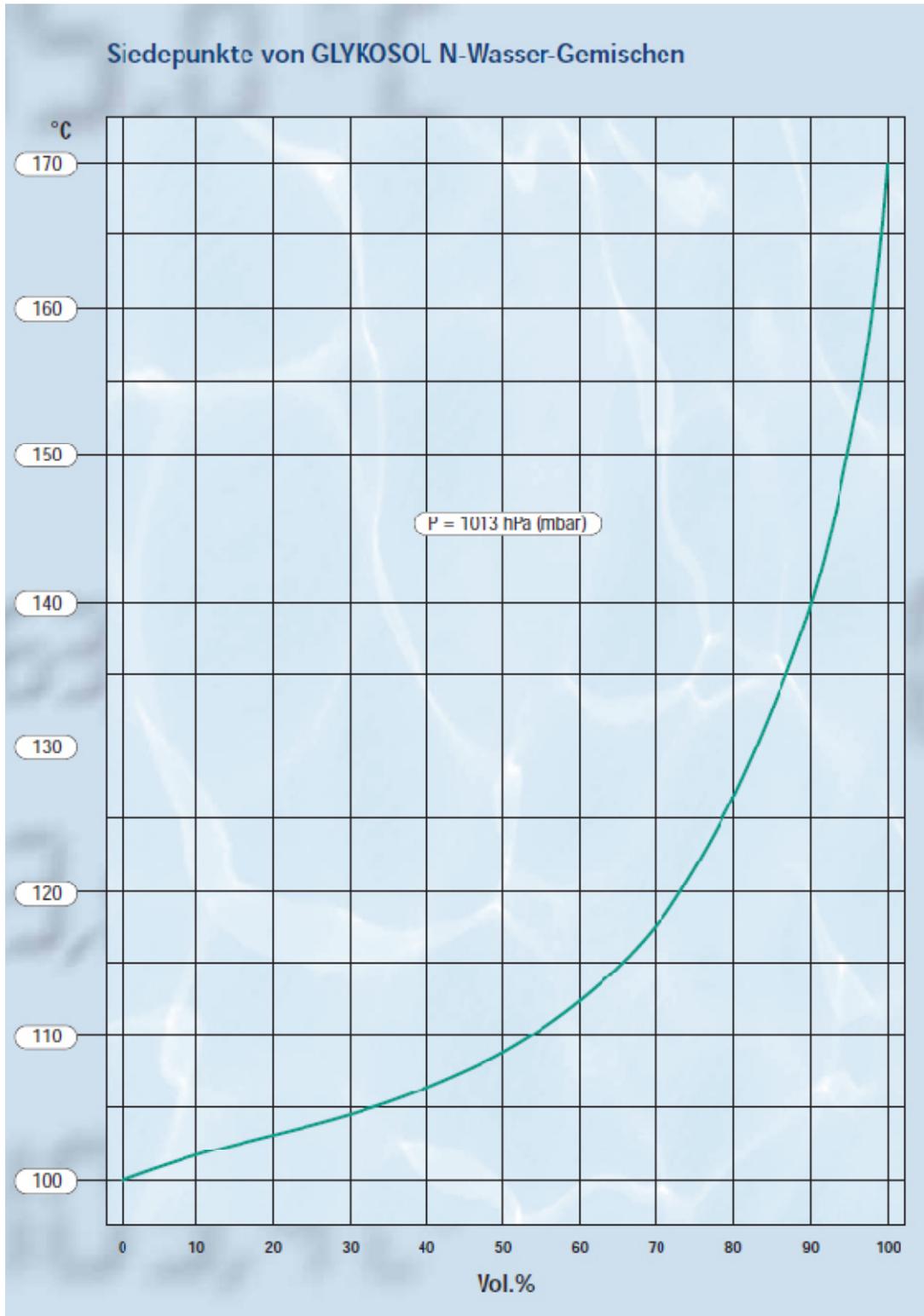


Abbildung 23 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die Siedetemperatur <sup>15</sup>

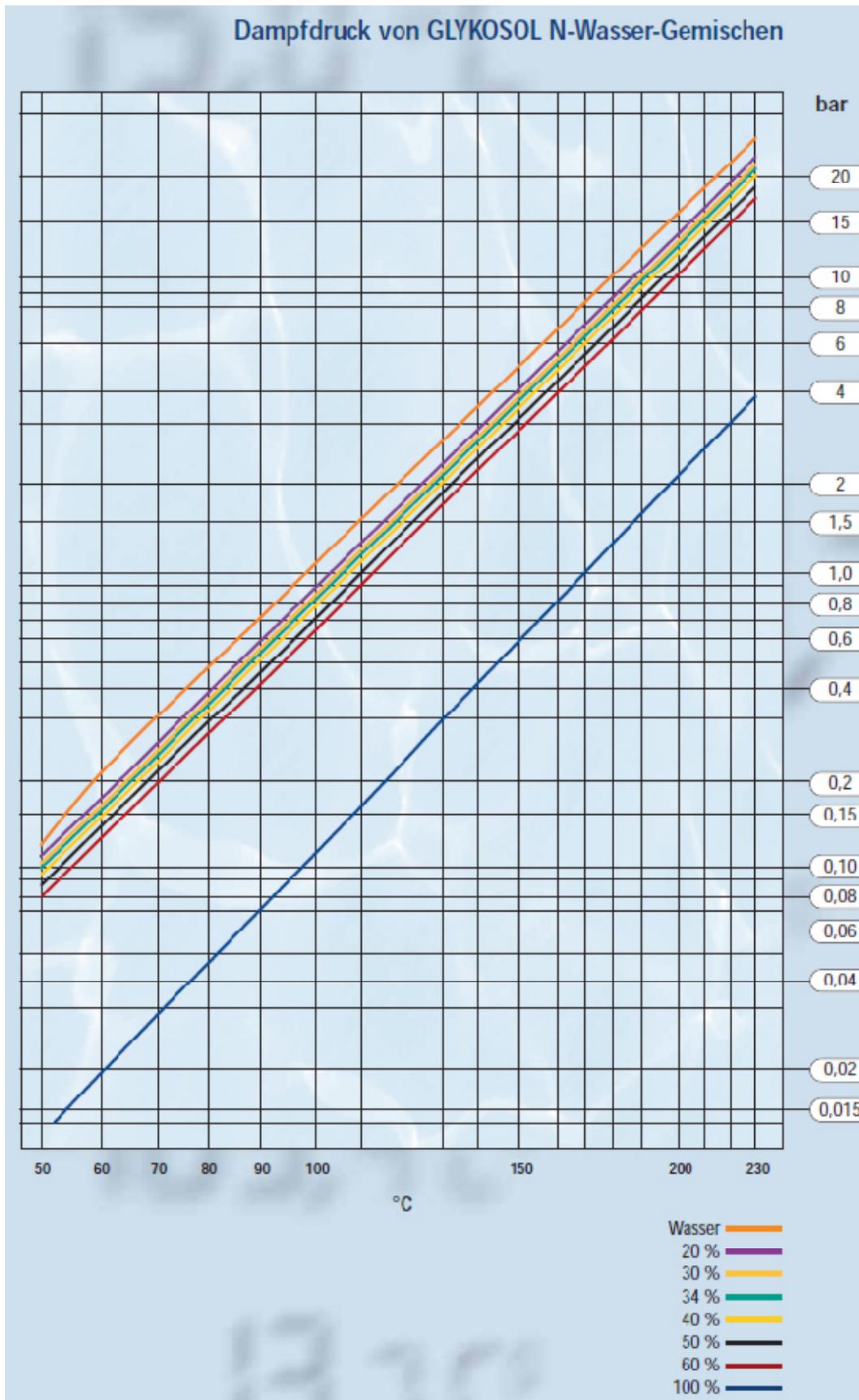


Abbildung 24 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf den Dampfdruck <sup>15</sup>

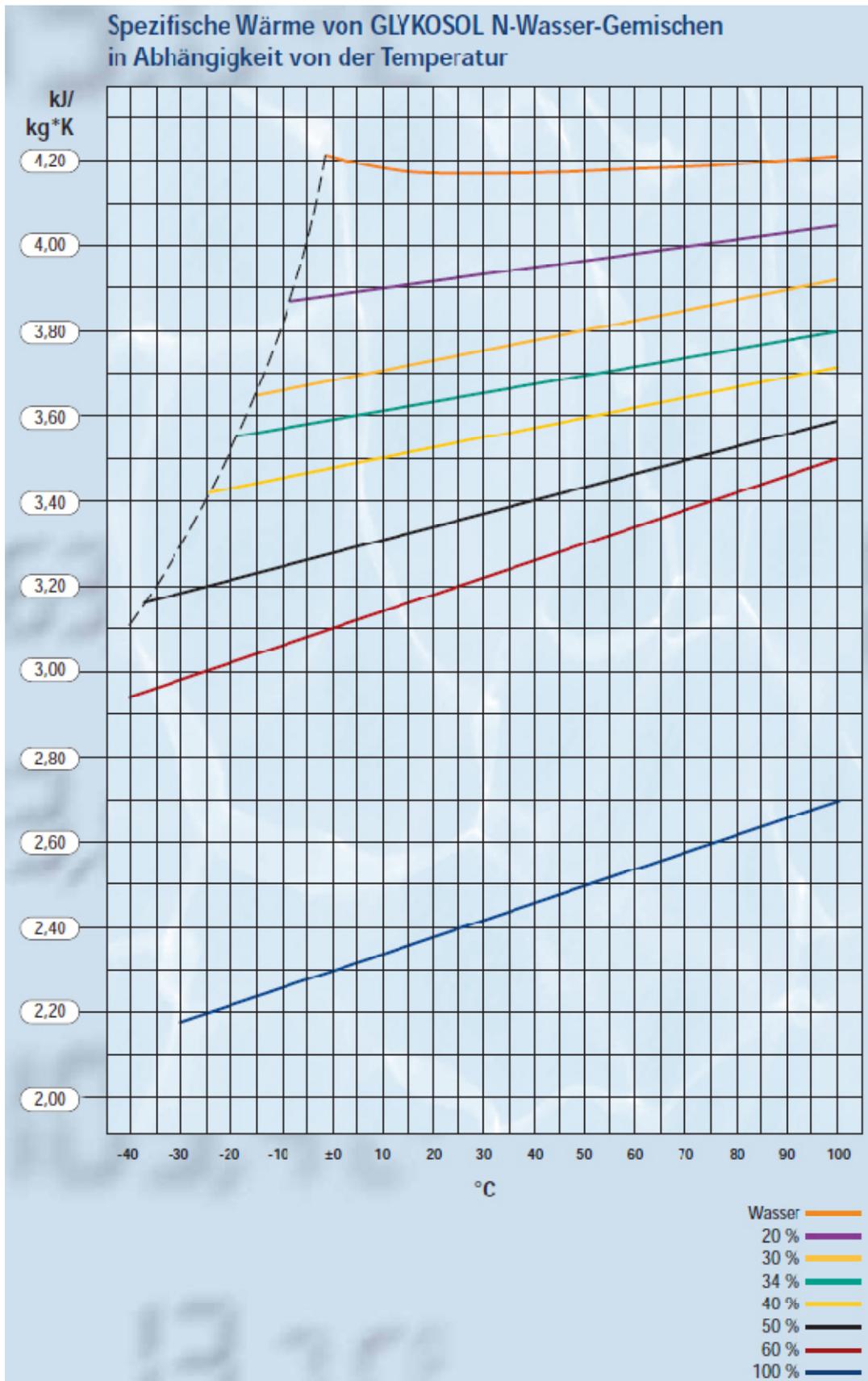


Abbildung 25 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die spezifische Wärme <sup>15</sup>

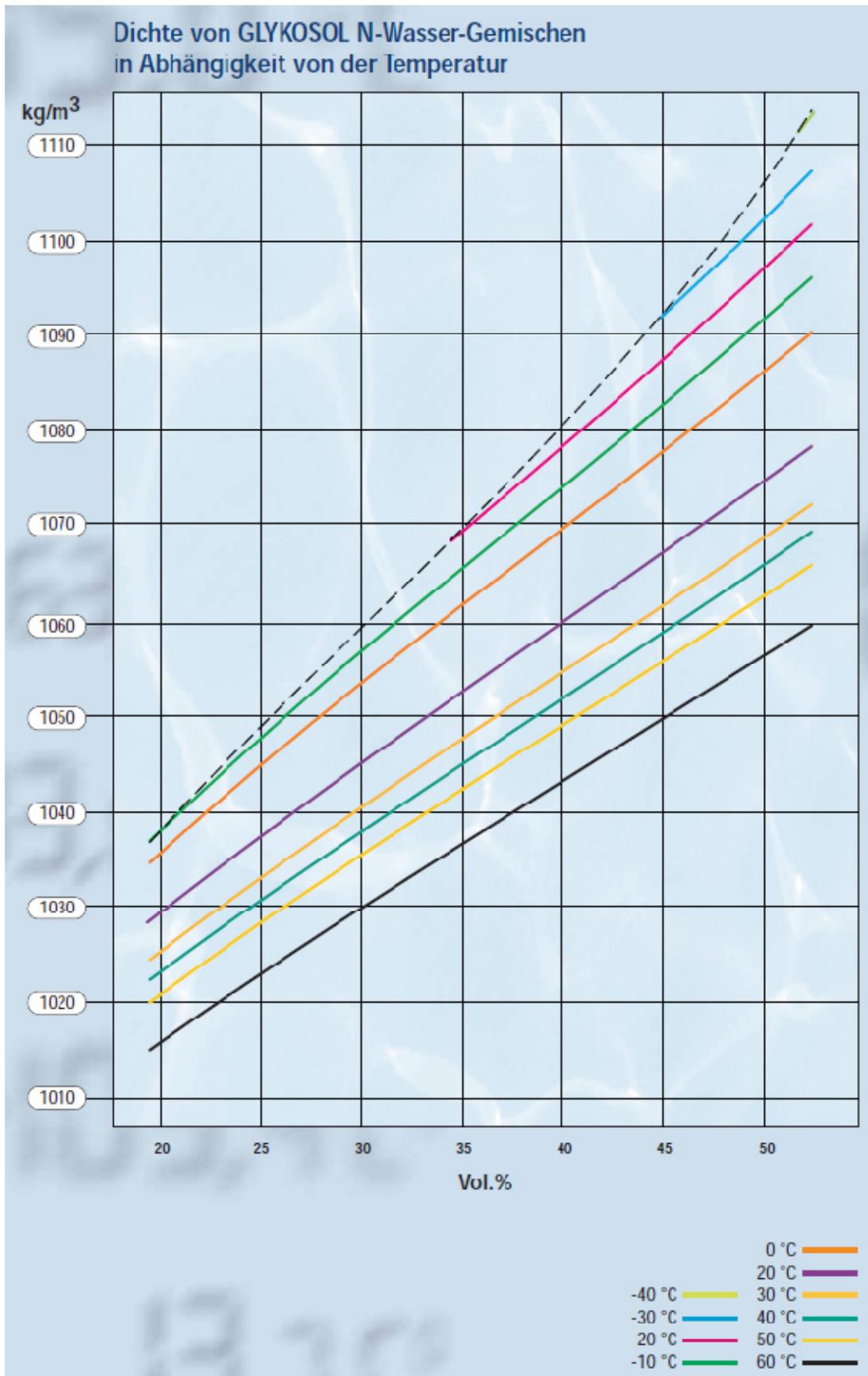


Abbildung 26 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die Dichte <sup>15</sup>

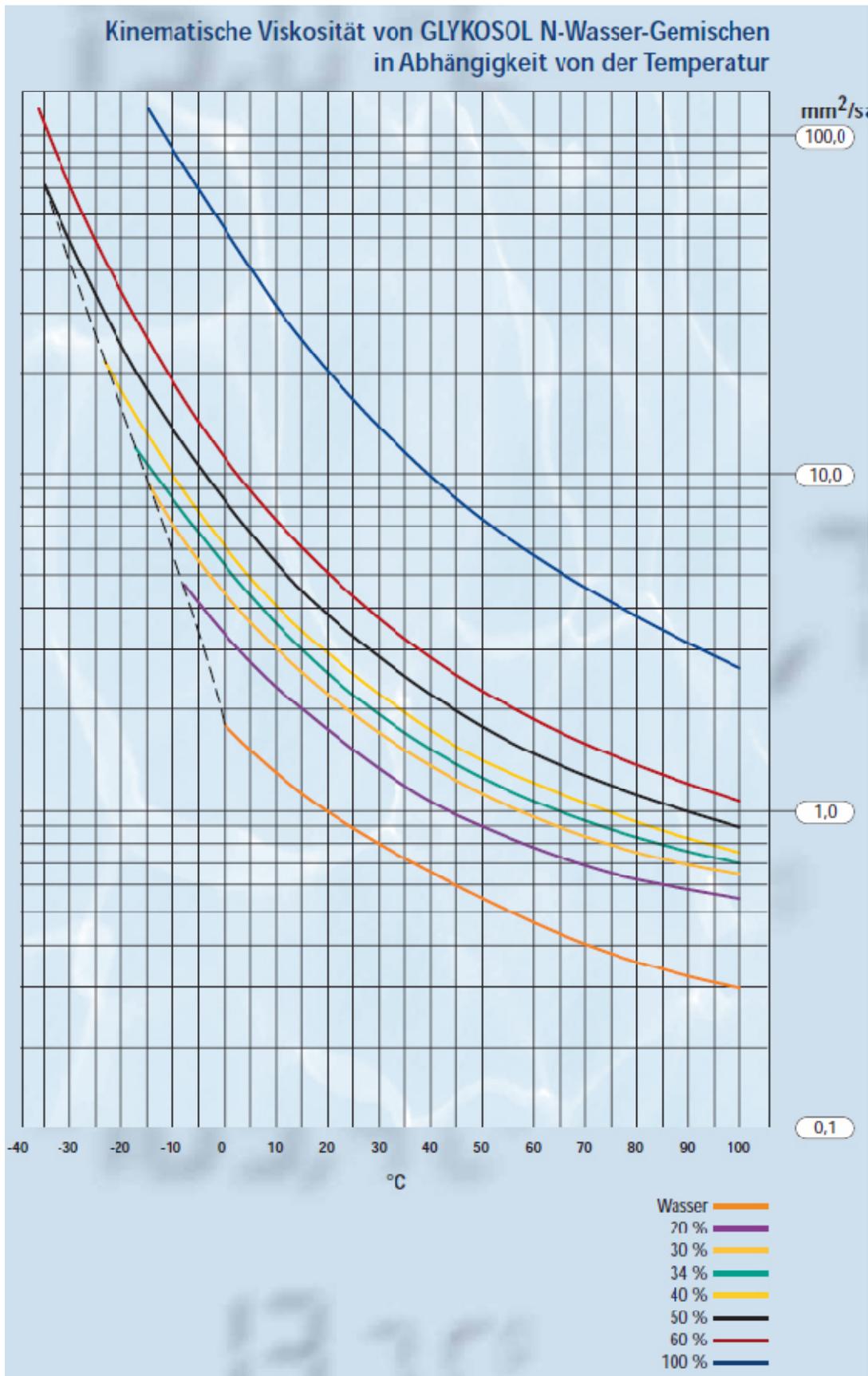
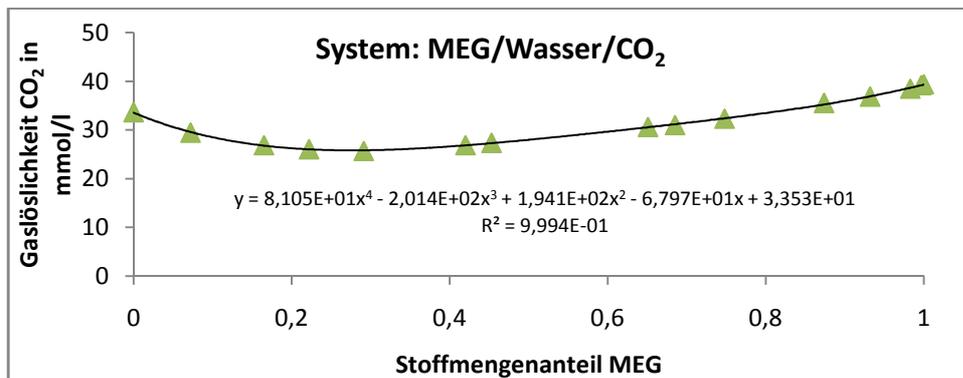


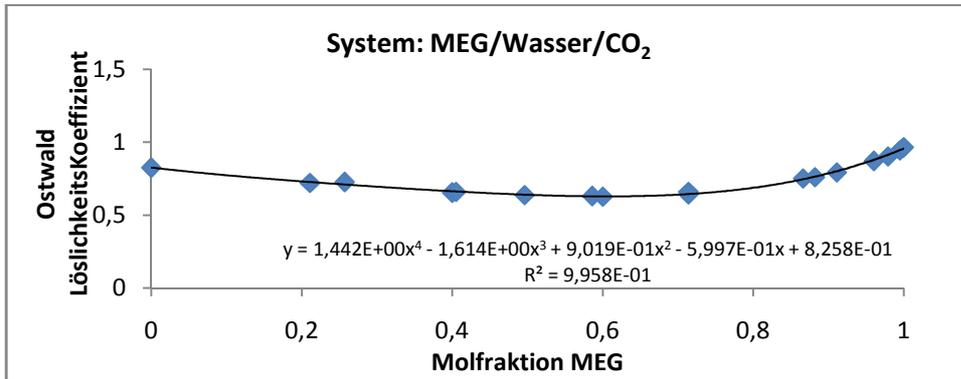
Abbildung 27 Einfluss der Zusammensetzung von MEG/Wasser-Mischungen auf die kinetische Viskosität <sup>15</sup>

Modifiziert mit hochwirksamen Korrosionsschutzadditiven und Härtestabilisatoren werden diese als Wärmeübertragungs-, Frostschutz- und Korrosionsschutzmedien in vielen technischen Bereichen eingesetzt wie z.B. Wärmepumpen, Erdsonden, Klimaanlage, Wärmetauschern, Wärmerückgewinnungssysteme, Heiz- und Kühlsysteme. Mischungen aus Wasser und Ethylenglykol wirken deutlich korrosiver auf Metalle, als die Einzelkomponenten. Für technische Anwendungen werden sie mit Korrosionsinhibitoren und Stabilisatoren ausgestattet. Das Inhibitorsystem schützt alle üblicherweise verwendeten metallischen Werkstoffe sicher vor Korrosion und Ablagerungen, sogar der Einsatz von verzinkten Bauteilen ist möglich. Die Zinkschicht wird zwar über einen langen Zeitraum abgelöst, beeinträchtigt aber in keiner Weise die Wirkung des Mediums, da neuentwickelte Additive ein Ausflocken und Ablagern verhindern. Eine Ethylenglykol-Konzentration von 20 Vol.% in Wasser sollte nicht unterschritten werden, da der Korrosionsschutz dann nicht mehr gewährleistet ist. Die folgenden Kunststoffe sind beständig gegen GLYKOSOL N, ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol, PE Polyethylen, PP Polypropylen, PTFE Polytetrafluorethylen, PVC Polyvinylchlorid, IIR Butylkautschuk, EPDM Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk, CR Polychlorbutadienkautschuk, VPE Polyethylen vernetzt, Centellen NP (WS 3860) (Handelsname), SBR Styrolbutadienkautschuk bis 100 °C, FPM (®Viton) Fluorcarbonelastomere, NBR Nitrilkautschuk, POM Polyacetal, PA Polyamid, UP Polyesterharze, PBPolybuten, NR Naturkautschuk bis 80 °C, Hanf. Die im Anlagen- und Heizungsbau üblicherweise eingesetzten Dichtungswerkstoffe werden nicht angegriffen. Nicht beständig sind Polyurethan-Elastomere, PVCweich und Phenol-Formaldehyd-Harze. In jedem Fall sind die thermischen Einsatzgrenzen zu beachten.

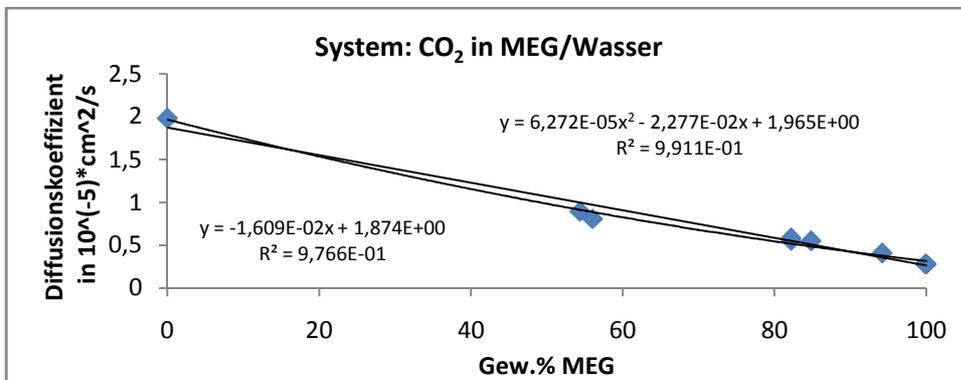
#### 1.4.1 Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in MEG/Wasser



Formel 13 CO<sub>2</sub>-Löslichkeit in wässriger Ethylenglykollösung in mmol/l gegen Stoffmengenanteil MEG bei Atmosphärendruck und CO<sub>2</sub>-Dampfdruck 760 mmHg bei 25 °C<sup>16</sup>



Formel 14 Ostwald-Löslichkeitskoeffizient von CO<sub>2</sub> im System: Ethylenglykol/Wasser bei 25 °C <sup>16</sup>



Formel 15 Einfluss der MEG-Konzentration auf den CO<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizienten wässriger MEG-Lösungen bei 25 °C

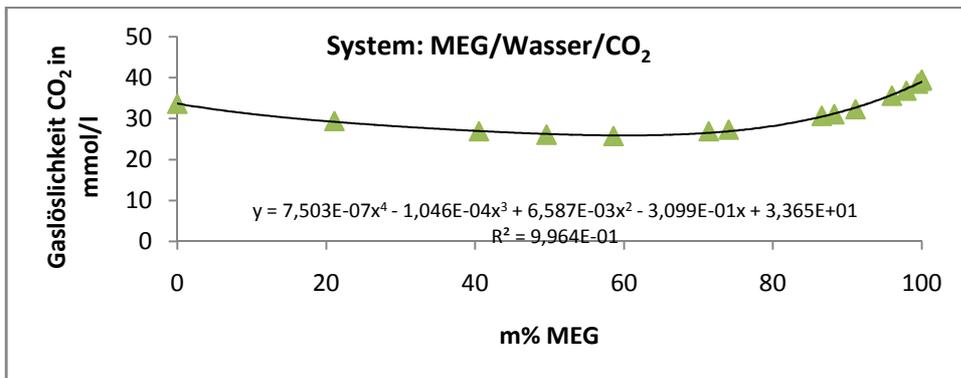


Abbildung 28 CO<sub>2</sub>-Löslichkeit in wässriger Ethylenglykollösung in mmol/l gegen Gewichtsprozent MEG bei Atmosphärendruck und CO<sub>2</sub>-Dampfdruck 760 mmHg bei 25 °C

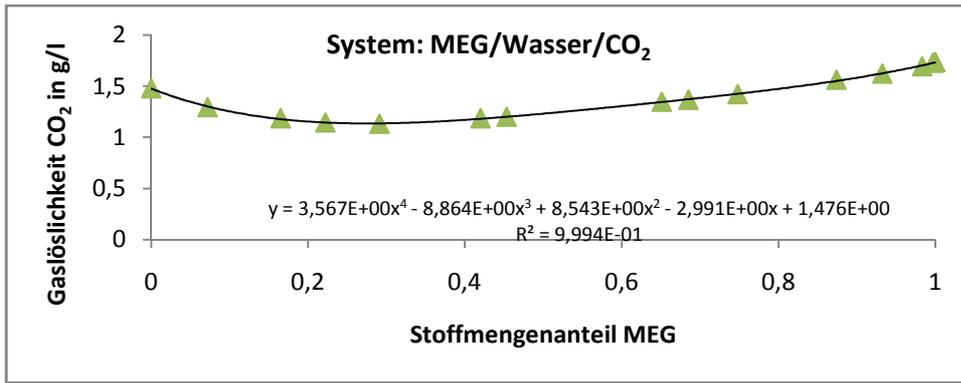
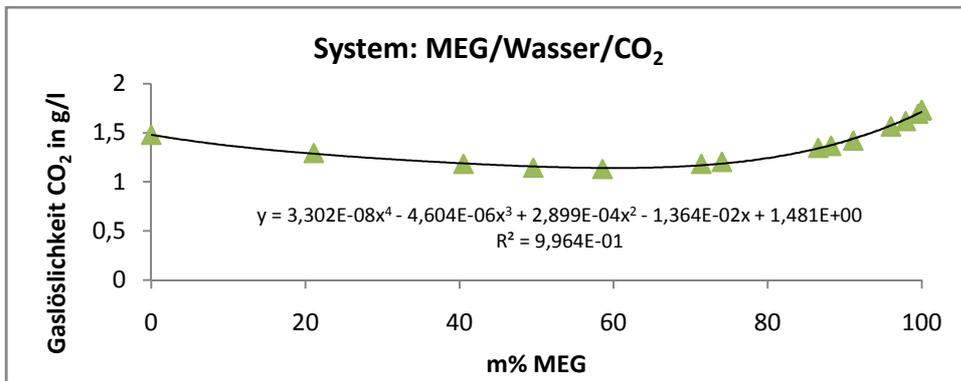


Abbildung 29 CO<sub>2</sub>-Löslichkeit in wässriger Ethylenglykollösung in g/l gegen Stoffmengenanteil MEG bei Atmosphärendruck und CO<sub>2</sub>-Dampfdruck 760 mmHg bei 25 °C



Formel 16 CO<sub>2</sub>-Löslichkeit in wässriger Ethylenglykollösung in g/l gegen Gewichtsprozent MEG bei Atmosphärendruck und CO<sub>2</sub>-Dampfdruck 760 mmHg bei 25 °C

#### 1.4.2 Mischungsenthalpie MEG/Wasser

Die exotherme Mischungsenthalpie für einen Stoffmengenanteil Wasser von 0,65 beträgt bei Normalbedingungen ca. 780 J/mol.

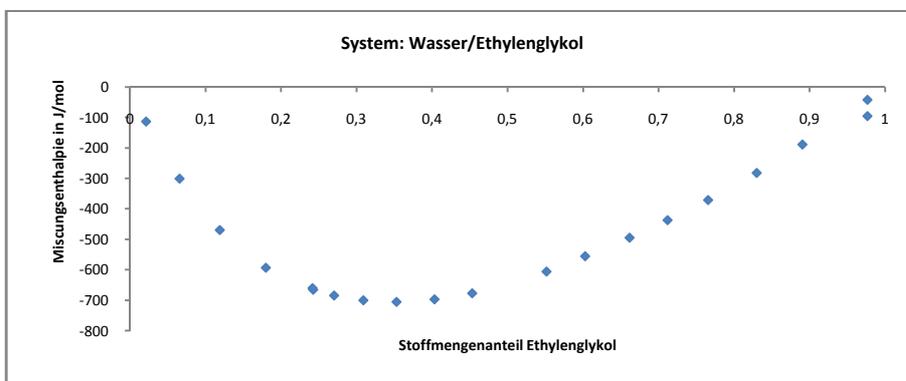


Abbildung 30 Molare Mischungsenthalpie des Systems Wasser/MEG gegen Stoffmengenanteil MEG bei 50 °C bei Atmosphärendruck<sup>17</sup>

Die Mischungskurve läßt sich nach Redlich-Kisker nicht ausreichend durch einen konstanten Koeffizienten beschreiben

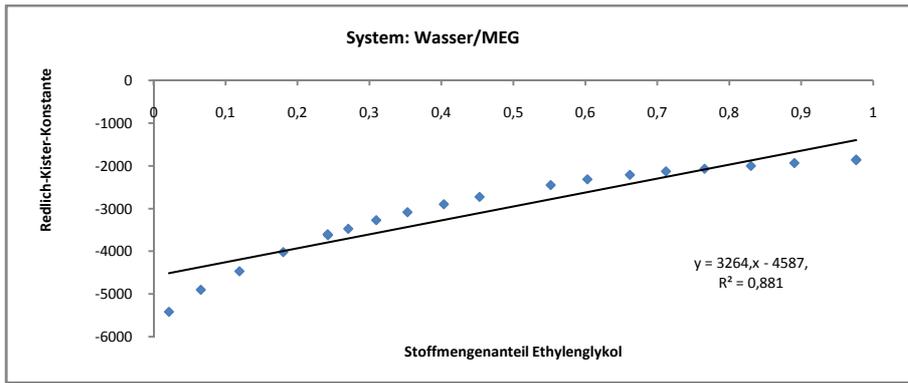


Abbildung 31 Redlich-Kister-Konstanten des Systems Wasser/Ethylenglykol gegen Stoffmengenanteil Ethylenglykol bei 50 °C bei Atmosphärendruck

Für den Vergleich der Literaturdaten mit den experimentell bestimmten Mischungswärmen für PEI800 in Wasser und PEI800 in MEG ist es zweckmäßig die vornehmlich stoffmengenbezogenen Angaben in der Literatur auf massenbezogene Dimensionen umzurechnen. Für binäre Systeme ergibt sich die Umrechnung von Molfraktion  $X$  der(Komponente1) in Gew.%(Komponente1) für  $M_1 = \text{Molmasse(Komponente1)}$  und  $M_2 = \text{Molmasse(Komponente 2)}$  allgemein aus

Formel 17  $\text{Gew.}\% (\text{Komponente1}) = \text{Gew.}\%(1) = G_1 = 100\% / (1 + M_2/M_1 * (1/X_1 - 1))$

Die inverse Umrechnung von Gew.%(Komponente1) in Stoffmengenanteil (Komponente1) für binäre Systeme ergibt sich allgemein aus

Formel 18  $\text{Stoffmengenanteil (Komponente 1)} = X(1) = X_1 = G_1 * M_2 / (-G_1 * M_1 + G_1 * M_2 + 100 * M_1)$

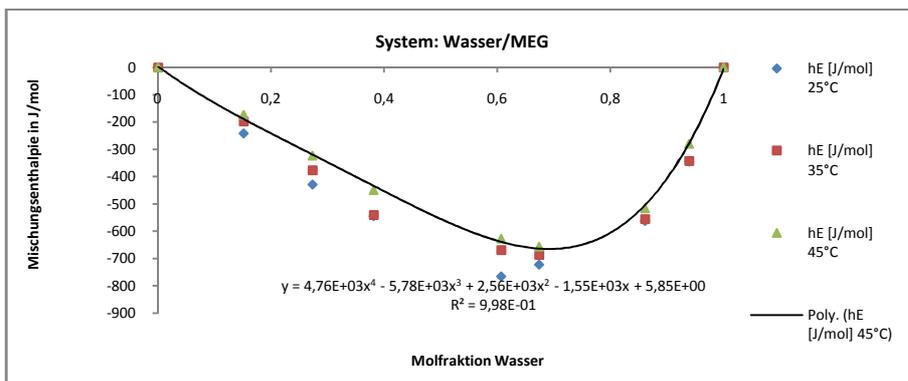


Abbildung 32 Molare Mischungsenthalpie des Systems Wasser/Ethylenglykol gegen Molfraktion Wasser bei 25 °C, 35 °C und 45 °C bei Atmosphärendruck <sup>17</sup>

Die Mischungsenthalpie in J/g ergibt sich für  $M_1=62,07 \text{ g/mol}$ ,  $M_2= 18,015 \text{ g/mol}$  aus der molaren Mischungsenthalpie  $\Delta H_s^\circ$  in [J/mol] nach

Formel 19  $\Delta H_s [\text{J/g}] = \Delta H_s^\circ / (x(1) * M(1) + (1-x(1)) * M(2))$

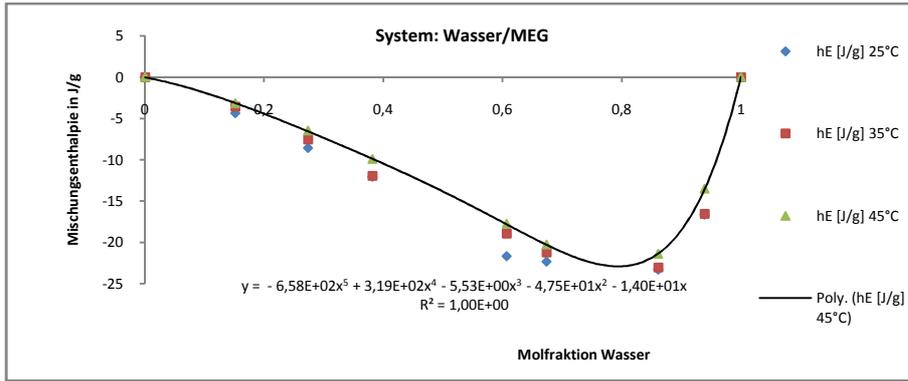


Abbildung 33 Mischungsenthalpie  $\Delta H_s$  des Systems Wasser/Ethylenglykol bei 25 °C, 35 °C und 45 °C gegen Molfraktion Wasser bei Atmosphärendruck

Für technische Anwendungen ist die Dimensionierung der Mischungsenthalpie in J/g bezogen auf den prozentualen Massenanteil der Aminkomponente zweckmäßig.

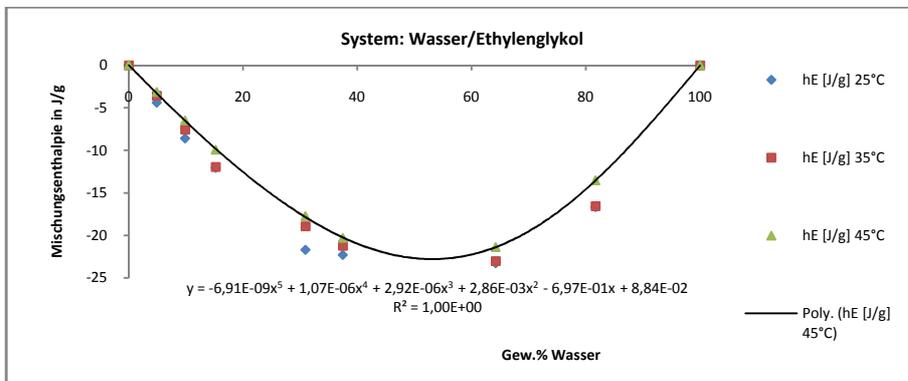


Abbildung 34 Mischungsenthalpie  $\Delta H_s$  des Systems Wasser/Ethylenglykol bei 25 °C, 35 °C und 45 °C gegen Gew.% Wasser bei Atmosphärendruck

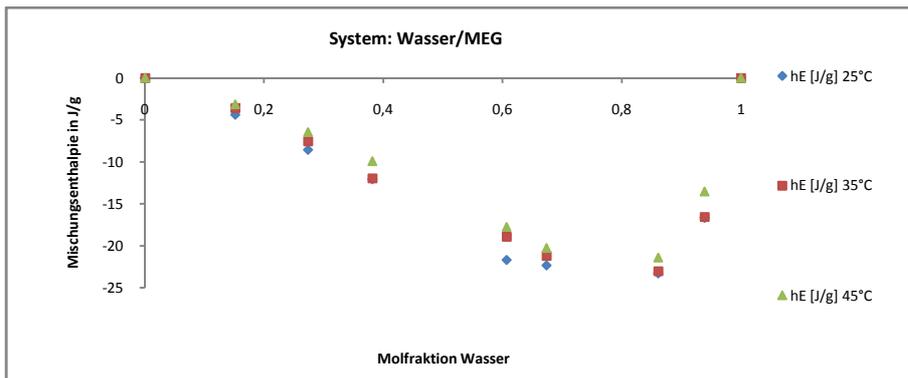


Abbildung 35 Mischungsenthalpie  $\Delta H_s$  des Systems Wasser/MEG bei 25 °C, 35 °C und 45 °C gegen Molfraktion Wasser bei Atmosphärendruck

Die Mischungskurve läßt sich nach Redlich-Kisker nicht ausreichend durch einen konstanten Koeffizienten beschreiben

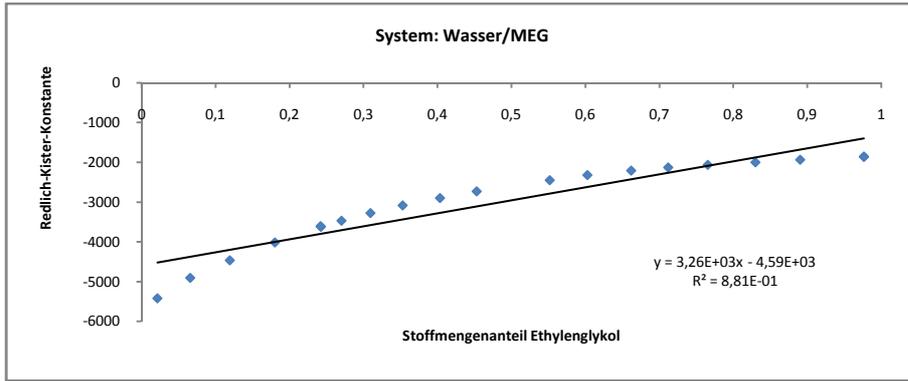


Abbildung 36 Redlich-Kister-Konstanten des Systems Wasser/MEG gegen Stoffmengenanteil MEG bei 50 °C bei Atmosphärendruck

### 1.4.3 Dampf/Flüssigkeits-Gleichgewicht MEG/Wasser

Das thermophysikalische Verhalten beim Erwärmen wässriger MEG-Lösungen ist hervorragend beforscht. Im Vergleich zu den Glykolethern des Selexolverfahrens bildet MEG mit Wasser bei Drücken zwischen 101,33kPa und 3,333 kPa weder Mischungslücken noch Azeotrope und ist auch nicht wasserdampfflüchtig. Die Dortmunder Datenbank beschreibt für das binäre System Wasser/Ethylenglykol Dampf/Flüssig-Gleichgewichte für Drücke von 101,33kPa, 13,332 kPa und 3,333 kPa<sup>18</sup>. /Das System bildet bei Drücken zwischen 101,33kPa und 3,333 kPa kein Azeotrop.

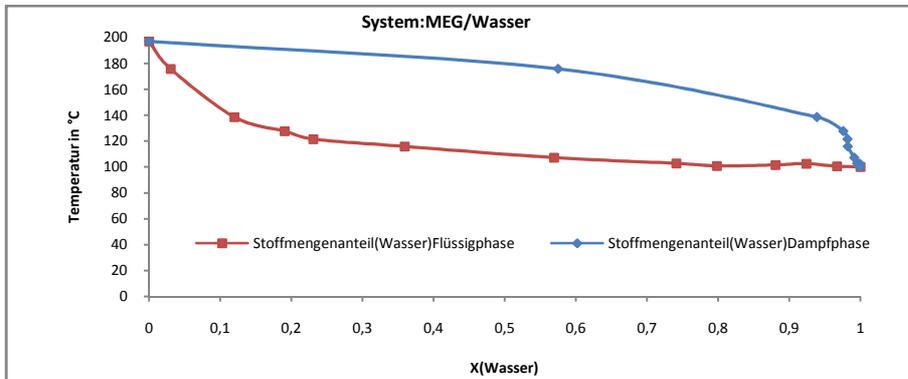


Abbildung 37 Dampf-Flüssig-Gleichgewicht des binären Systems Wasser/MEG bei 101,33 kPa

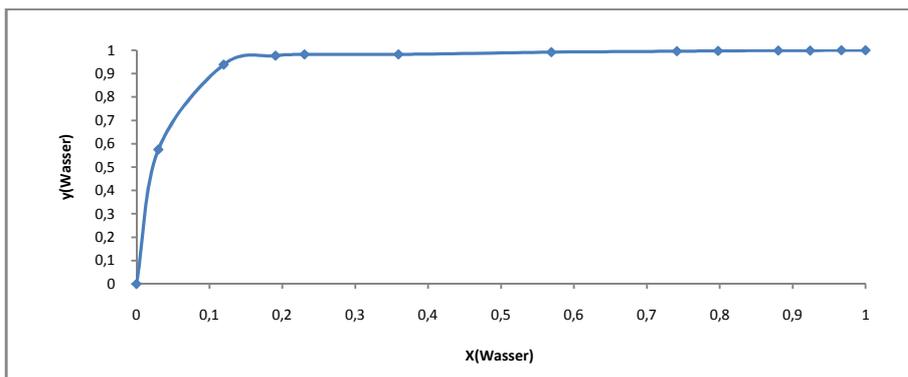


Abbildung 38 Dampf-Flüssig-Gleichgewicht des binären Systems Wasser/MEG bei 101,33 kPa<sup>19</sup>

#### 1.4.4 Wärmeleitfähigkeit und Spezifische Wärmekapazität MEG/Wasser

Bei Raumbedingungen nehmen Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Wasser/MEG-Mischungen mit zunehmendem Massenanteil MEG annähernd linear ab. Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazitäten von Mischungen aus Wasser und Etylenglykol lassen sich für begrenzte Temperaturintervalle durch Addition der partiellen Wärmeleitfähigkeiten bzw. der spezifischen Wärmekapazitäten der Einzelkomponenten mit ausreichender Genauigkeit berechnen<sup>20</sup>.

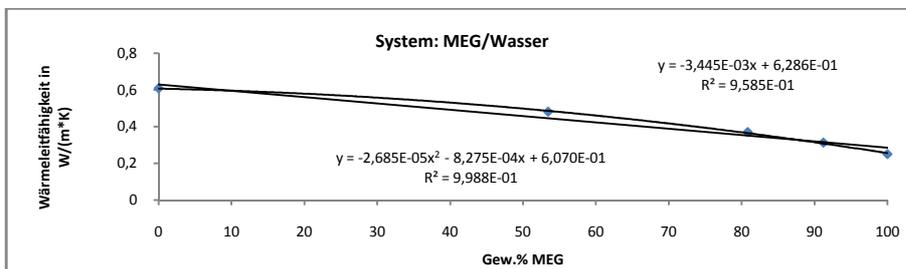


Abbildung 39 Einfluss der MEG-Konzentration auf die Wärmeleitfähigkeit wässriger MEG-Lösungen bei 25 °C<sup>21</sup>

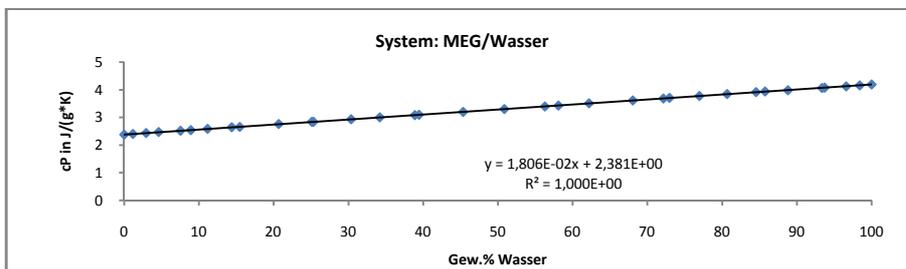


Abbildung 40 Einfluss des prozentualen Massenanteils Wasser auf die spezifische Wärmekapazität wässriger MEG-Lösungen bei 25 °C

Mathematisch läßt sich die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität von der prozentualen Zusammensetzung des Systems Wasser/Ethylenglykol bei 25 °C durch lineare Funktionen mit Regressionsgraden  $> 0,999$  hinreichend korrelieren.

#### 1.4.5 Dichte MEG/Wasser

Die Dichte von Wasser/MEG-Mischungen nimmt mit zunehmendem Massenanteil MEG annähernd linear zu. Die Dichten für Mischungen aus Wasser und MEG lassen sich für begrenzte Temperaturintervalle durch Addition der partiellen Dichten der Einzelkomponenten mit hinreichender Genauigkeit berechnen.

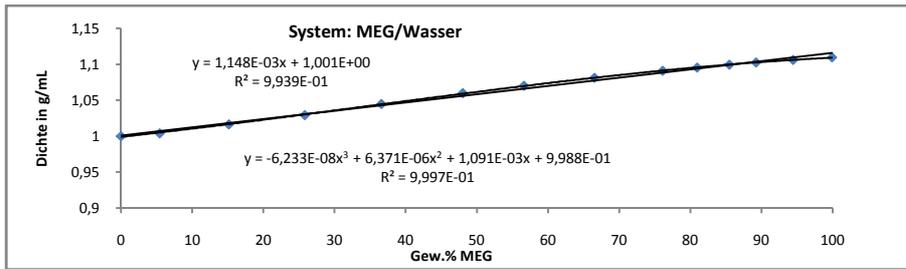


Abbildung 41 Einfluss der MEG-Konzentration auf die Dichte des Systems wässriger MEG-Lösungen<sup>22</sup>

Mathematisch läßt sich der Verlauf der Dichte für 25 °C mit zunehmenden Massenanteil MEG durch eine lineare Funktion mit Bestimmtheitsmaß  $R > 0,994$  hinreichend und durch ein Polynom 2.Grades mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,9996$  sehr gut korrelieren.

#### 1.4.6 Viskosimetrische Untersuchung MEG/Wasser

Die kinematische Viskosität von MEG/Wasser-Mischungen nimmt bei 25 °C mit zunehmendem Massenanteil MEG progressiv zu.

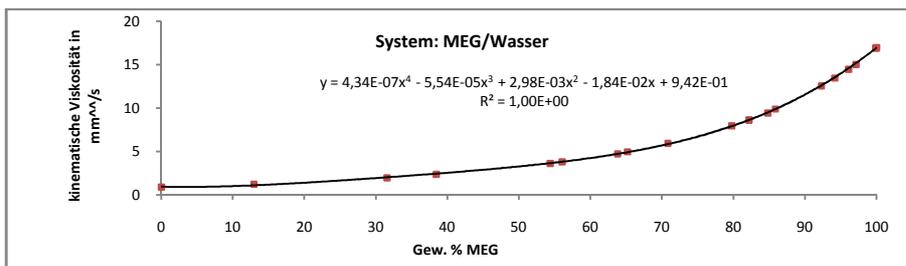


Abbildung 42 Einfluss der MEG-Konzentration auf die kinematische Viskosität wässriger MEG-Lösungen bei 25 °C

Mathematisch läßt sich der Verlauf der kinematischen Viskosität bei 25 °C mit zunehmenden Massenanteil MEG durch eine polynomische Funktion 2.Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,996$  gut, durch eine polynomische Funktion 4.Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,999$  sehr gut korrelieren. Für definierte MEG/Wasser-Mischungen nimmt die kinematische Viskosität mit zunehmender Temperatur degressiv ab. Die definierten Mischungen gehorchen der Gesetzmäßigkeit nach Andrade.

#### 1.4.7 Refraktometrische Untersuchung MEG/Wasser

Der Brechungsindex von MEG in Wasser nimmt unter isothermen Bedingungen mit zunehmendem Massenanteil MEG annähernd linear zu. Die Brechungsindizes für Mischungen aus Wasser und MEG lassen sich für begrenzte Temperaturintervalle durch

Addition der partiellen Brechungsindizes der Einzelkomponenten mit hinreichender Genauigkeit berechnen

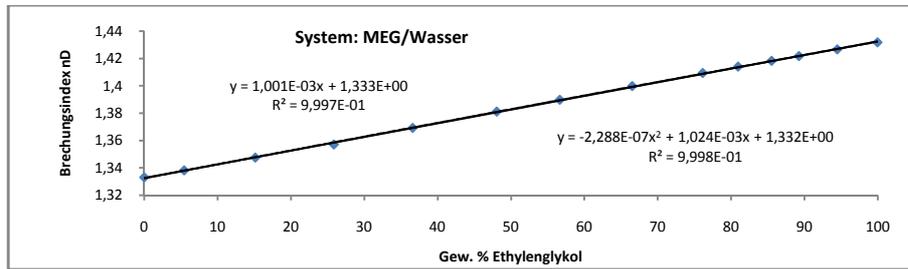


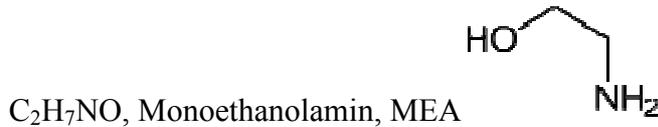
Abbildung 43 Brechungsindizes des Systems: MEG/Wasser bei 25 °C 22

Mathematisch läßt sich der Verlauf des Brechungsindizes bei RT mit zunehmendem Massenanteil MEG durch lineare Regression mit Bestimmtheitsmaß  $> 0,999$  sehr gut korrelieren.



## 1.5 Das Reaktionssystem Monoethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.5.1 Daten, Spezifikation, Daten



Monoethanolamin, MEA, ist eine farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit ammoniakalischem Geruch, die in allen Verhältnissen mit Wasser mischbar ist. Wässrige Lösungen des primären Amins sind alkalisch und formal 1-fach protonierbar. MEA ist ein starkes Nucleophil (rel. Amin N-Gehalt = 0,23, CAS-Nummer 141-43-5, Molare Masse 61,08 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 1,02 g·cm<sup>-3</sup> (20 °C), Schmelztemperatur 10 °C, Siedetemperatur 172 °C (103kPa), Dampfdruck 0,5 hPa (20 °C), 1,452–1,456 (20 °C), pKs 9,5).

MEA ist die Standardabsorberkomponente in technischen CO<sub>2</sub>-Wäschern auf Basis wässriger Aminlösungen. MEA ist bei Raumbedingungen eine farblose, ölige Flüssigkeit mit ammoniakalischen Geruch die mit Wasser in allen verhältnissen mischbar ist.. Die einwertige Base, oder besser das monoprotonierte MEA als konjugierte Säure, hat einen pKs-Wert von 9,5 d.h. bei pH 9,5 stellt sich ein Äquivalentverhältnis von monoprotonierter Base zu freier Base von ca. 50:50 ein. Bei der Behandlung mit CO<sub>2</sub> in wässriger Lösung reagiert MEA zunächst praktisch vollständig zum MEA-Ammonium-Carbamat. Formal bilden sich aus 2 Äquivalenten Base und einem Äquivalent CO<sub>2</sub> dabei 2 Äquivalente Elektrolyt. Mit zunehmendem CO<sub>2</sub>-Umsatz steigt die elektrische Leitfähigkeit somit linear an. Mit sinkendem pH-Wert, d.h. sinkender Basizität und natürlich auch sinkender Nukleophilie wird das gebildete MEA-Ammonium-Carbamat zunehmend hydrolysiert und reagiert bei pH<8,3 mit weiterem CO<sub>2</sub> ausschließlich zu MEA-Ammonium-Hydrogencarbonat. Formal bilden sich dann aus 2 Äquivalenten Elektrolyt, einem Äquivalent CO<sub>2</sub> und 2 Äquivalenten Wasser dabei 4 Äquivalente Elektrolyt. Die elektrische Leitfähigkeit steigt dann also mit zunehmendem CO<sub>2</sub>-Umsatz mit größerer Steigung weiter linear an. Der erzielbare Umsatz im offenen System bei Raumbedingungen ist sowohl durch den pKs-Wert des Protolysegleichgewichts von MEA als auch des „Carbonat/Hydrogencarbonat/“freie Kohlensäure“ Gleichgewichts bestimmt. Mit einem pKs-Wert für „Kohlensäure“ oder besser für das in Wasser gelöste CO<sub>2</sub> von 6,5 stellt sich bei pH 6,5 ein HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/(CO<sub>2</sub>+Wasser)-Äquivalentverhältnis von ca. 50:50 ein, d.h. es wird der gleiche Stoffmengenanteil Hydrogencarbonat in „freie Kohlensäure“ umgewandelt wie „freie Kohlensäure“ in Hydrogencarbonat. Während bei 8,3 der maximale Anteil Hydrogencarbonat vorliegt, stellt sich schon bei pH 7,5 ein HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>//CO<sub>2</sub>+Wasser)-Äquivalentverhältnis von ca. 96:4 ein, d.h. in offenen wässrigen Systemen wird bei pH-

Werten  $< 7,5$  aus gebildetem Hydrogencarbonat  $\text{CO}_2$  freigesetzt. Berücksichtigt man den pKs-Wert 9,5 für die konjugierte Säure der einfach protonierten Base MEA, läßt sich leicht aufzeigen, dass für den Bereich von pH 9,5 bis pH 7,5 das Protolysegleichgewicht von MEA praktisch fast vollständig auf der Seite der monoprotonierten Base liegt. Daraus folgt, dass die Base MEA bei der Behandlung mit  $\text{CO}_2$  in wässriger Lösung unter isobaren Bedingungen bei Raumbedingungen und ca. 1 bar  $\text{CO}_2$ -Dampfdruck bis zur Gleichgewichtseinstellung praktisch stöchiometrisch bis zum Molverhältnis 1/1 mit  $\text{CO}_2$  reagieren kann. Dieser Sachverhalt wird experimentell bestätigt

**Tabelle 2** Eigenschaften von Monoethanolamin(NIST-Datenbank)

Eigenschaften	Monoethanolamin MEA
CAS-Nummer	141-43-5
EG-Nummer	205-483-3
REACH- Registriernummer	01-2119486455-28
Summenformel	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$
Relatives C/H/N/O-Massenverhältnis	24/7/14/16
Relativer Amin-Gehalt	0,23
Molmasse	$61,08 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Verbrennungsenthalpie	
Brechungsindex $n_D$ (20 °C)	1,452–1,456 (20 °C),
Dichte (20 °C)	$1,02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (20 °C), 3
Oberflächenspannung	72,74 mN/m
Schmelzpunkt (P=1013hPa)	10 °C
Schmelzenthalpie	333,5 kJ/kg (0 °C), 6,01 kJ/mol
Siedepunkt (P=1013hPa)	172 ° (103kPa),
Dampfdruck (20 °C)	0,5 hPa (20 °C),
Verdampfungsenthalpie (T = 100 °C)	2257 kJ/kg , 40,8 kJ/mol
Spezifische Wärmekapazität (20 °C,; 0,1 MPa))	
Wärmeleitfähigkeit (20 °C, 0,1 MPa))	0,598 W/(m*K)
$\Delta_f H^\circ(\text{s})$	-291,80 kJ/mol
$\Delta_f H^\circ(\text{l})$	-285,83 kJ/mol
$\Delta_f H^\circ(\text{g})$	-241,83 kJ/mol
Hansen Löslichkeitsparameter	$d_D = 15,5$ , $d_P = 16$ , $d_H = 42,3$
Prandtl-Zahl (20 °C)	ca. 7,1

### 1.5.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit MEA

GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



Gefahr

H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 302, 312, 332, 314, 335, 412 und P: 261, 273, 301+312, 330, 303+361+353, 304+340+310, 305+351+338

EU-Gefahrstoffkennzeichnung



Ätzend (C)

R- und S-Sätze

R: 20/21/22, 34 und S: (1/2), 26, 36/37/39, 45

1.5.3 Thermoanalytische Untersuchung von MEA und MEA -Carbamat

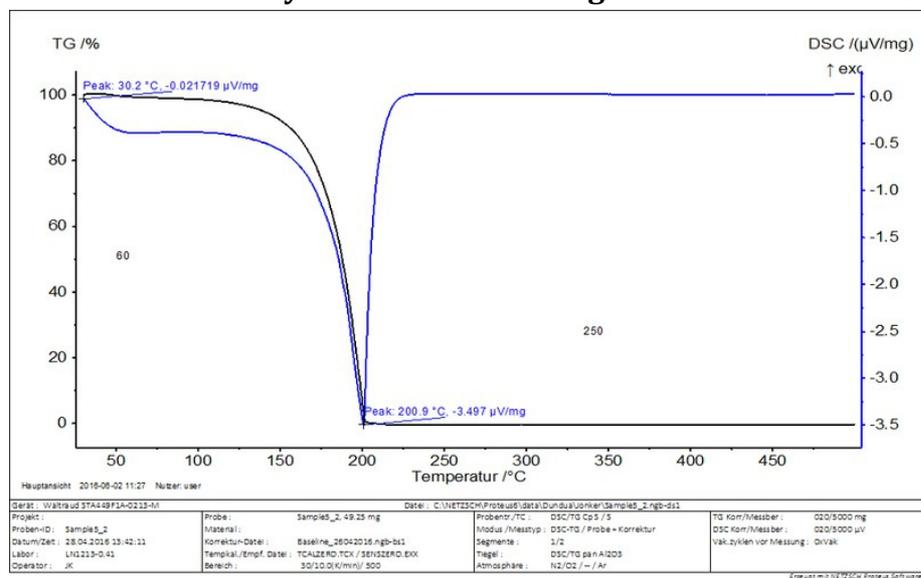


Abbildung 44 TGA und DSC von MEA

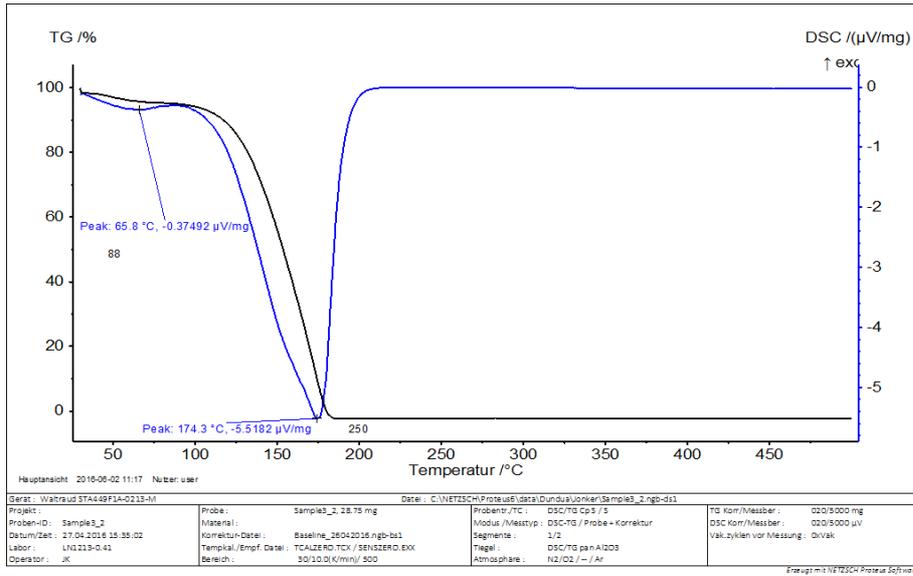


Abbildung 45 TGA und DSC von 30m%iger MEA-Lösung in Wasser

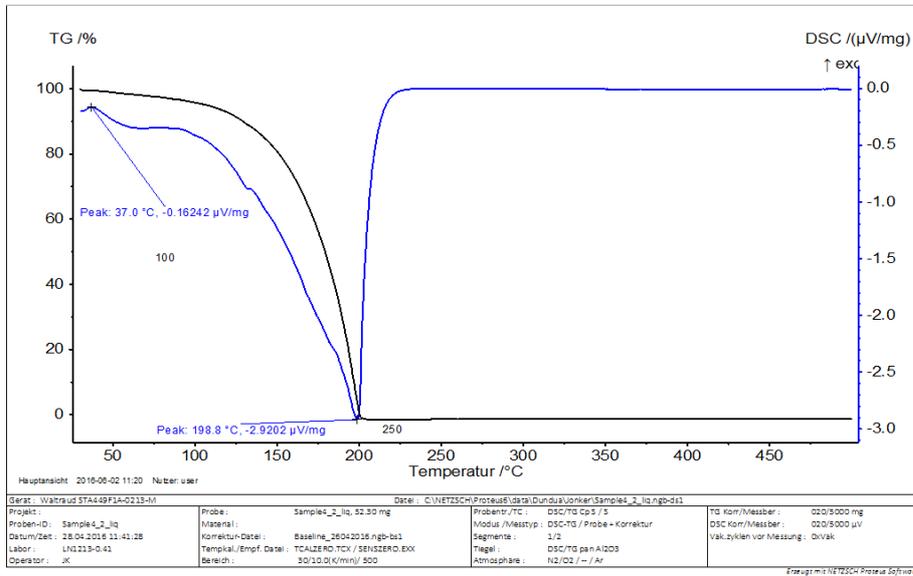


Abbildung 46 TGA und DSC von MEA-Carbamat

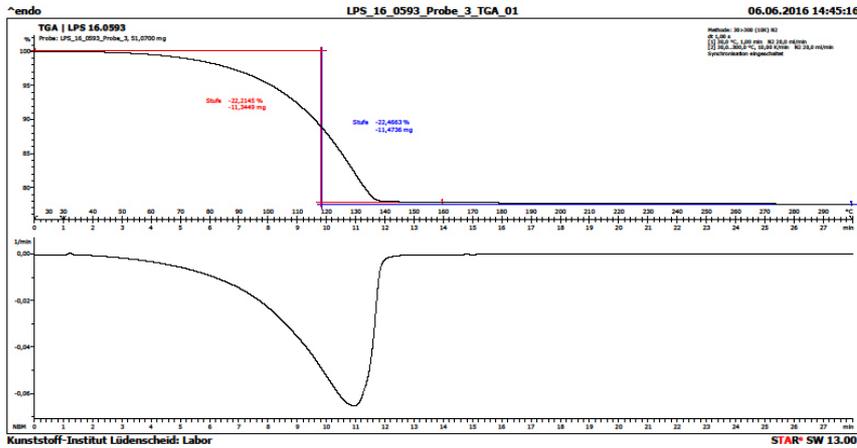


Abbildung 47 TGA und DSC einer 30 m%igen MEA-Lösung in Wasser

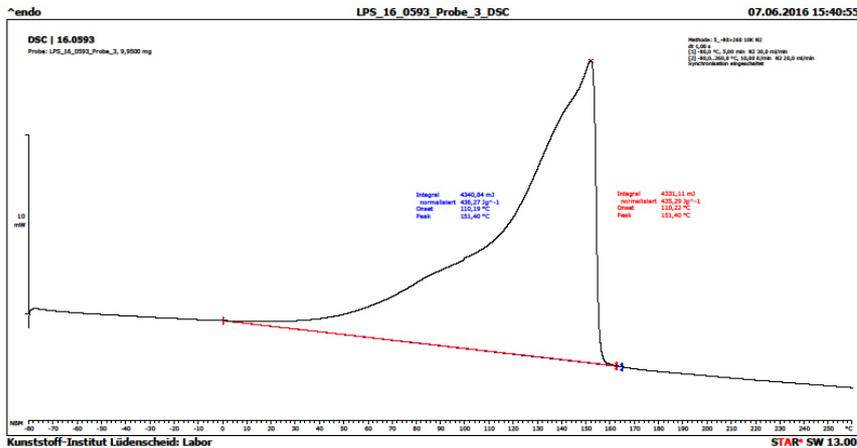


Abbildung 48 DSC einer 30 m%igen MEA-Lösung in Wasser

### 1.5.4 Infrarotspektrometrische Untersuchung

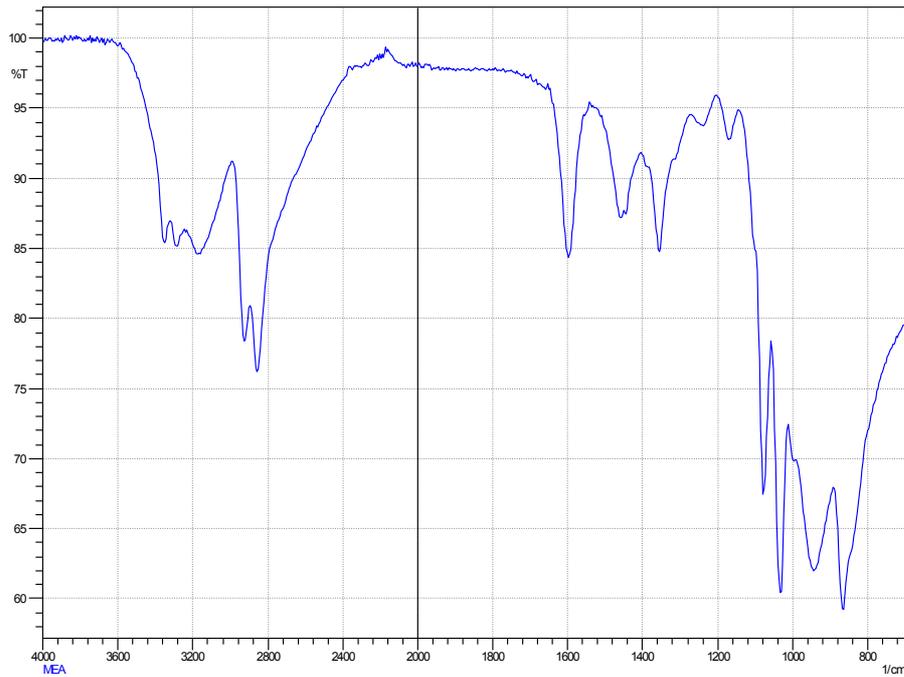


Abbildung 49 FT-MIR-ATR Spektrum von MEA

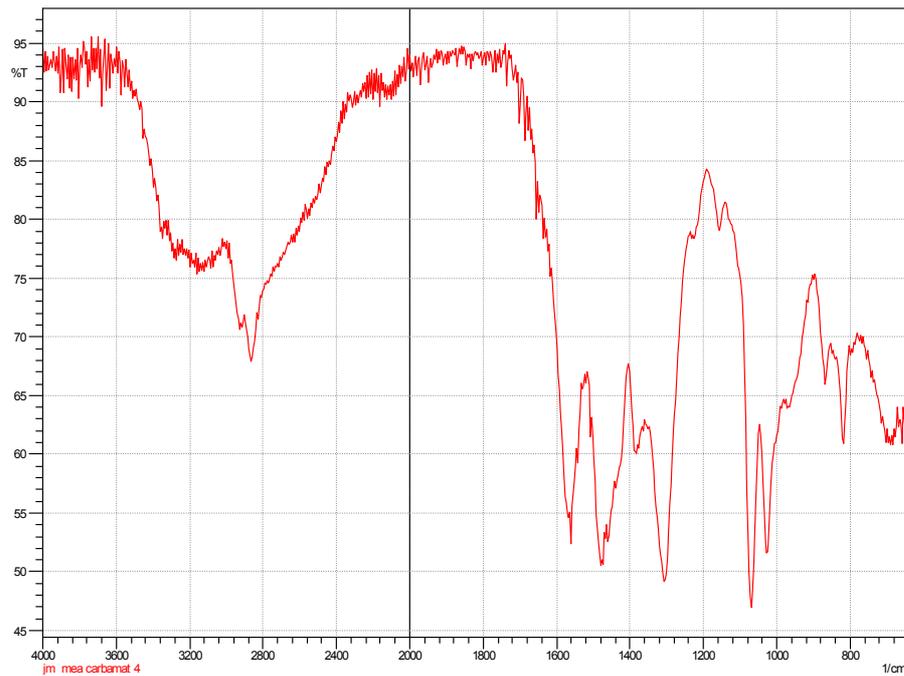


Abbildung 50 FT-MIR-ATR Spektrum MEA-Carbamat

### 1.5.5 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MEA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 0,642 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt für eine Äquivalentwertigkeit von 0,983 einen pKa-Wert für MEA bei 25 °C von 9,7.

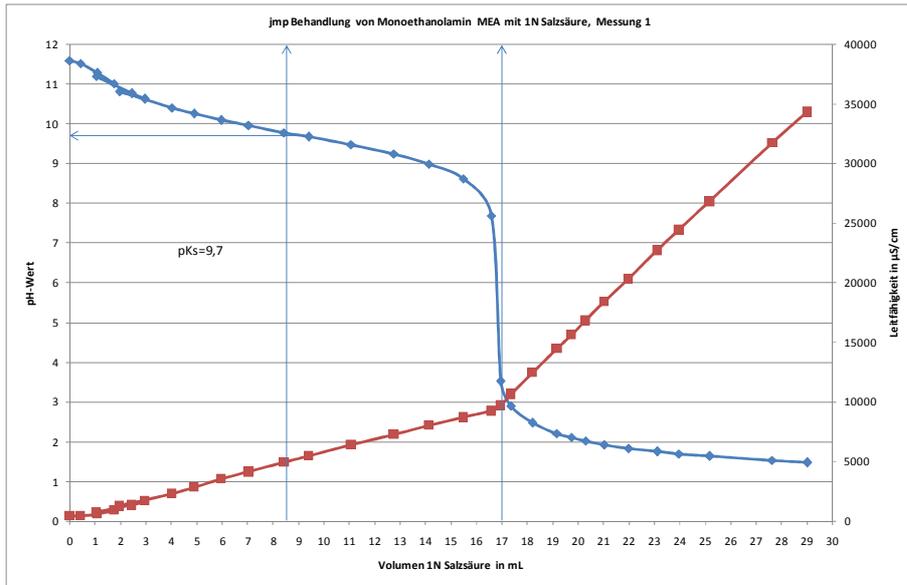


Abbildung 51 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,038g MEA in 250 mL Wasser mit 1N-Salzsäure bei 25 °C

### 1.5.6 Mischungsenthalpie

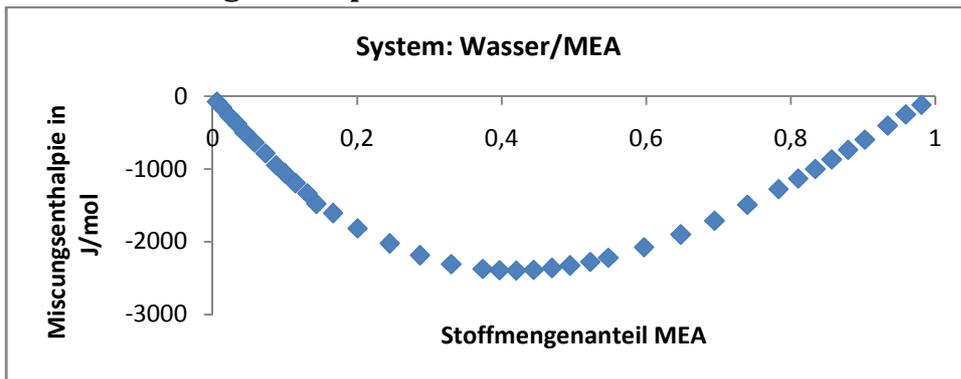


Abbildung 52 Mischungsenthalpie des Systems MEA/Wasser in J/mol

Das System MEA/Wasser lässt sich nach Redlich Kister nicht durch einen konstanten Koeffizienten ausreichend beschreiben

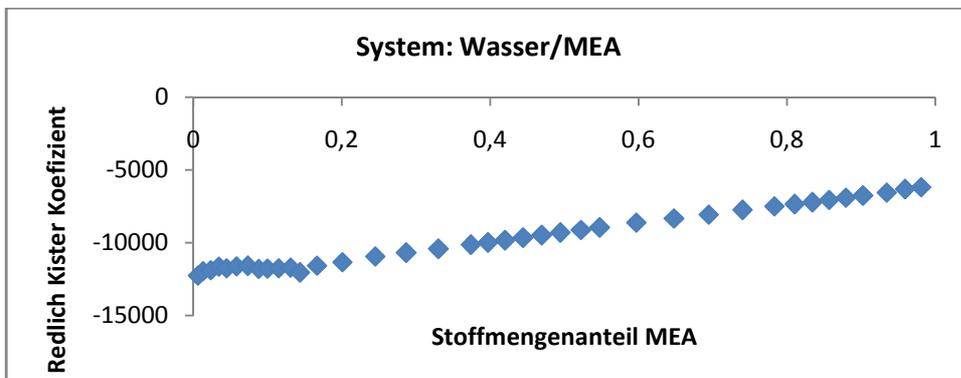


Abbildung 53 Mischungsenthalpie des Systems MEA/Wasser, Auftragung nach Redlich Kister

Formel 20  $\Delta H_s \text{ [J/g]} = \Delta H_s^0 / (x(1) \cdot M(1) + (1-x(1)) \cdot M(2))$

Formel 21  $\text{Gew. \% (Komponente 1)} = \text{Gew. \% (1)} = G_1 = 100\% / (1 + M_2/M_1 \cdot (1/X_1 - 1))$

Formel 22  $\text{Stoffmengenanteil (Komponente 1)} = X(1) = X_1 = G_1 \cdot M_2 / (-G_1 \cdot M_1 + G_1 \cdot M_2 + 100 \cdot M_1)$

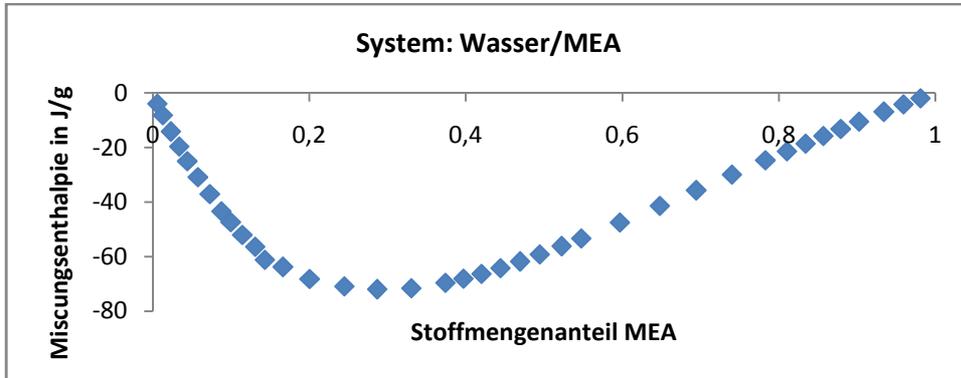


Abbildung 54 Mischungsenthalpie des Systems Monoethanolamin/Wasser in J/g bezogen auf den Stoffmengenanteil MEA

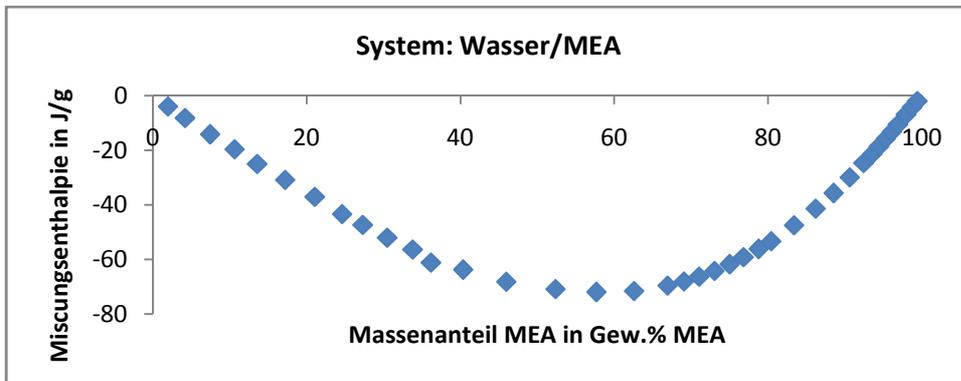


Abbildung 55 Mischungsenthalpie des Systems Monoethanolamin/Wasser in J/g bezogen auf den Massenanteil MEA

### 1.5.7 Viskosität von MEA

Für definierte Temperaturen nimmt die dynamische und kinematische Viskosität von MEA/Wasser-Mischungen mit zunehmender MEA-Konzentration zunächst bis zu einem Maximum bei ca. 90 m% Amin zu und dann wieder ab. Bildet man für definierte Temperaturen die Viskosität gegen die Zusammensetzung ab, ergeben sich asymmetrische Parabelbögen mit einem Maximum. Die Graphen lassen sich mathematisch durch Polynomabschnitte 4. und 5. Ordnung mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,998$  gut beschreiben. Da für MEA-Konzentrationen zwischen ca. 85 und 100 m% einer Viskosität zwei unterschiedliche Viskositätswerte zugeordnet werden können, ist die Viskosität somit als robuste Messgröße für die experimentellen Studien nur bedingt geeignet. Eine eindeutige Korrelation der Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung bei konst.

Temperaturen zwischen 25 und 80 °C ist nur für Gemische mit Amingehalten bis 85 m% möglich.

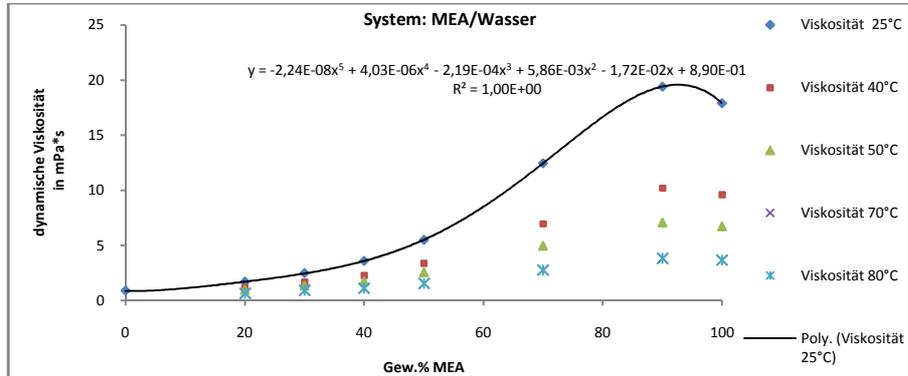


Abbildung 56 Einfluss der Zusammensetzung auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen für Temperaturen zwischen 25 und 80 °C

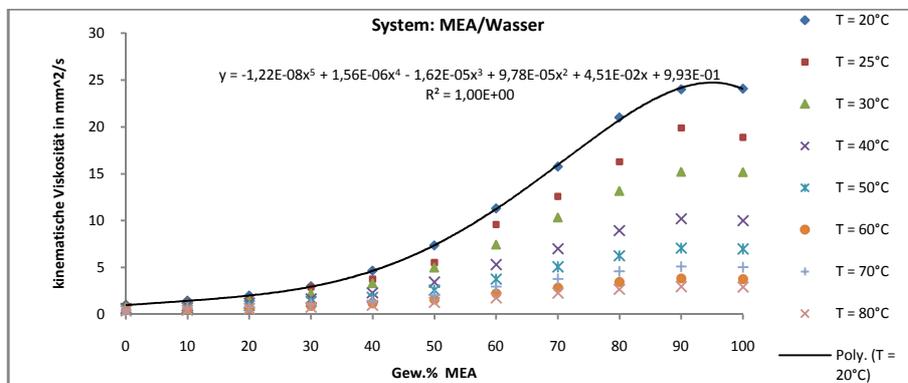


Abbildung 57 Einfluss der Zusammensetzung auf die kinematische Viskosität wässriger MEA-Lösungen für Temperaturen zwischen 20 und 80 °C

Behandelt man definierte wässrige MEA-Lösungen mit CO<sub>2</sub> nimmt die kinematische Viskosität unter isothermen Bedingungen für Temperaturen zwischen 25 und 80 °C mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Aufnahme progressiv zu. Mathematisch läßt sich der Verlauf der Viskosität gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme für eine definierte Temperatur durch eine Exponentialfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,993$  bedingt, durch ein Polynom 3.Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,996$  hinreichend beschreiben. Bildet man für eine definierte Zusammensetzung und definierte Temperatur die kinematische Viskosität logarithmisch gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme graphisch ab, ergibt sich ein annähernd linearer Verlauf des Graphen.

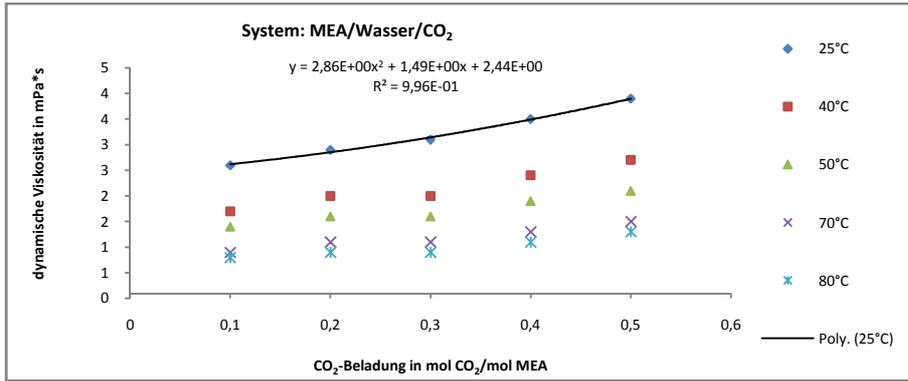


Abbildung 58 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die kinematische Viskosität bei der Behandlung einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung unter isothermen Bedingungen mit CO<sub>2</sub> bei Temperaturen zwischen 25 °C und 80 °C

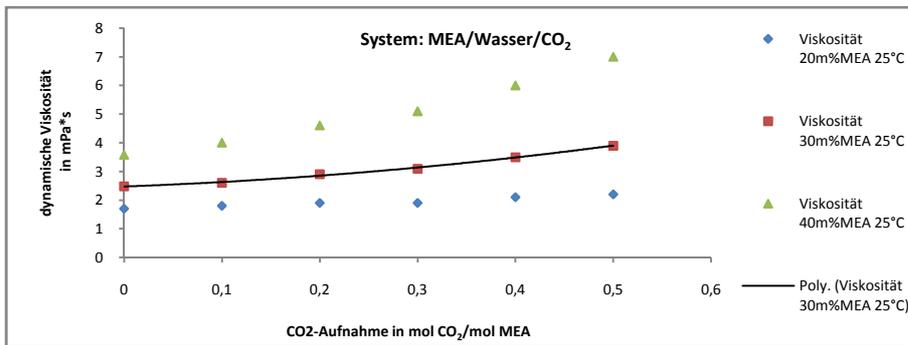


Abbildung 59 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die dynamische Viskosität bei der Behandlung 20%iger, 30m%iger und 40m%iger wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

Mathematisch läßt sich der Verlauf der Viskosität gegen die Temperatur für eine definierte Zusammensetzung durch Exponentialfunktionen mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,992$  hinreichend, durch ein Polynome mindestens 3.Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,999$  gut beschreiben. Die kinematische Viskosität von MEA, definierten wässrigen MEA-Lösungen und definierten Reaktionsmischungen aus diesen mit CO<sub>2</sub> nimmt von 10 bis 90 °C mit zunehmender Temperatur degressiv ab.

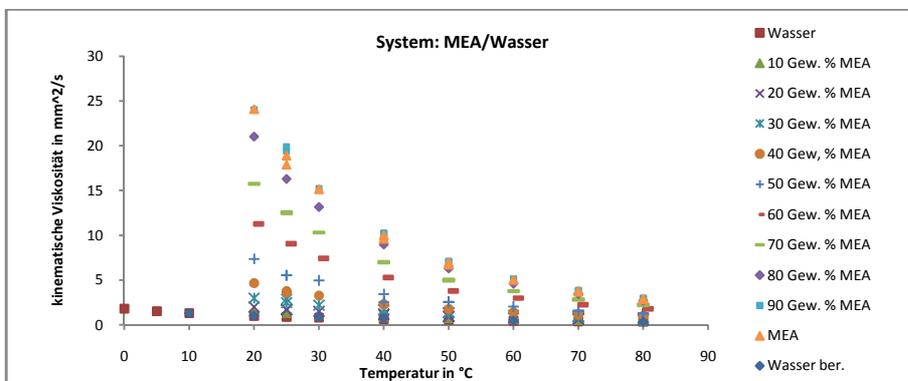


Abbildung 60 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität definierter wässriger MEA-Lösungen mit Konzentrationen zwischen 0 und 100 Gew.% MEA<sup>23</sup>

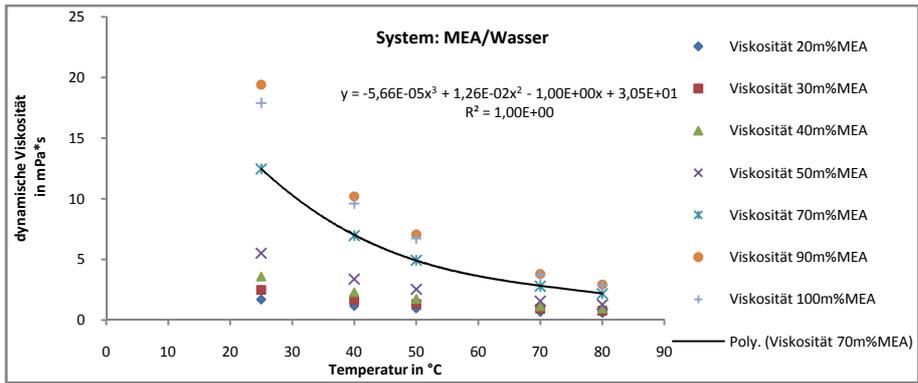


Abbildung 61 Einfluss der Temperatur auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen

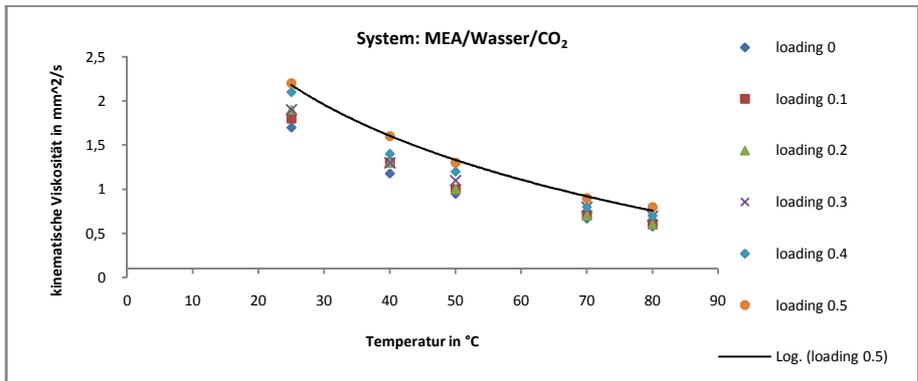


Abbildung 62 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität 20 m%iger wässriger MEA-Lösung mit definierten CO<sub>2</sub>-Beladungsraten zwischen 0 und 0,4 mol CO<sub>2</sub>/mol MEA) <sup>23</sup>

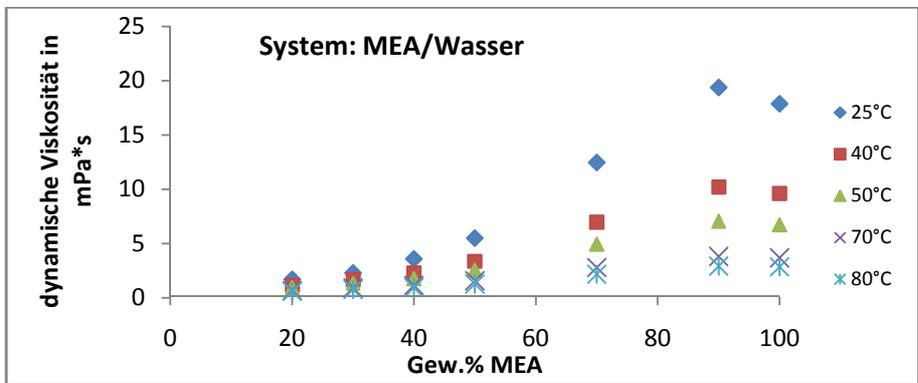


Abbildung 63 Einfluss der MEA-Konzentration auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen bei Temperaturen zwischen 25 und 80 °C

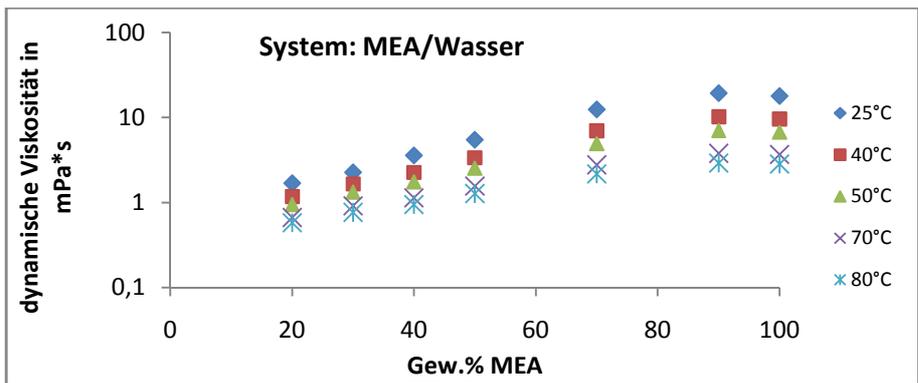


Abbildung 64 Einfluss des Massenanteils MEA auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen bei Temperaturen zwischen 25 und 80 °C

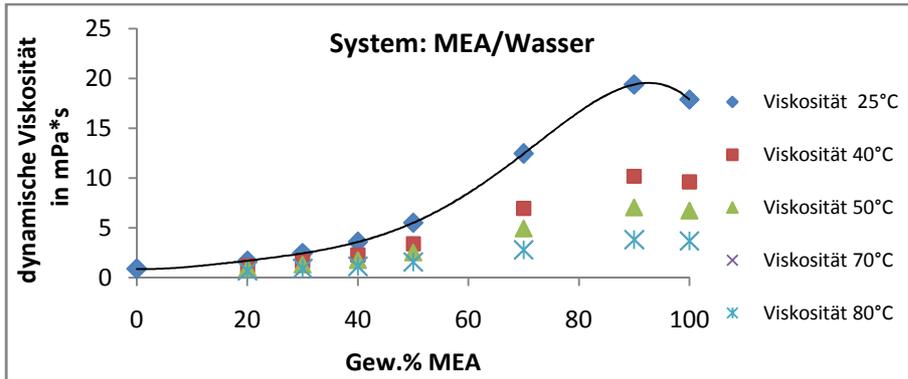


Abbildung 65 Einfluss des Massenanteils MEA auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen bei Temperaturen zwischen 25 und 80 °C

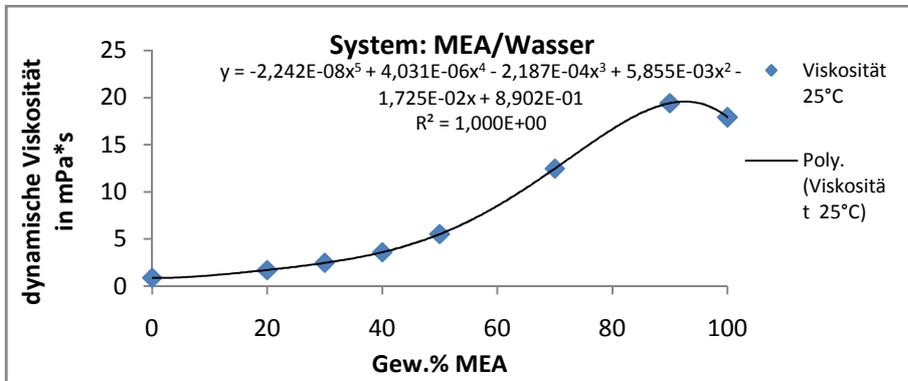


Abbildung 66 Einfluss des Massenanteils MEA auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

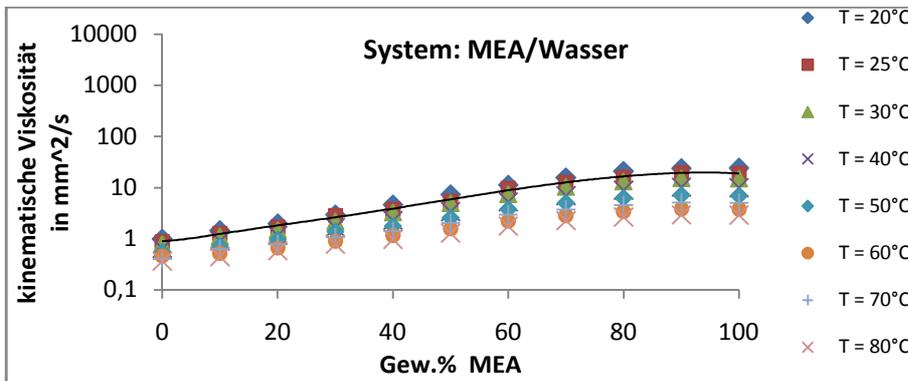


Abbildung 67 Einfluss der Zusammensetzung auf die kinematische Viskosität wässriger MEA-Lösungen für Temperaturen zwischen 20 und 80 °C für konstante Temperaturen

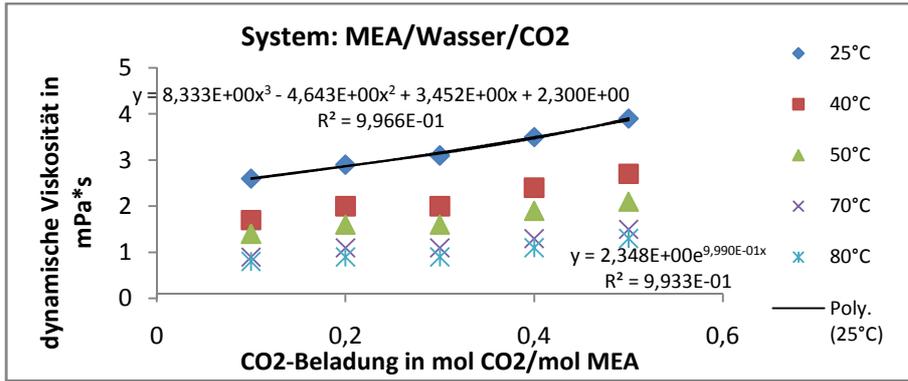


Abbildung 68 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die kinematische Viskosität bei der Behandlung einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung unter isothermen Bedingungen mit CO<sub>2</sub> bei Temperaturen zwischen 25 °C und 80 °C

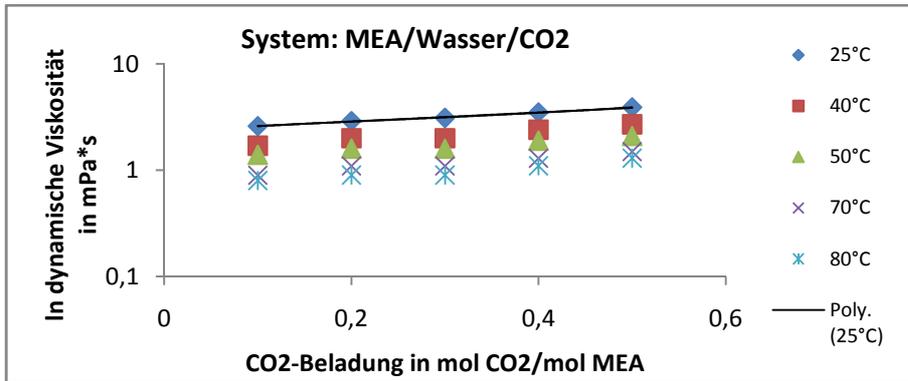


Abbildung 69 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die kinematische Viskosität bei der Behandlung 30m%iger Amin-Lösungen unter isothermen Bedingungen mit CO<sub>2</sub> für Temperaturen zwischen 25 und 80 °C

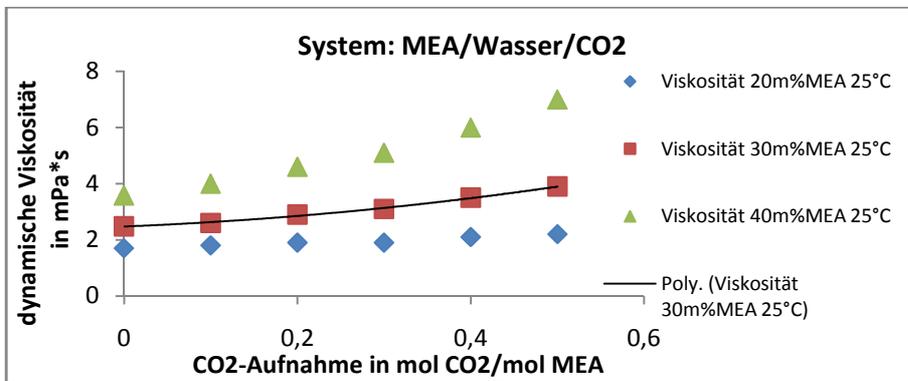
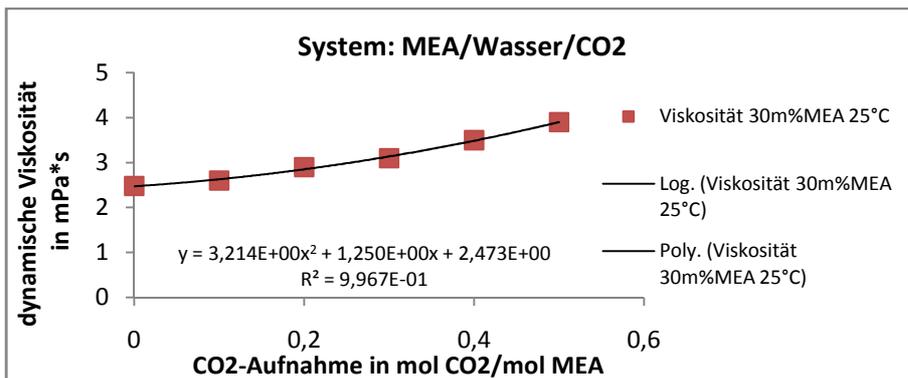


Abbildung 70 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die dynamische Viskosität wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

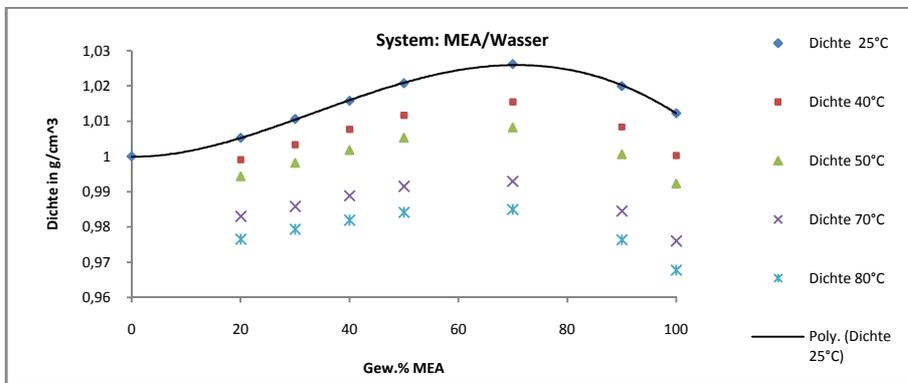


**Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die dynamische Viskosität einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung bei 25 °C**

Mathematisch läßt sich der Verlauf der dynamischen und kinematischen Viskosität von MEA, definierten wässrigen MEA-Lösungen und definierten Reaktionsmischungen aus diesen mit CO<sub>2</sub> für Temperaturen zwischen RT und 80 °C mit zunehmender Temperatur durch Polynomapproximation mindestens 3.ten Grades mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,999$  gut korrelieren. Interessant auch die ausgezeichnete Korrelation nach Andrade mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,996$  für die Linearität der graphischen Auftragung des Logarithmus der kinematischen Viskosität gegen den Kehrwert der Temperatur.

**1.5.8 Dichte wässriger MEA-Lösungen**

Die Dichte wässriger MEA-Lösungen nimmt unter isothermen Bedingungen mit zunehmender MEA-Konzentration zunächst bis zu einem Maximum bei ca. 90m% Amin zu und dann wieder ab. Bildet man für eine definierte Temperatur die Dichte gegen die Zusammensetzung graphisch ab, ergibt sich ein asymmetrischer Parabelbogen mit Maximum, der sich mathematisch durch Polynome 3. und 4.Ordnung mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,998$  hinreichend beschreiben läßt.



**Abbildung 71 Einfluss des Massenanteils MEA auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen**

Damit können selbst unter isothermen Bedingungen gemessenen Dichten zwei unterschiedlichen Stoffmengenanteilen bzw. Massenanteilen MEA zugeordnet werden. Vergleichbar mit der Viskosität ist auch die Dichte somit für eine eindeutige Korrelation der Zusammensetzung als robuste Messgröße für die experimentellen Studien nur bedingt geeignet.

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Dichte definierter MEA-Lösungen annähernd linear ab. Mathematisch läßt sich der Verlauf der Dichte gegen die Temperatur für eine definierte

Zusammensetzung durch ein Polynom 1. Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,999$  gut beschreiben.

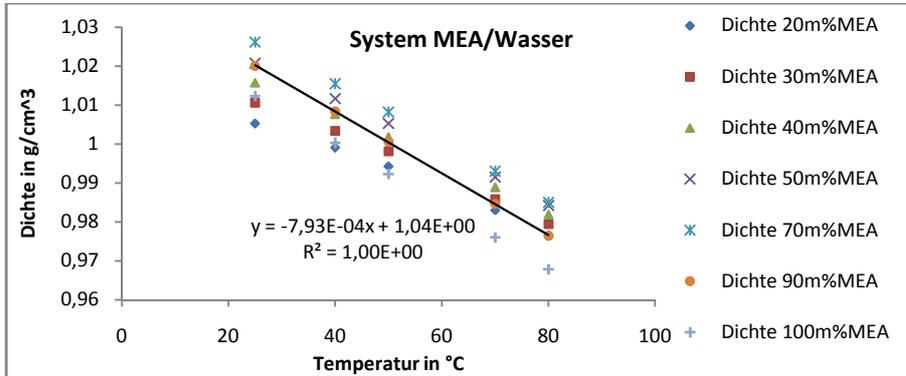


Abbildung 72 Einfluss der Temperatur auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

Behandelt man definierte wässrige MEA-Lösungen bei 25 °C mit  $\text{CO}_2$ , nimmt die Dichte mit zunehmender  $\text{CO}_2$ -Aufnahme zu. Mathematisch läßt sich der Verlauf der Dichte gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme für eine definierte Zusammensetzung durch ein Polynom 2. Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß  $R > 0,999$  gut beschreiben.

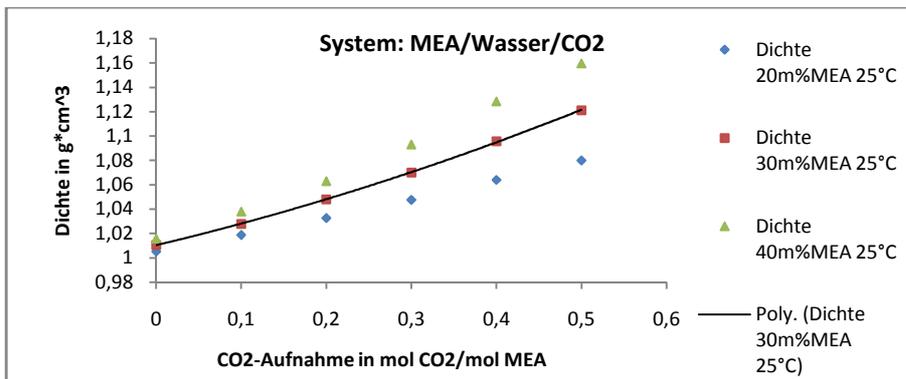


Abbildung 73 Einfluss der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

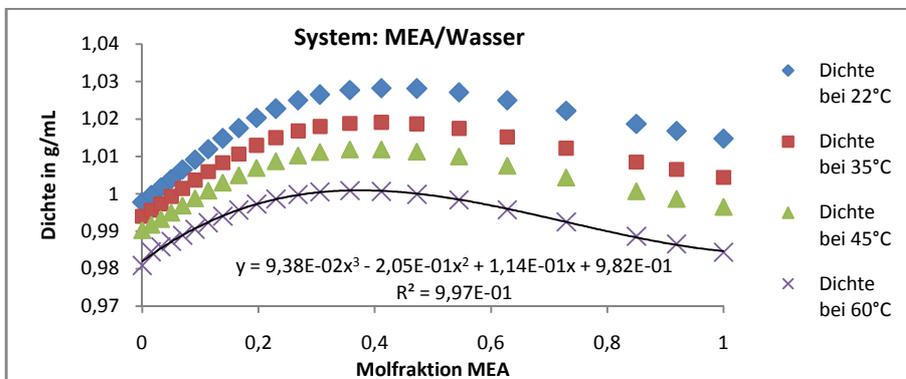


Abbildung 74 Einfluss des Stoffmengenanteil MEA auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen

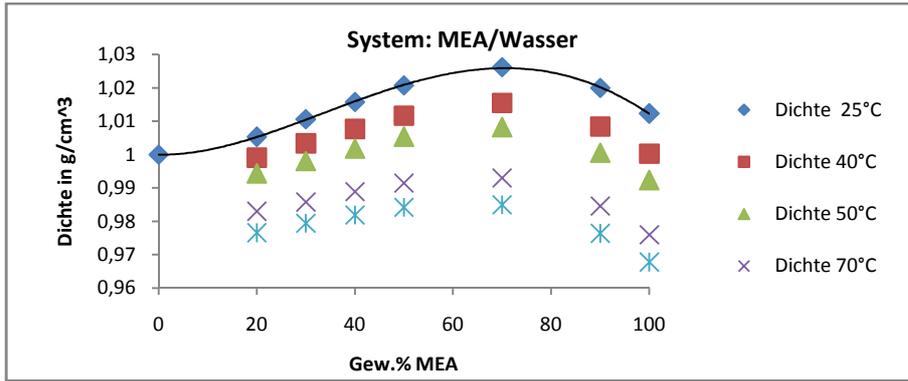


Abbildung 75 Einfluss des Massenanteils MEA auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen

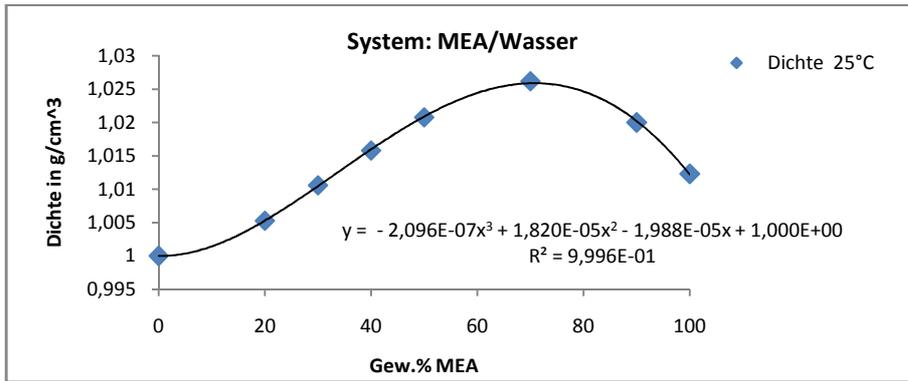


Abbildung 76 Einfluss des Massenanteils MEA auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

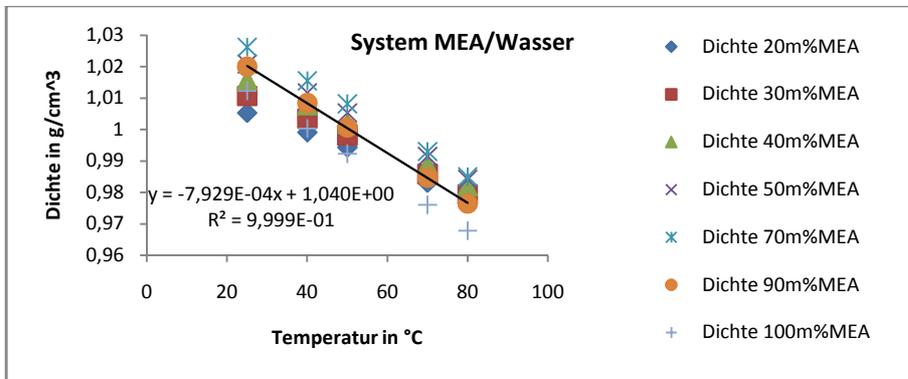


Abbildung 77 Einfluss der Temperatur auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C

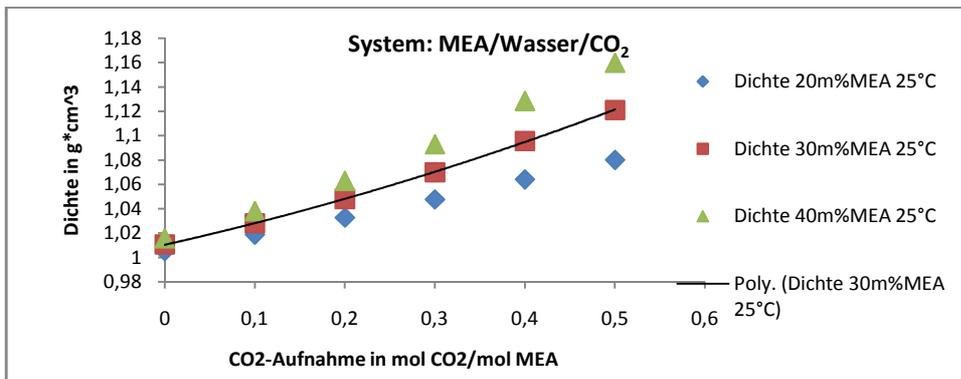
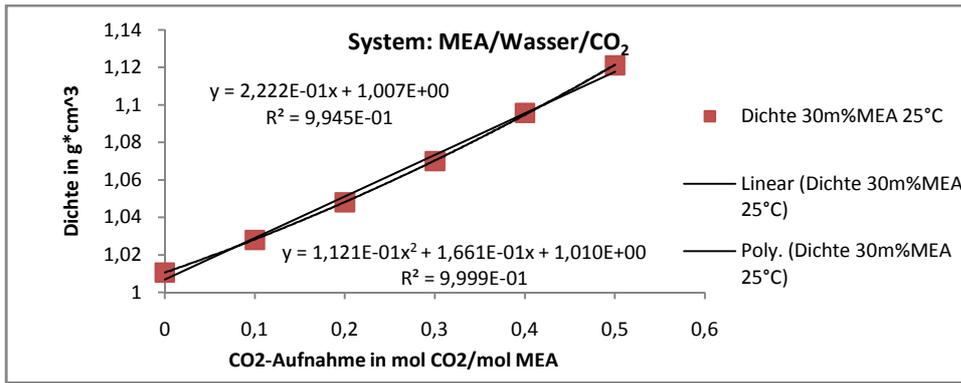


Abbildung 78 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Aufnahme auf die Dichte wässriger MEA-Lösungen bei 25 °C



### 1.5.9 Brechungsindex wässriger MEA-Lösungen

Der Brechungsindex von MEA in Wasser nimmt unter isothermen Bedingungen mit zunehmendem Stoffmengenanteil MEA degressiv zu zu.

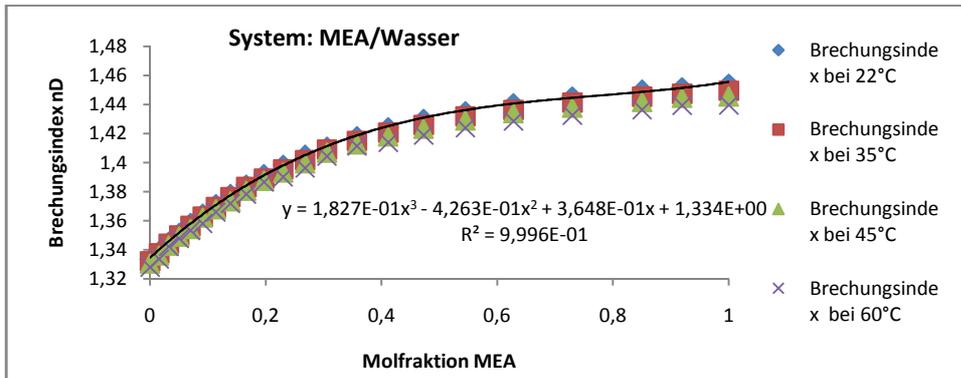
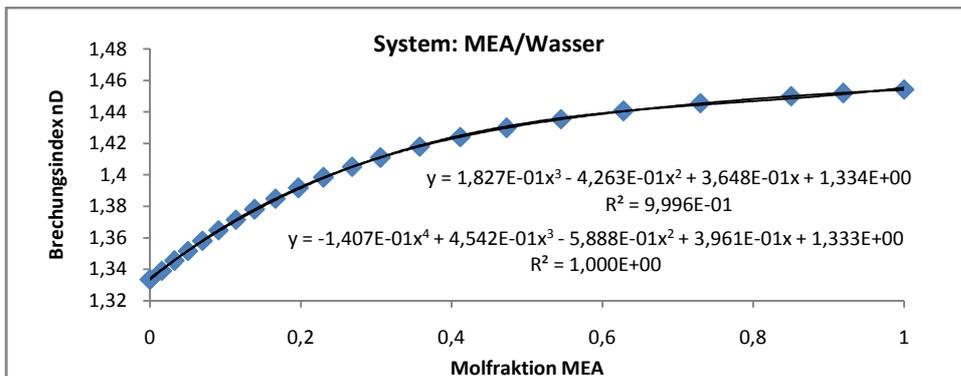


Abbildung 79 Brechungsindizes des Systems: Monoethanolamin/Wasser für Temperaturen zwischen 22 °C und 60 °C

Mathematisch läßt sich der Verlauf des Brechungsindizes mit zunehmendem Stoffmengenanteil MEA für Temperaturen von 22 °C, 35 °C, 45 °C und 60 °C durch Polynomapproximation 3.ter Ordnung mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,999$  sehr gut, korrelieren.



### 1.5.10 Wärmekapazität von MEA

Daten für die spezifische Wärmekapazität und die Verdampfungsenthalpie von MEA sind der Herstellerbroschüre „Ethanolamines“ der Fa. DOW-Chemicals<sup>24</sup> entnommen

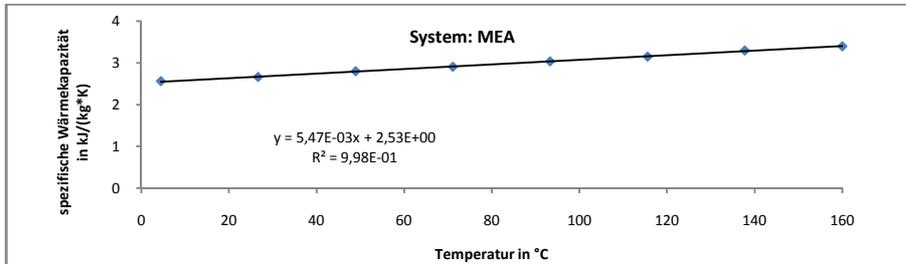


Abbildung 80 Verlauf der spezifischen Wärmekapazität gegen die Temperatur für MEA

### 1.5.11 Verdampfungsenthalpie von MEA

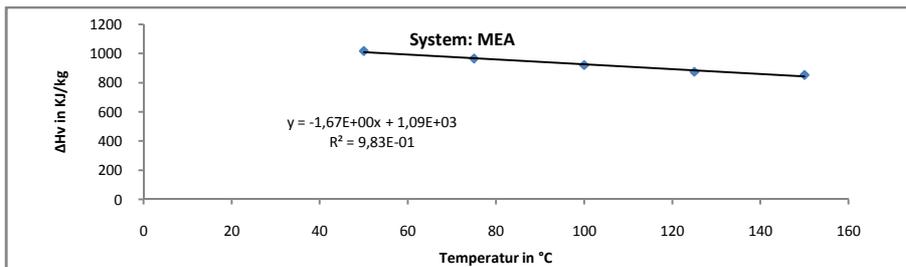


Abbildung 81 Verlauf der Verdampfungsenthalpie gegen die Temperatur für MEA

### 1.5.12 Dampf/Flüssig-Gleichgewicht des Systems MEA/Wasser

Für das binäre System Wasser/Monoethanolamin sind in der Dortmundur Datenbank Dampf/Flüssig-Gleichgewichte für Drücke von 101,33 kPa, 13,332 kPa und 3,333 kPa<sup>18</sup> beschrieben. Das System bildet bei Drücken zwischen 101,33 kPa und 3,333 kPa kein Azeotrop.

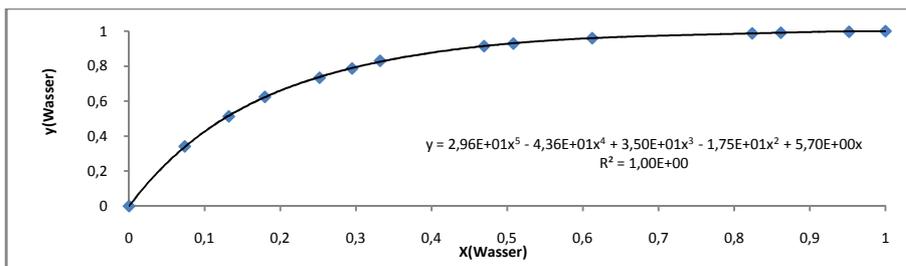


Abbildung 82 Y/X Dampf/Flüssig-Diagramm für Wasser/MEA bei 101,33 kPa<sup>25</sup>

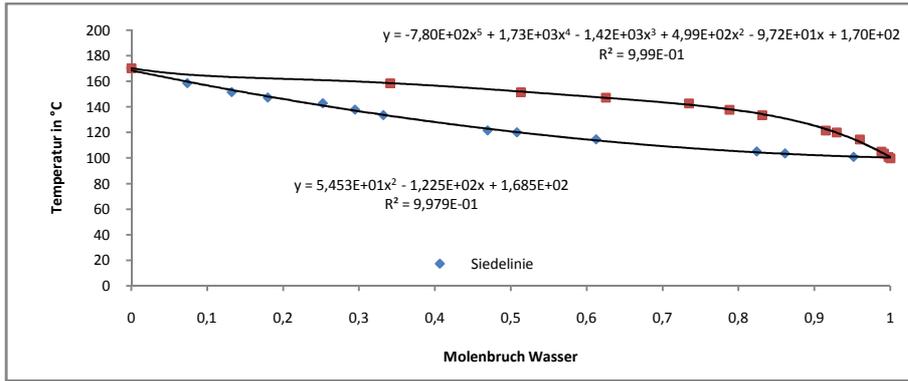


Abbildung 83 T/X Diagramm für Wasser/MEA bei 101,33 kPa <sup>25</sup>

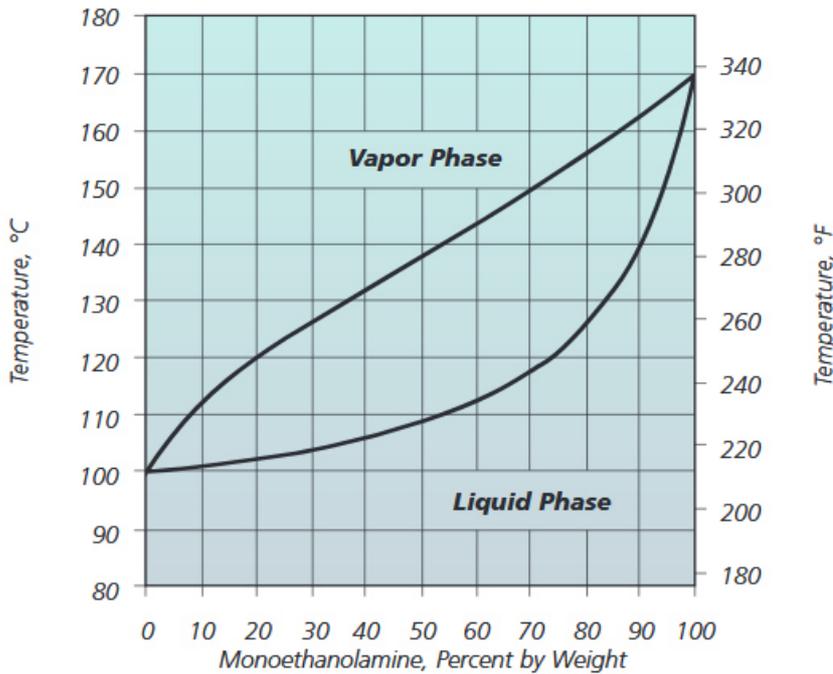


Abbildung 84 T/X Diagramm für Wasser/MEA bei 101,33 kPa <sup>24</sup>

### 1.5.13 Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 4,65m%ige MEA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,3 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,3 behandelt

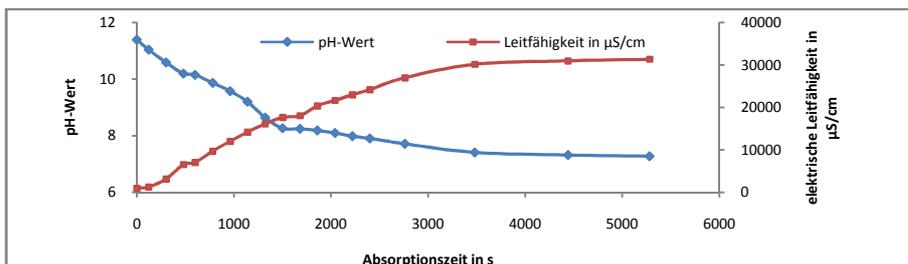


Abbildung 85 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Normalbedingungen

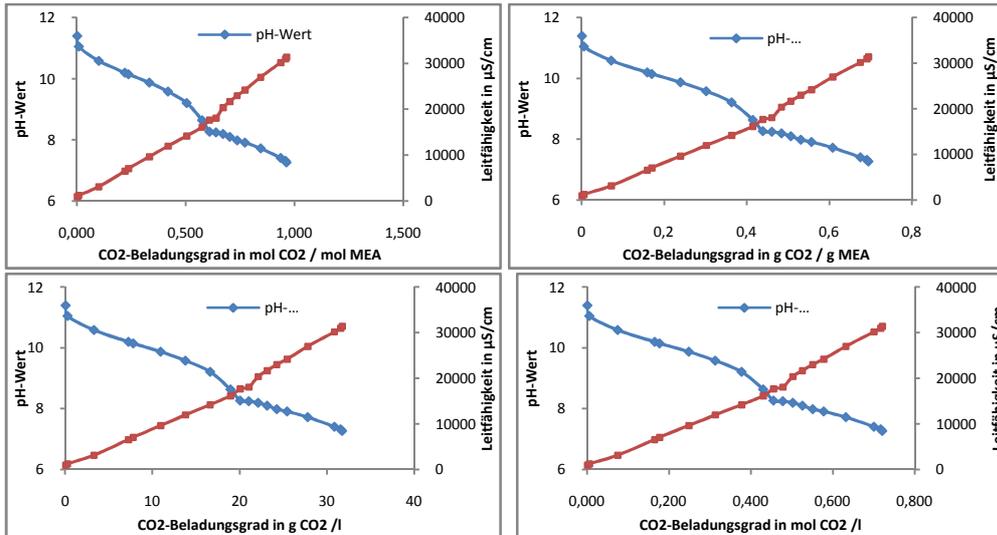


Abbildung 86 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Normalbedingungen

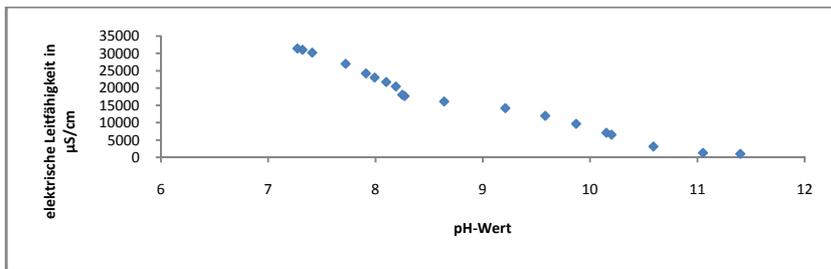


Abbildung 87 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

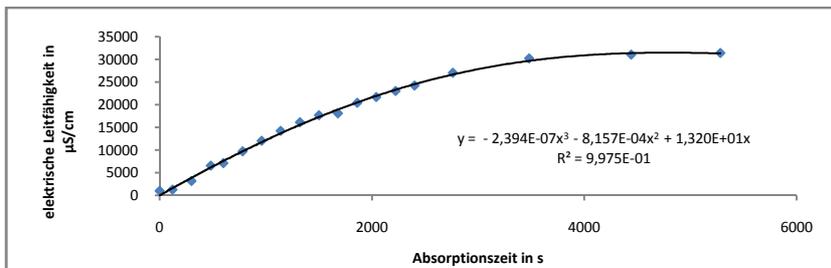


Abbildung 88 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

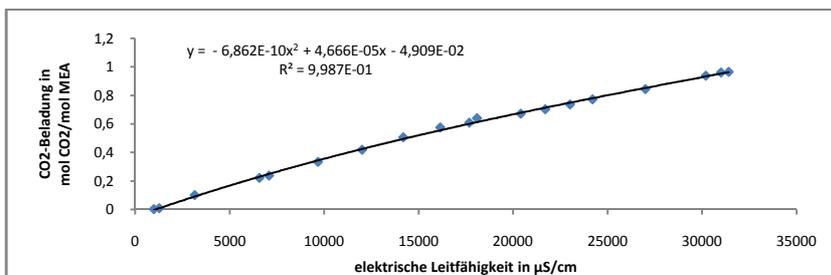


Abbildung 89 Korrelation CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

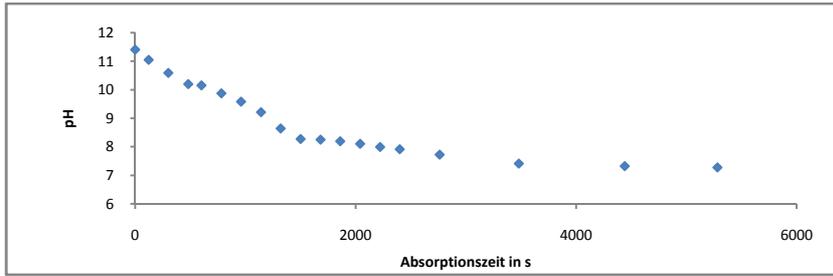


Abbildung 90 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

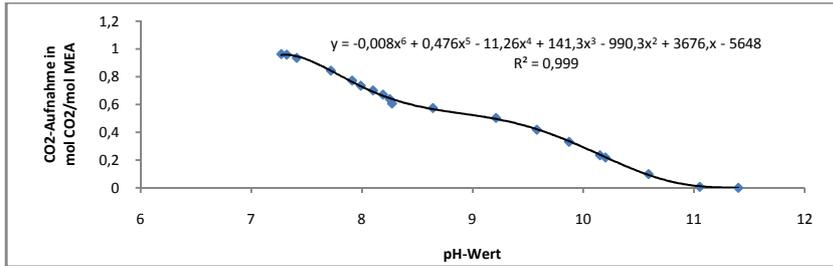


Abbildung 91 Korrelation CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEA gegen den pH bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

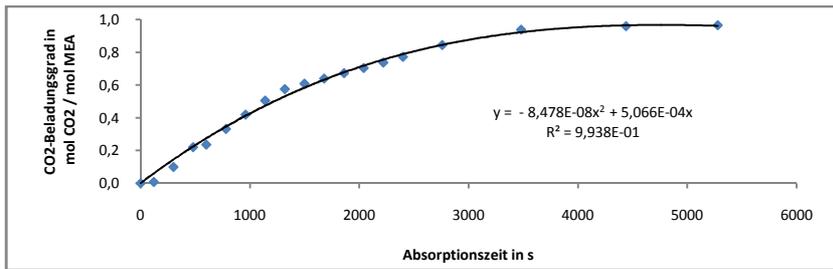


Abbildung 92 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

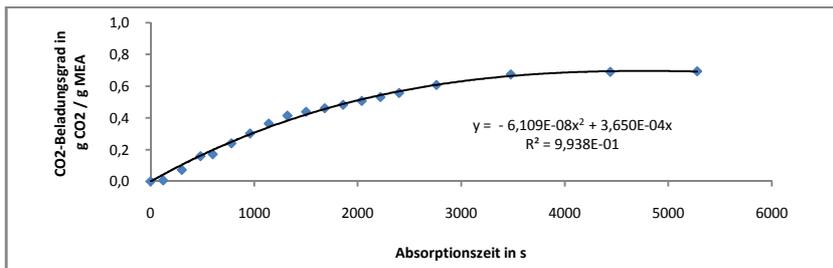


Abbildung 93 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

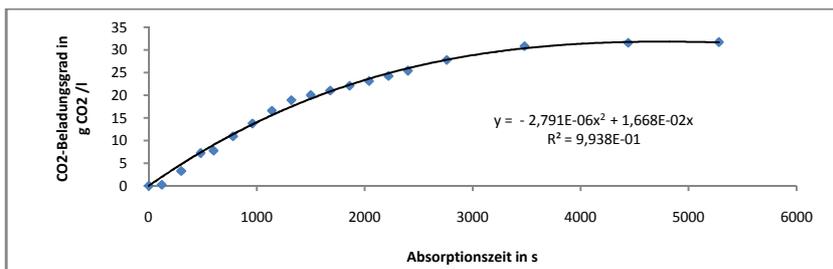


Abbildung 94 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

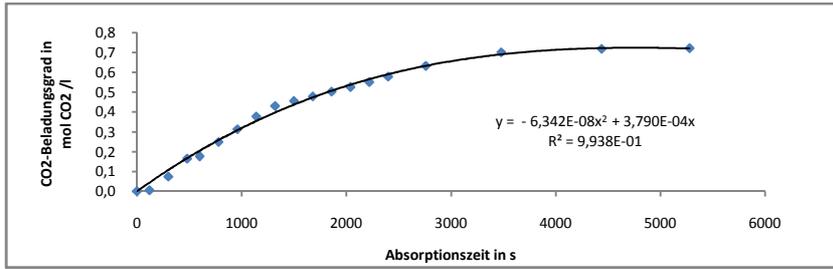


Abbildung 95 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

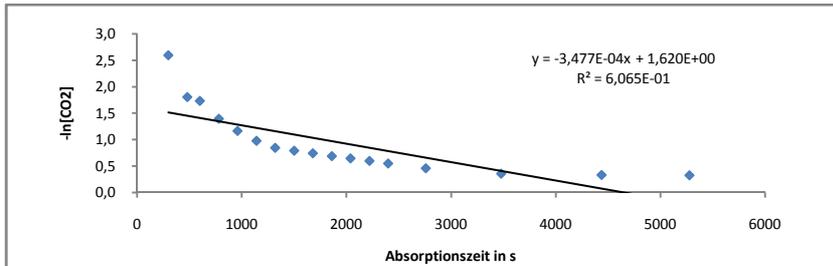


Abbildung 96 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

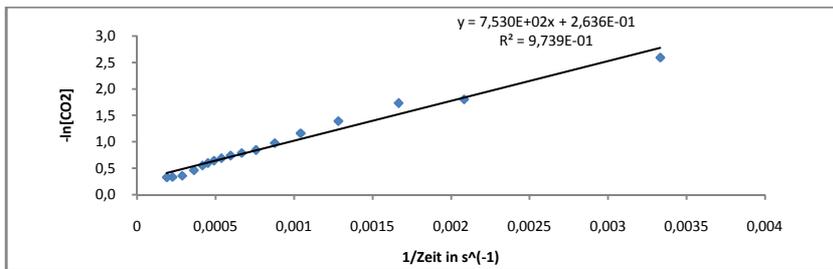


Abbildung 97 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit in 1/s bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

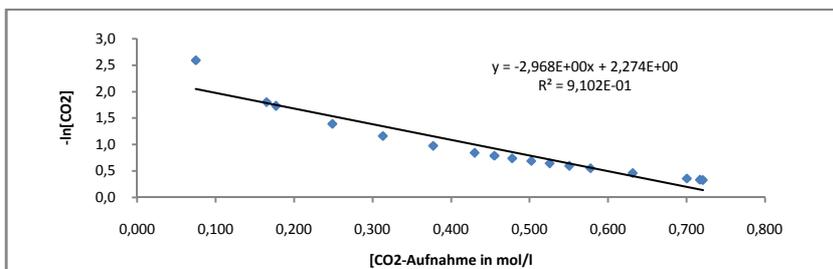


Abbildung 98 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

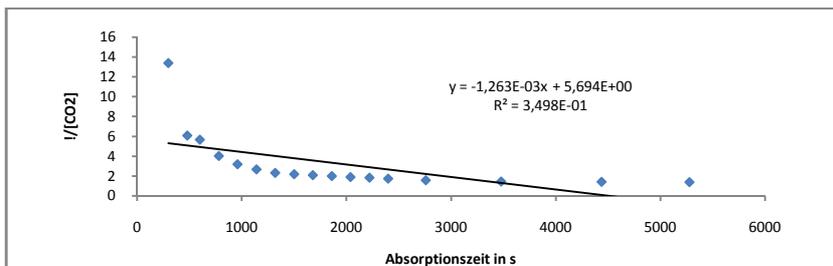


Abbildung 99 Verlauf des Kehrwerts der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

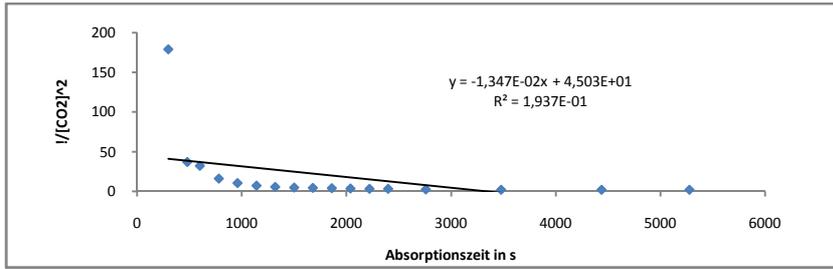


Abbildung 100 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

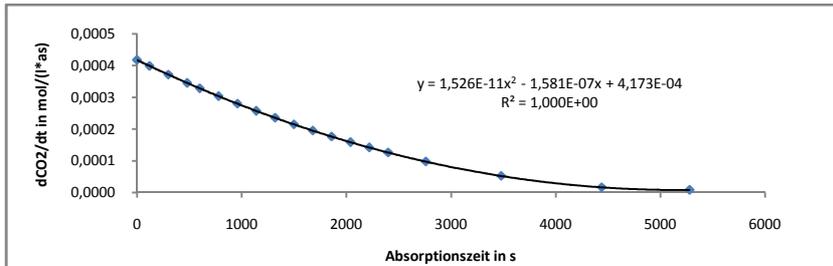


Abbildung 101 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol}/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Reaktionszeit in s bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

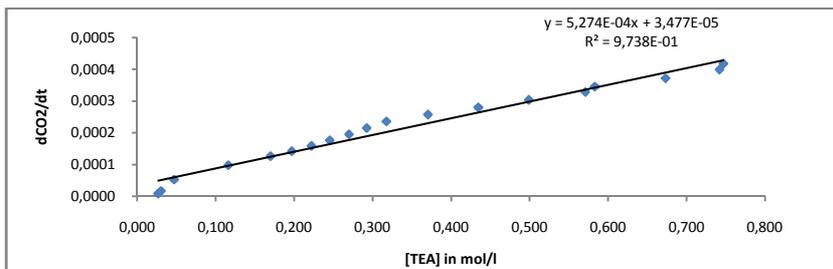


Abbildung 102 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol}/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Konzentration von MEA in  $\text{mol}/\text{l}$  bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

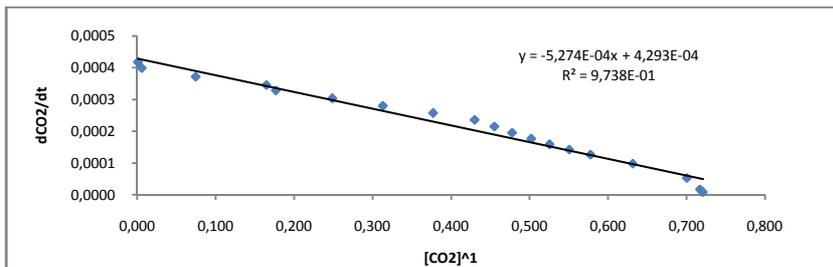


Abbildung 103 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol}/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol}/\text{l}$  bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

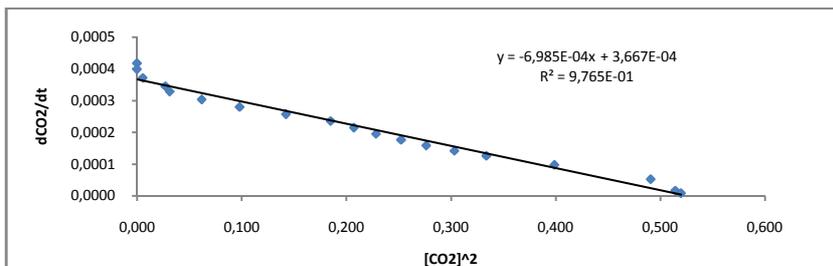


Abbildung 104 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol}/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die quadrierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol}/\text{l}$  bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

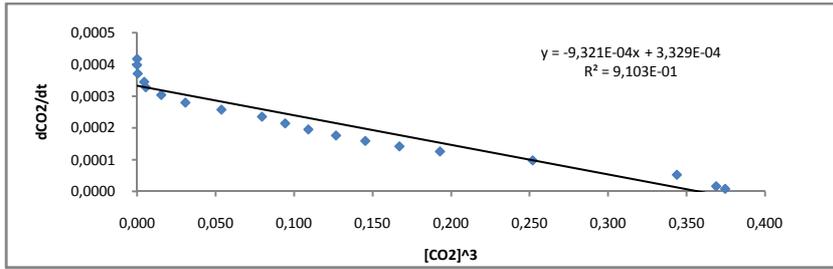


Abbildung 105 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

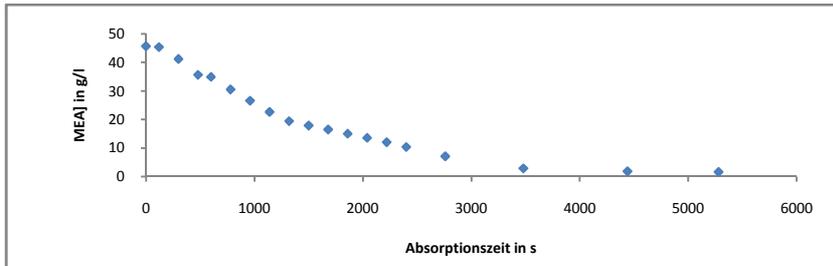


Abbildung 106 Verlauf der Konzentration von MEA in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

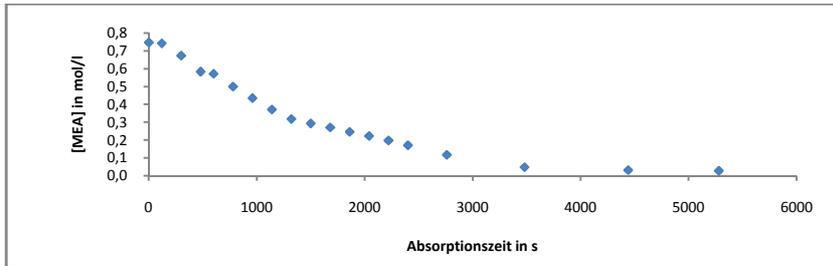


Abbildung 107 Verlauf der Konzentration von MEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

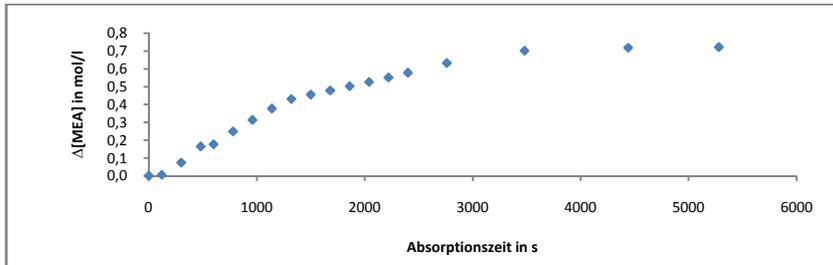


Abbildung 108 Verlauf des Umsatzes von MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

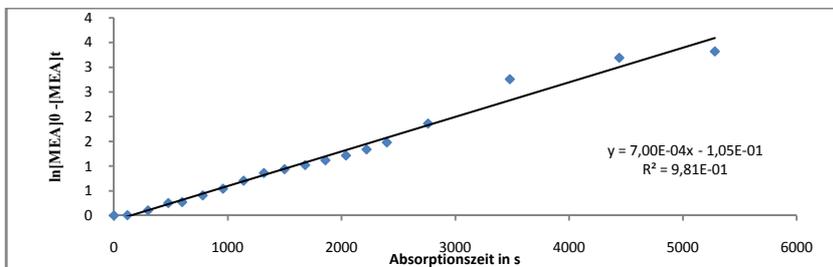


Abbildung 109 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

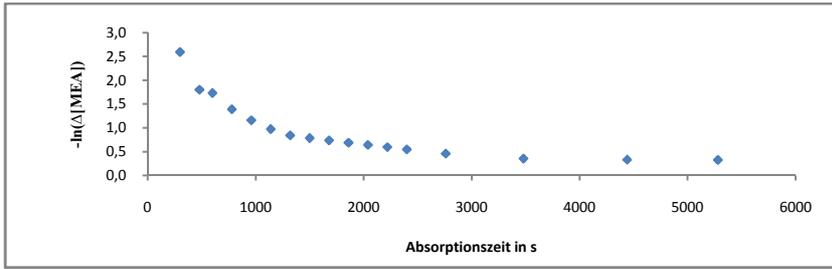


Abbildung 110 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

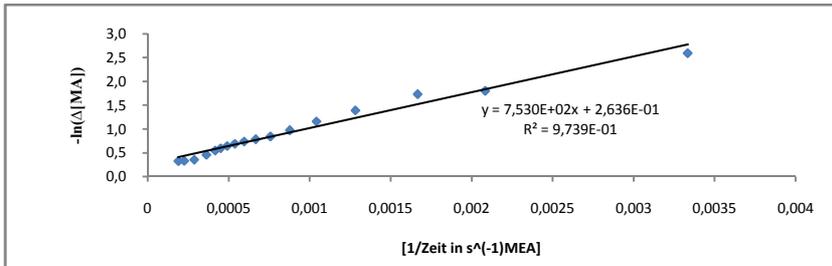


Abbildung 111 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MEA gegen den Kehrwert der Reaktionszeit in 1/s bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

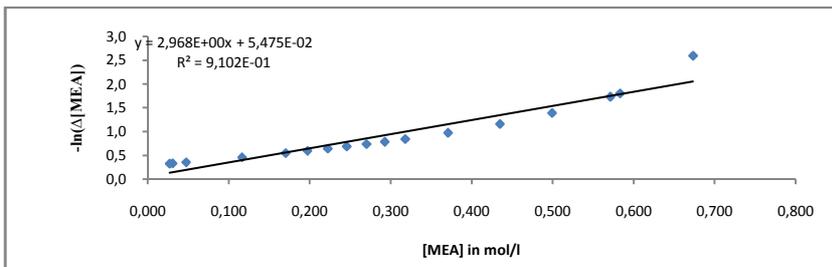


Abbildung 112 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MEA gegen die Konzentration von MEA in mol/l bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

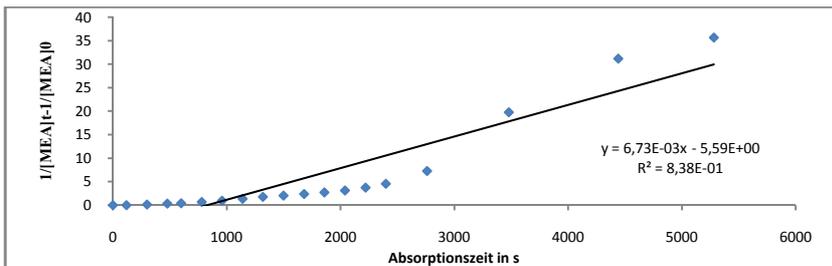


Abbildung 113 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

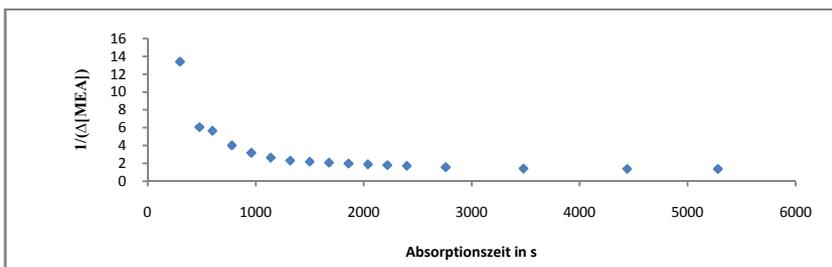


Abbildung 114 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

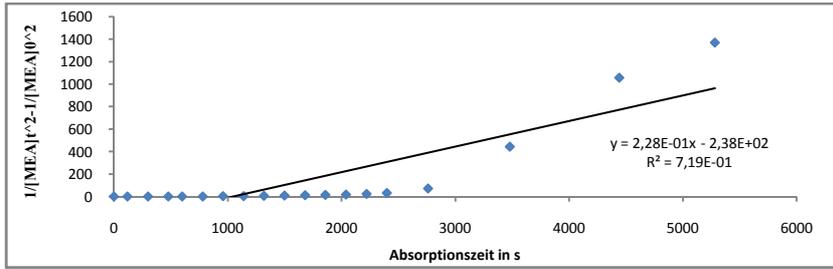


Abbildung 115 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

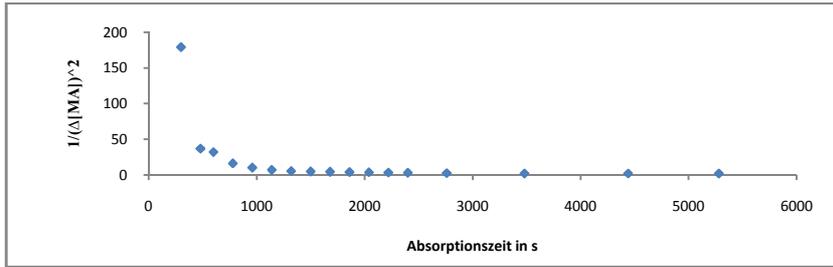


Abbildung 116 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von MEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

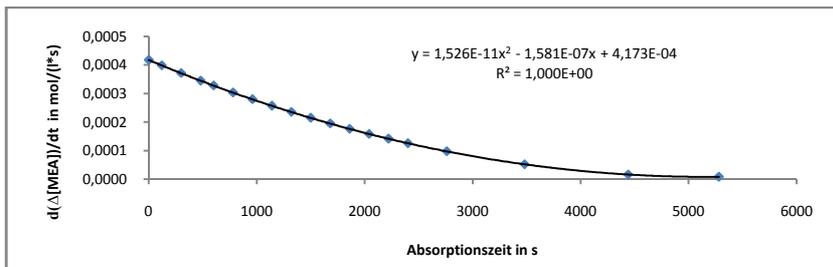


Abbildung 117 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

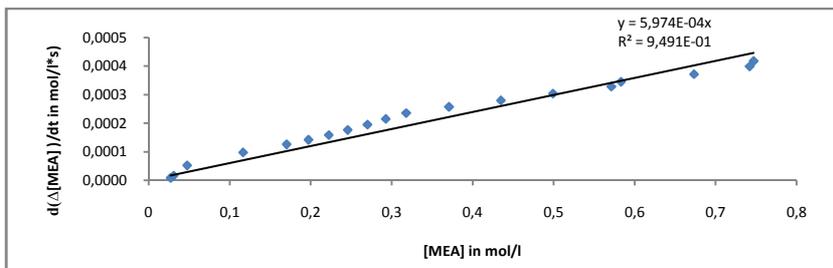


Abbildung 118 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MEA/(l\*s) gegen die Konzentration MEA in mol/l bei der Behandlung einer 4,65 m%igen MEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

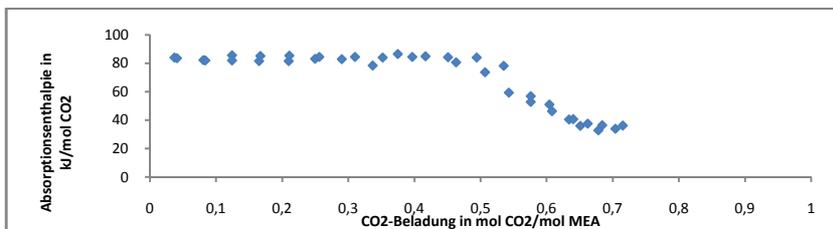


Abbildung 119 Verlauf der Absorptionenthalpie gegen die CO<sub>2</sub>-Beladung bei die Umsetzung einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

### 1.5.14 Thermoanalytische Untersuchung

Der Wärmebedarf für die Aufheizung und partielle Verdampfung eines Reinstoffes ergibt sich für  $T_1$ =Anfangstemperatur,  $T_2$ =Endtemperatur,  $m_g$ =Gesamtmasse und  $m_v$ =verdampfte Masse nach

$$\text{Formel 23 } \Delta Q = m_g \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) + m_v \cdot \Delta H_v = m_g \cdot C_p \cdot (\Delta T) + m_v \cdot \Delta H_v$$

Der thermoanalytisch bestimmte Wärmebedarf  $\Delta Q$  für die Aufheizung von und vollständige Verdampfung von MEA beträgt 75,25 kJ/mol bzw. 1232 J/g, In diesem Fall ist  $m_g = m_v$ . Das Ergebnis harmoniert mit dem berechneten Wärmebedarf für die Aufheizung und vollständige Verdampfung von MEA von 74,96 kJ/mol bzw. 1258,2 J/g auf Basis der in der offenen Literatur für  $T = 30$  bis  $170$  °C benannten gemittelten spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  von 149,6 J/(mol\*K) bzw. 2,45 J/(g\*K) und Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  für von gemittelt 55,9 kJ/mol bzw. 915,2 J/g<sup>26,27</sup>.

Der thermoanalytisch gemessene Wärmebedarf für die Aufheizung von RT auf die Standarddesorptionstemperatur von 130 °C beträgt 16,64 kJ/mol bzw. 272,46 J/g MEA. Dieser Wärmebetrag setzt sich aus der Aufheizung und partiellen Verdampfung von MEA bis 130 °C zusammen. Stellt man die o.g. Formel nach

$$\text{Formel 24 } m_v = (\Delta Q - m_g \cdot C_p \cdot \Delta T) / \Delta H_v$$

um, ergibt sich für die Standarddesorptionstemperatur von 130 °C rein rechnerisch ein prozentualer Verlust an MEA durch partielle Verdampfung von 3 m%, unter Berücksichtigung der für  $T = 30$  bis  $130$  °C gemittelten Werte für die Wärmekapazität von gemittelt 149,6 J/(mol\*K) bzw. 2,45 J/(g\*K) und Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  für MEA von gemittelt 55,9 kJ/mol bzw. 915,2 J/g<sup>26</sup>

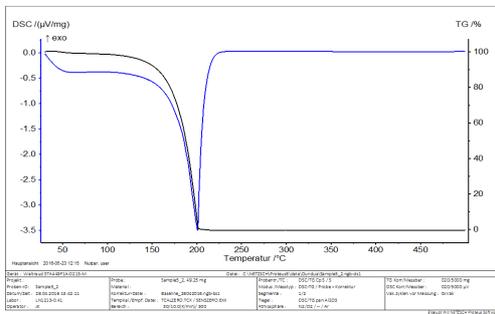


Abbildung 120 TGA und DSC von MEA

- Wärmebedarf für die vollständige Verdampfung bis 230 °C: 1231,65 J/g Probe exp./1260,65 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 230 °C: 100%
- Wärmebedarf bis 160 °C: 532,7 J/g Probe exp./428,32 J/g /ber.
- Massenverlust bis 160 °C: 12%
- Wärmebedarf bis 151 °C: 365,09 J/g ber.

- Massenverlust bis 151 °C: 7,5%
- Wärmebedarf bis 130 °C: 272,46 J/g Probe
- Massenverlust bis 130 °C: 3%
- Wärmebedarf bis 100 °C: 186,14 J/g Probe
- Massenverlust bis 100 °C: 1,6%

Der Wärmebedarf  $\Delta Q$  für die Aufheizung und vollständige Verdampfung einer Mischung aus  $n$  Komponenten  $i$  ergibt sich für  $m_{gi}$  = Gesamtmasse einer Komponente  $i$  und  $m_{vi}$  = verdampfte Masse einer Komponente  $i$  nach

$$\text{Formel 25} \Delta Q = \sum (m_{gi} \cdot C_{pi} \cdot \Delta T + m_{vi} \cdot \Delta H_{vi})_n$$

Der thermoanalytisch bestimmte Wärmebedarf  $\Delta Q$  für die Aufheizung und vollständige Verdampfung einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung bis 230 °C beträgt 2181 J/g Lösung. In diesem Fall ist jeweils für beide Komponenten  $m_a = m_v$ . Das Ergebnis harmoniert mit dem berechneten Wärmebedarf für die Aufheizung und vollständige Verdampfung einer 30 m%igen wässrigen MEA-Lösung von 2163 J/g auf Basis der in der offenen Literatur benannten spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  für MEA von gemittelt 146,6 J/(mol\*K) bzw. 2,45 J/(g\*K), der spezifischen Wärmekapazität für Wasser von gemittelt 75,64 J/(mol\*K) bzw. 4,2 J/(g\*K), der Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  für MEA von gemittelt 55,9 kJ/mol bzw. 915,2 J/g und der Verdampfungsenthalpie von Wasser von gemittelt 40,65 kJ/mol bzw. 2257 J/g.

Der thermoanalytisch gemessene Wärmebedarf für die Aufheizung von RT auf die Standarddesorptionstemperatur von 130 °C beträgt 710,37 J/g Probe. Dieser Wärmebetrag setzt sich aus der Aufheizung und der partiellen Verdampfung von Wasser und MEA bis 130 °C zusammen. Stellt man die o.g. Formel nach

$$\text{Formel 26} \sum (m_{vi} \cdot \Delta H_{vi}) = \Delta Q - \sum (m_{gi} \cdot C_{pi} \cdot \Delta T)_n$$

um, ergibt sich aus dem Summenparameter  $\sum (m_{vi} \cdot \Delta H_{vi})$  der enthalpische Wärmebedarf für die partielle Verdampfung der  $n$  verdampften Komponenten  $i$ . Für eine 30m%ige wässrige MEA-Lösung ein Betrag von 431,07 J/g, das sind ca. 23,25% des enthalpischen Betrages für die vollständige Verdampfung aller Komponenten, also von Wasser und MEA in Höhe von 1854,46 J/g. Daraus folgt, dass es bis zur Standardabsorptionstemperatur von 130 °C zu einer erheblichen Verdampfung von Wasser und MEA kommt, ca. 18,8 m% Wasser und 0,7 m% MEA. Korreliert mit dem Dampf/Flüssig-Gleichgewicht des Systems Wasser/MEA, ist die Wasser-Konzentration im entstehenden Dampf > 89 m%.

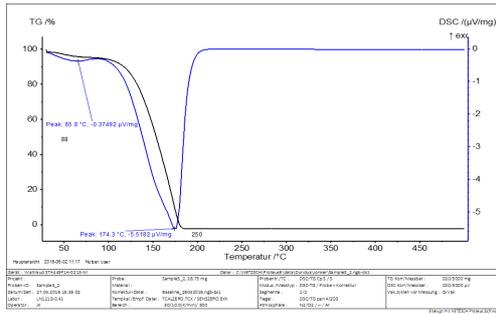


Abbildung 121 TGA von 30m%iger MEA-Lösung in Wasser

- TGA-Wärmebedarf für die vollständige Verdampfung bis 230 °C: 2181 J/g Probe exp. / 2178,63 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 230 °C: 100%
- TGA-Wärmebedarf bis 160 °C: 1577,99 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 160 °C: 60% (54 m% Wasser /6 m% MEA)
- TGA-Wärmebedarf bis 151 °C: 1275,48 J/g Probe
- Massenverlust bis 151 °C: 45% (42,3 m% Wasser /2,7 m% MEA)
- TGA-Wärmebedarf bis 130 °C: 710,37 J/g Probe
- Massenverlust bis 130 °C: 19,5% (18,8 m% Wasser /0,7 m% MEA)
- TGA-Wärmebedarf bis 100 °C: 385,90 J/g Probe
- Massenverlust bis 100 °C: 5,7% (5,7 m% Wasser)

Der Wärmebedarf für die Aufheizung eines MEA-Carbamats mit vollständiger Eliminierung von CO<sub>2</sub> und Verdampfung des bei der Eliminierung zurückgebildetenamins ergibt sich für  $m_{\text{Carbamat}} = \text{Gesamtmasse Carbamat}$ ,  $m_{\text{Amin}} = \text{verdampfte Masse Amin}$ ,  $m_{\text{CO}_2} = \text{eliminierte Masse CO}_2$  und  $\Delta H_r = \text{Reaktionsenthalpie}$  nach

$$\text{Formel 27} \Delta Q = m_{\text{Carbamat}} \cdot C_p \cdot \Delta T + m_{\text{Amin}} \cdot \Delta H_v + m_{\text{CO}_2} \cdot \Delta H_r$$

Der thermoanalytisch bestimmte Wärmebedarf  $\Delta Q$  für die Aufheizung einer MEA-Carbamatprobe mit vollständiger Eliminierung von CO<sub>2</sub> und Verdampfung von MEA beträgt 1641,0 J/g. Für die Eliminierung von CO<sub>2</sub> berechnet sich daraus eine Reaktionsenthalpie von 2050,3 J/g CO<sub>2</sub> bzw. 90,2 kJ/mol CO<sub>2</sub>. Dieser Wert harmoniert mit den in der offenen Literatur benannten Werten.

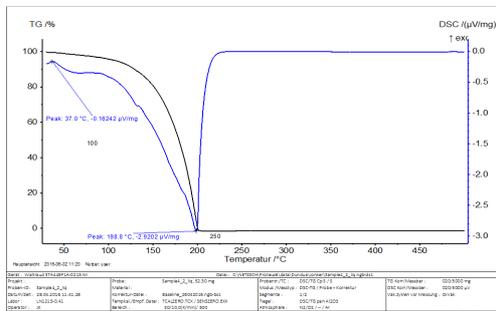


Abbildung 122 TGA und DSC von MEA-Carbamat

- Wärmebedarf für die vollständige Eliminierung und Verdampfung bis 230 °C: 1641,02 J/g Probe exp./1636,42 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 230 °C: 100% (26,5m% CO<sub>2</sub> / 73,5m% MEA)
- Wärmebedarf bis 160 °C: 749,15 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 160 °C: 27% (19,06m% CO<sub>2</sub> / 7,94m% MEA)
- Wärmebedarf bis 151 °C: 532,7 J/g Probe/ exp./488,64 J/g ber.

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

- Massenverlust bis 151 °C: 20% (15,4m% CO<sub>2</sub> / 4,6m% MEA)
- Wärmebedarf bis 130 °C: 336,52 J/g Probe
- Massenverlust bis 130 °C: 11% (8,4m% CO<sub>2</sub> / 2,6m% MEA)
- Wärmebedarf bis 100 °C: 198,9 J/g Probe
- Massenverlust bis 100 °C: 4% (4% CO<sub>2</sub> / <0,1% MEA)

## 1.6 Das Reaktionssystem Diethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.6.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten



Diethanolamin DEA ist eine farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit aminartigem Geruch, A sind alkalisch und formal 1-fach protonierbar. DEA ist ein starkes Nucleophil (CAS-Nummer 111-42-2, Molare Masse 105,14 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 1,1 g·cm<sup>-3</sup>, Schmelzpunkt 28 °C, Siedepunkt 269 °C, Dampfdruck <1 Pa (20 °C), Brechungsindex 1,4179 (20 °C), pK<sub>S1</sub>= 8,88 (25 °C)).

### 1.6.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit DEA

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 302, 373, 315, 318 und P: 273, 280, 301+312, 330, 305+351+338, 310

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung



#### R- und S-Sätze

R: 22, 38, 41, 48/22 und S: (2), 26, 36/37/39, 46

### 1.6.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von DEA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 0,708 m%igen DEA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt für eine Äquivalentwertigkeit von 0,954 einen pKa-Wert für DEA bei 25 °C von 8,1 (Literaturwert = 7,8).

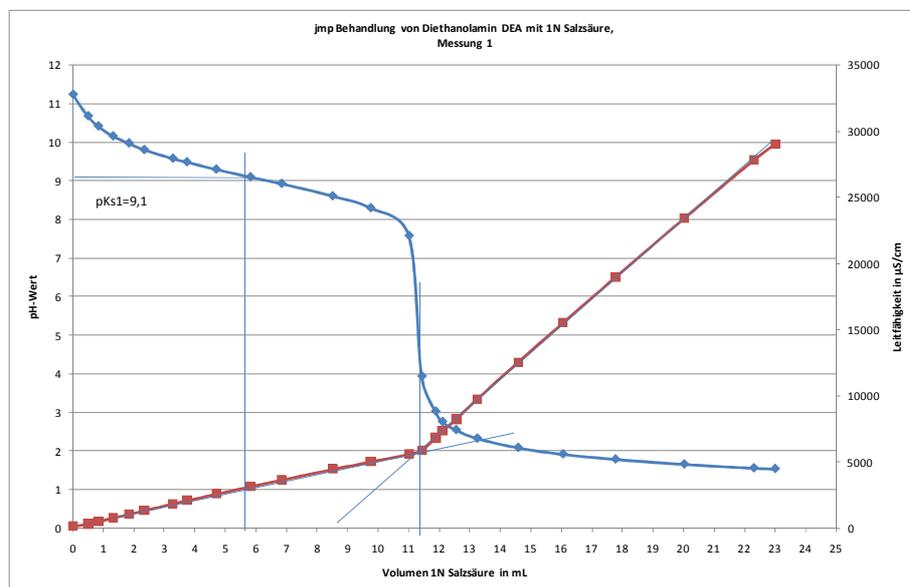


Abbildung 123 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,098g DEA in verdünnter wässriger Lösung mit 1N Salzsäure bei 25 °C

### 1.6.4 Infrarotspektrometrische Untersuchung

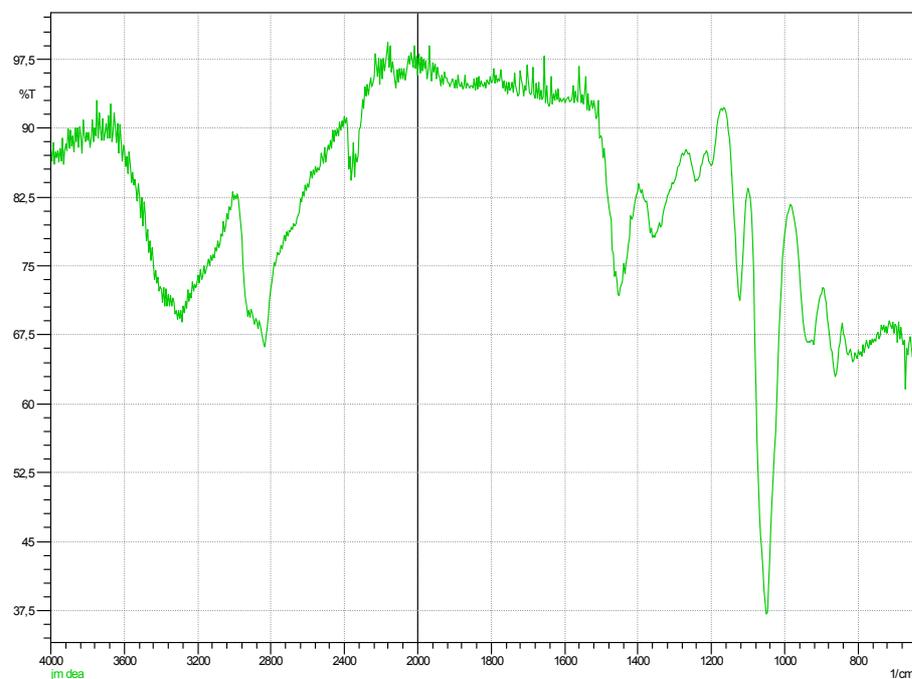


Abbildung 124 FT-MIR-ATR Spektrum von DEA

### 1.6.5 Behandlung einer 8,63 m%igen DEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 8,63 m%igen DEA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,4 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,4 behandelt

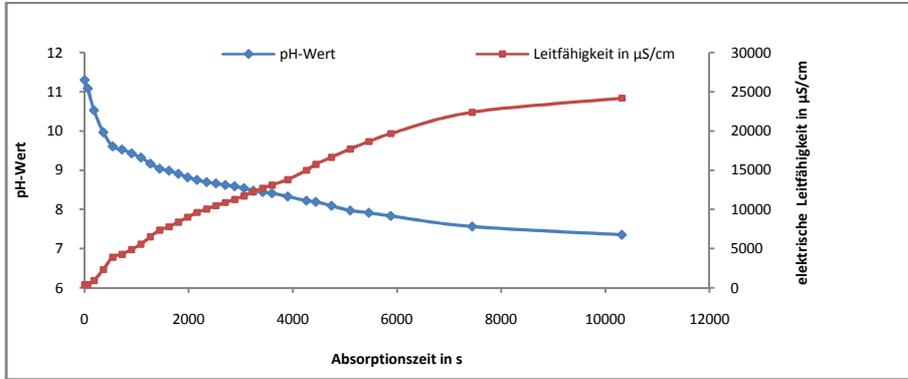


Abbildung 125 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Zeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

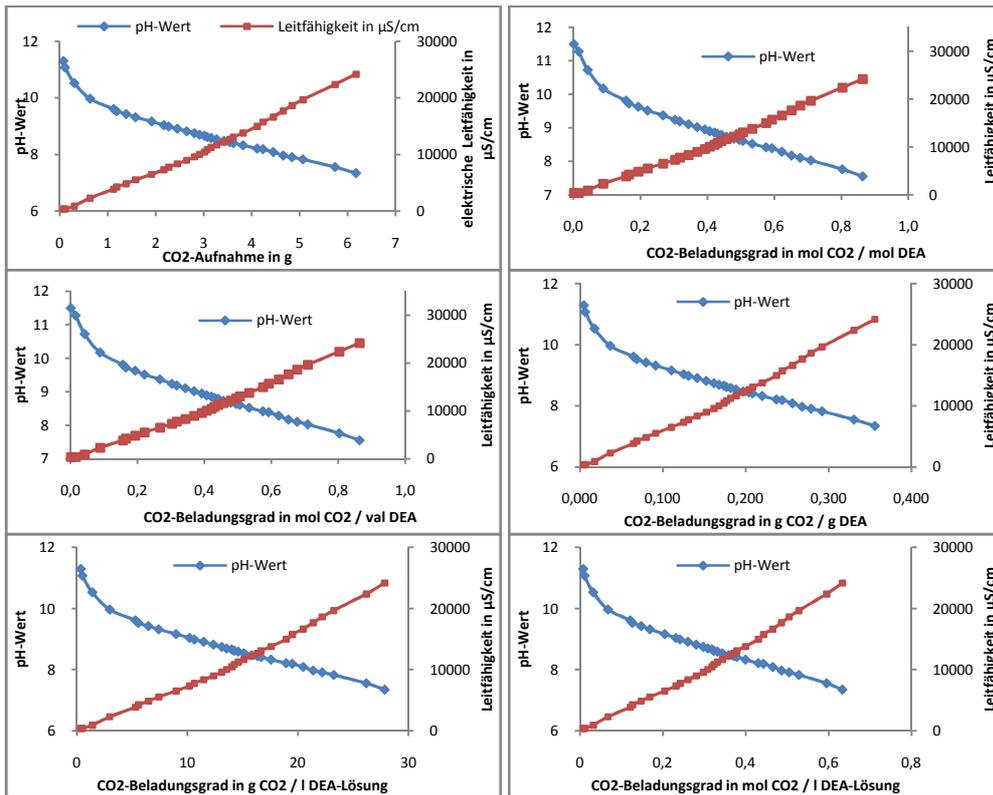


Abbildung 126 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

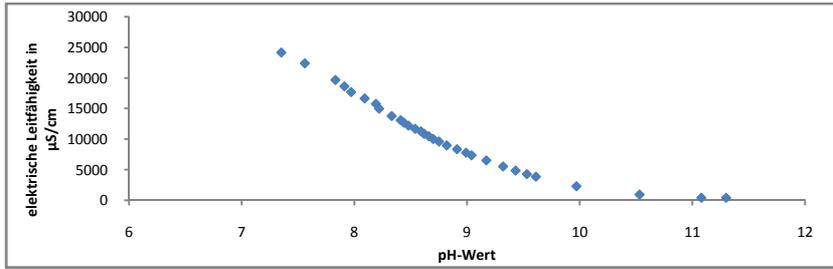


Abbildung 127 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

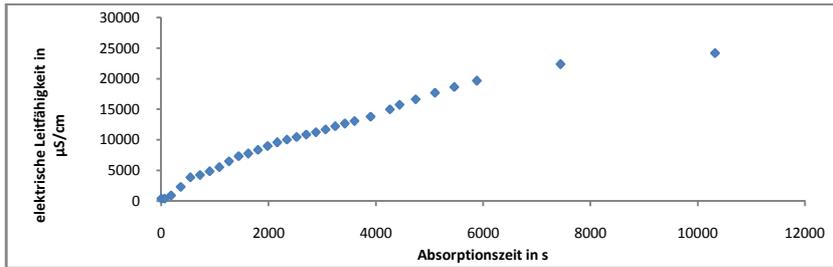


Abbildung 128 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

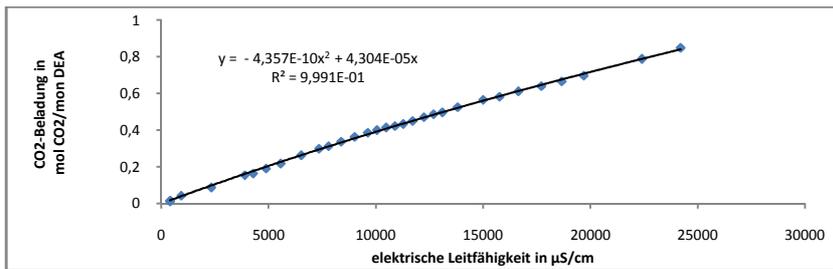


Abbildung 129 korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DEA gegen die elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

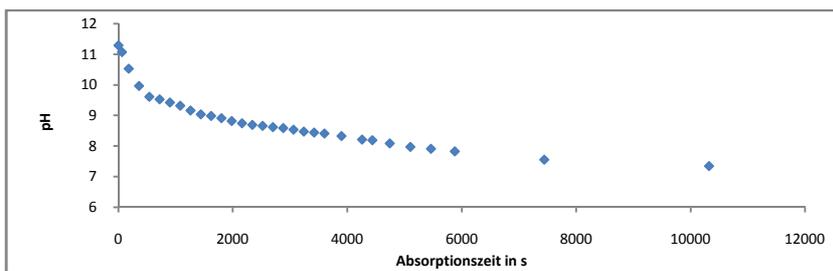
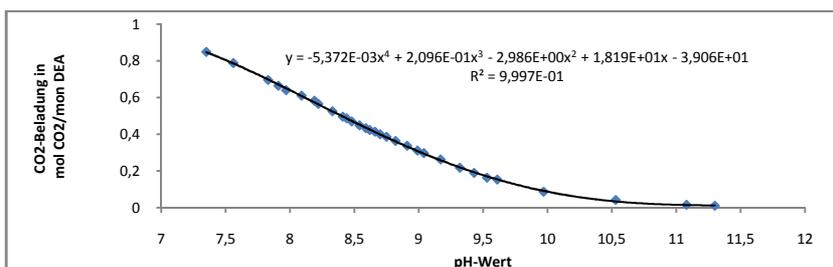
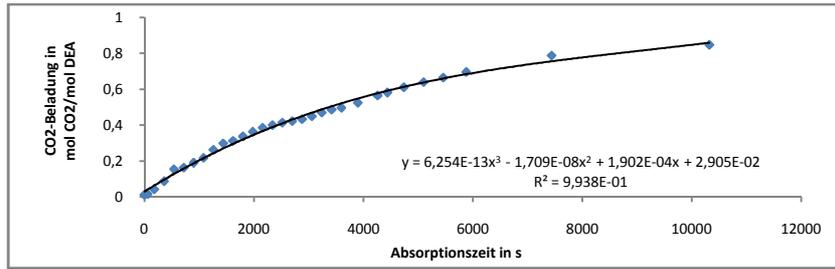


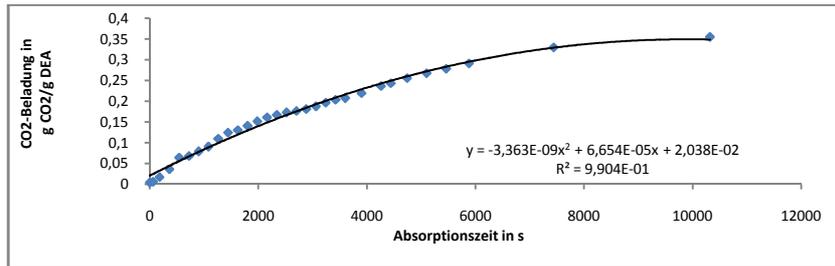
Abbildung 130 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



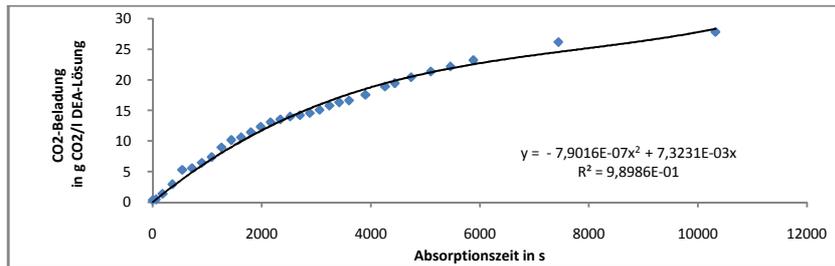
**Abbildung 131** Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DEA gegen den pH bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



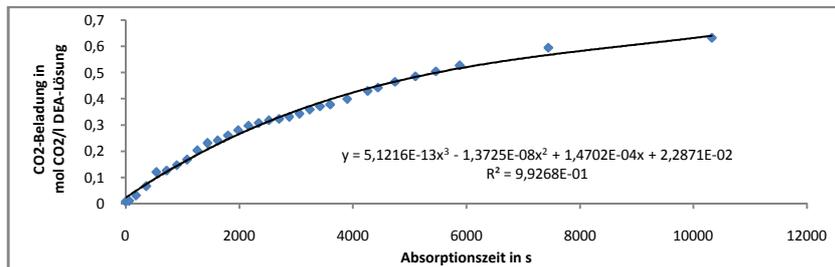
**Abbildung 132** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 133** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g DEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 134** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 135** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

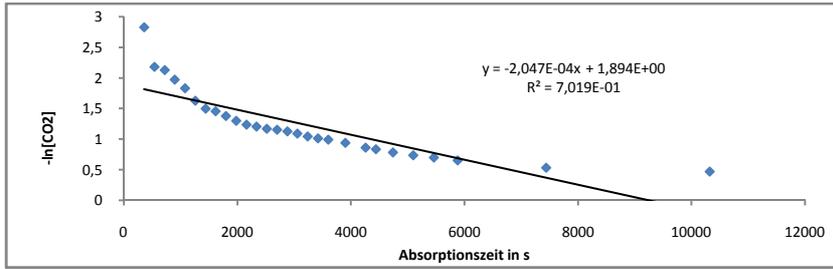


Abbildung 136 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

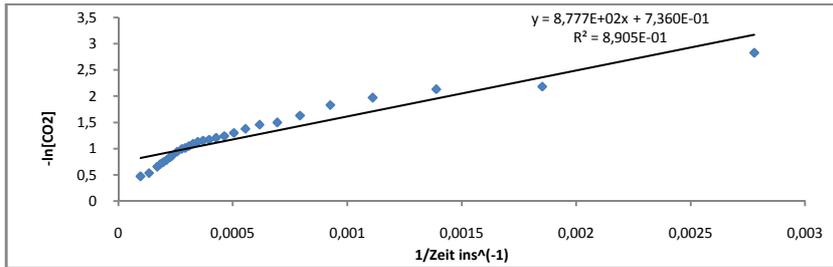


Abbildung 137 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

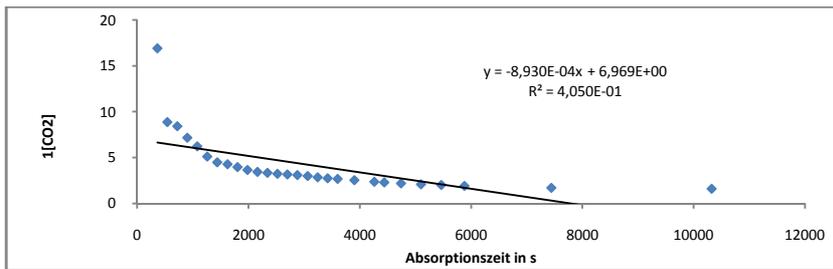


Abbildung 138 Verlauf des Kehrwerts der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

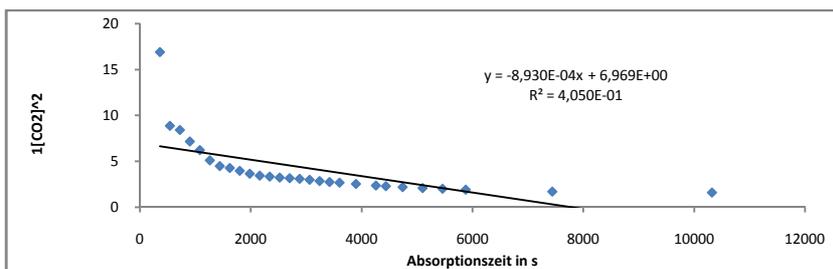
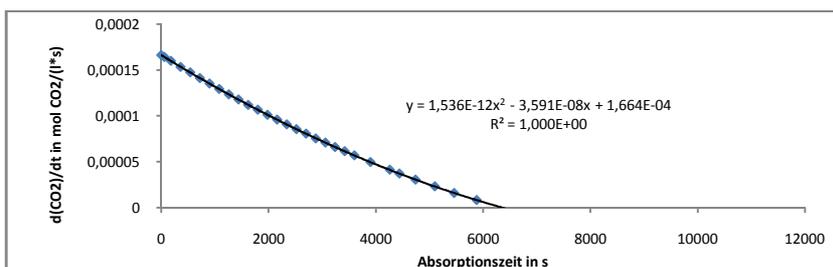
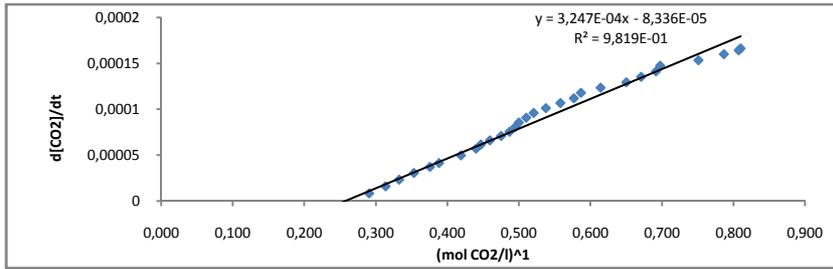


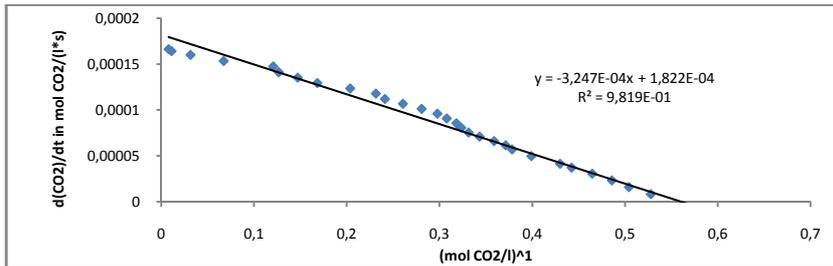
Abbildung 139 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen



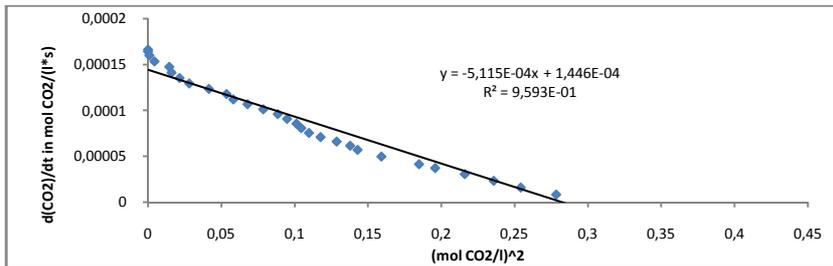
**Abbildung 140** Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



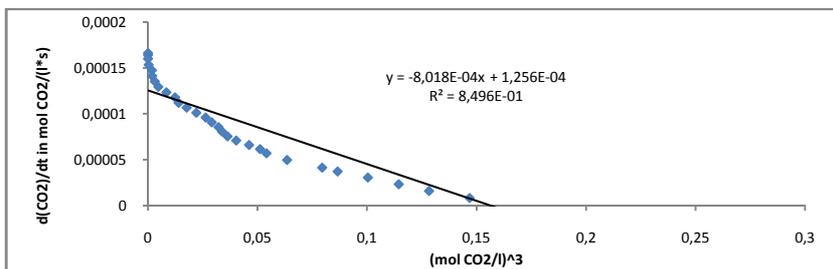
**Abbildung 141** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>(l\*s) gegen die Konzentration von DEA bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 142** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 143** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 144** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

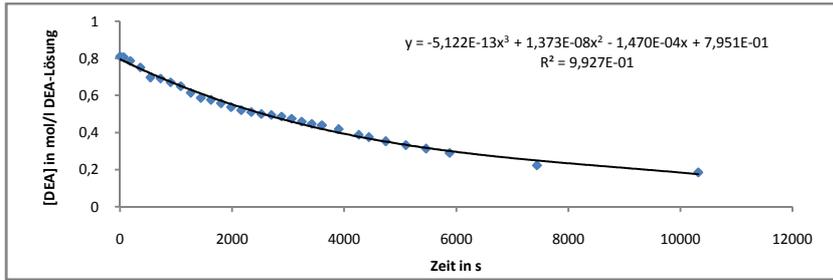


Abbildung 145 Verlauf der Konzentration DEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

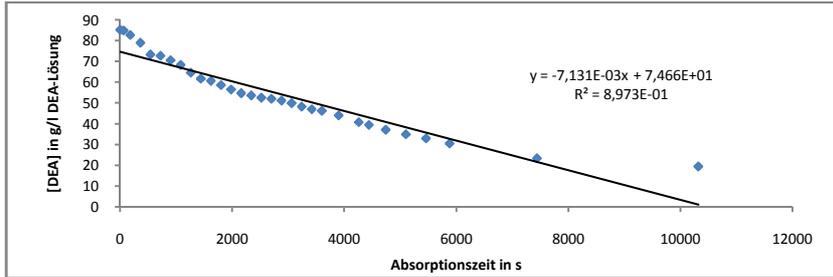


Abbildung 146 Verlauf der Konzentration DEA in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

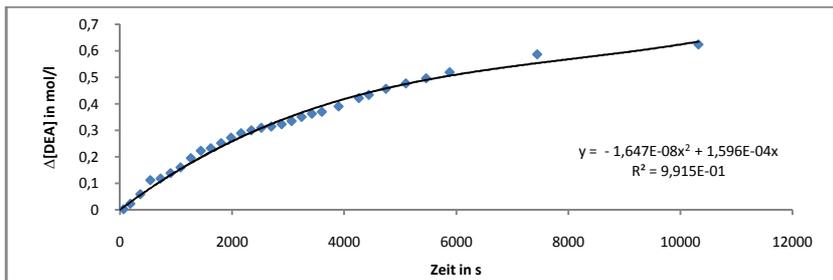


Abbildung 147 Verlauf des Umsatzes von DEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

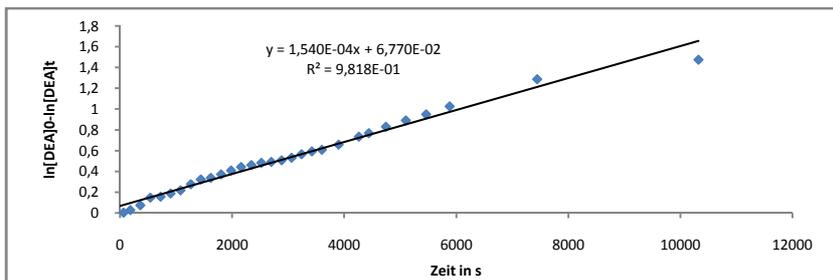


Abbildung 148 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

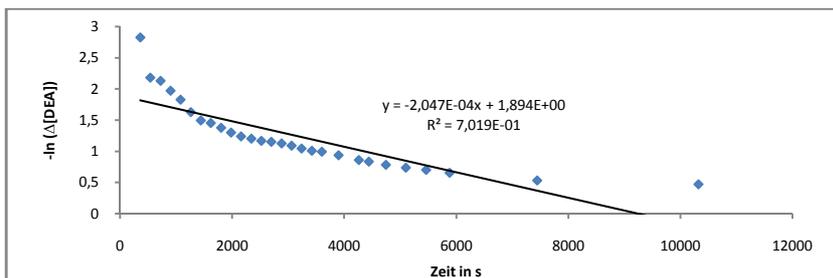


Abbildung 149 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von DEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

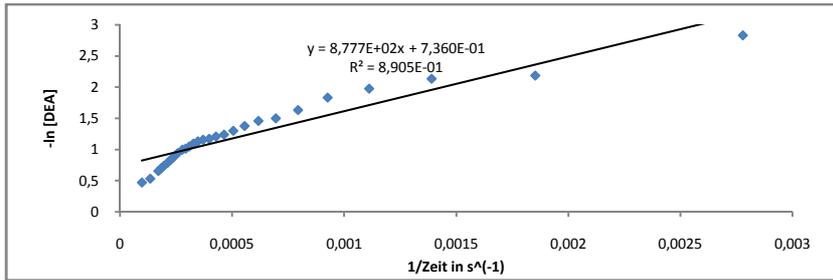


Abbildung 150 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von DEA in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

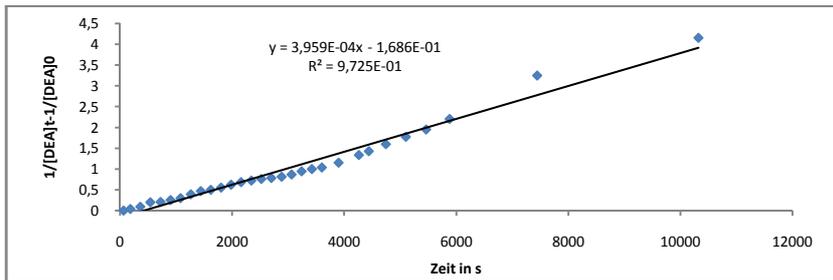


Abbildung 151 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

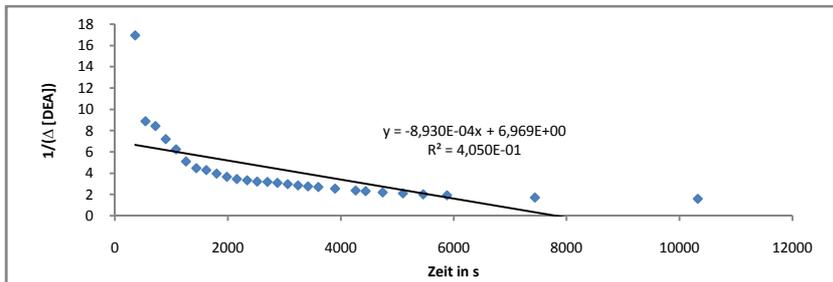


Abbildung 152 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von DEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

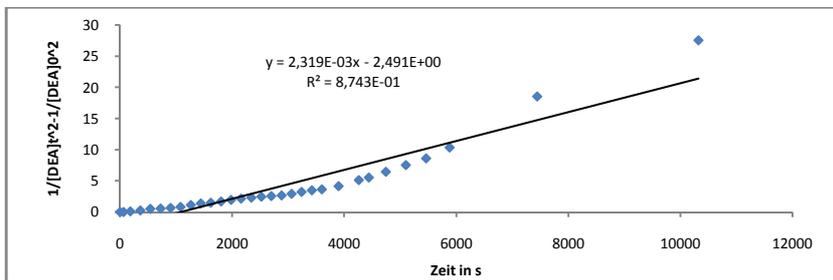


Abbildung 153 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

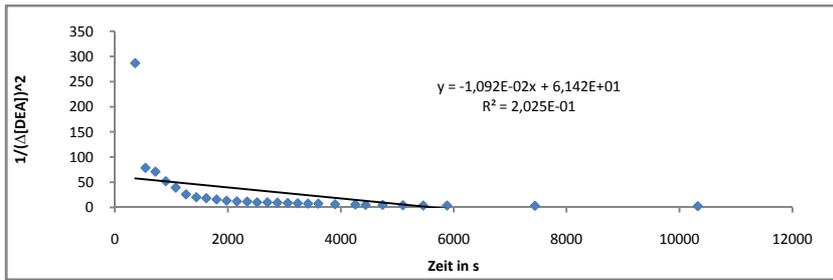


Abbildung 154 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von DEA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

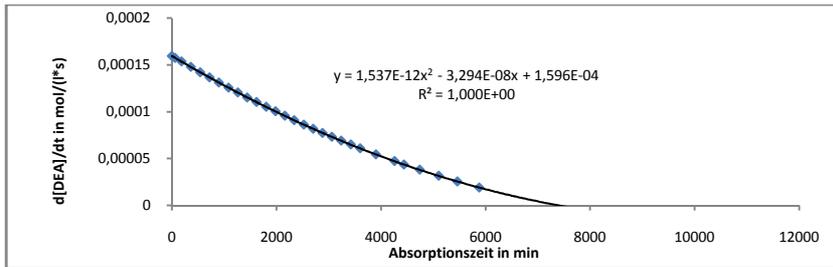


Abbildung 155 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol DEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

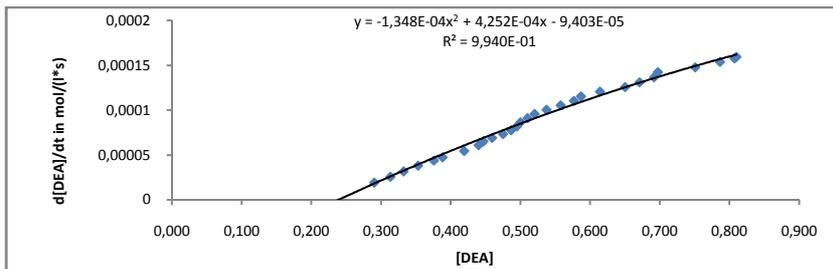
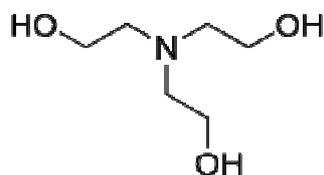


Abbildung 156 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol DEA/(l\*s) gegen die Konzentration DEA in mol/l bei der Behandlung einer 8,6 m%igen DEA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

## 1.7 Das Reaktionssystem Triethanolamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.7.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten



Triethanolamin TEA

Triethanolamin TEA ist eine farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit aminartigem Geruch, die in allen Verhältnissen mit Wasser mischbar ist. Wässrige Lösungen des tertiären Amins sind alkalisch und formal 1-fach protonierbar. TEA ist kein Nucleophil (CAS-Nummer 102-71-6, Molare Masse 149,19 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 1,13 g·cm<sup>-3</sup>, Schmelzpunkt 21 °C, Siedepunkt 360 °C, Dampfdruck 5 mPa (40 °C), Brechungsindex 1,4179 (20 °C), pK<sub>S1</sub>= 7,74).

### 1.7.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit TEA

GHS-Gefahrstoffkennzeichnung

keine Pictogramme

H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H:keine H-Sätze und P: keine P-Sätze

EU-Gefahrstoffkennzeichnung

keine Pictogramme

R- und S-Sätze

R keine R-Sätze und S: keine S-Sätze

### 1.7.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration TEA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 1,233 m%igen TEA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt für eine Äquivalentwertigkeit von 0,954 einen pK<sub>a</sub>-Wert für TEA bei 25 °C von 7,9.

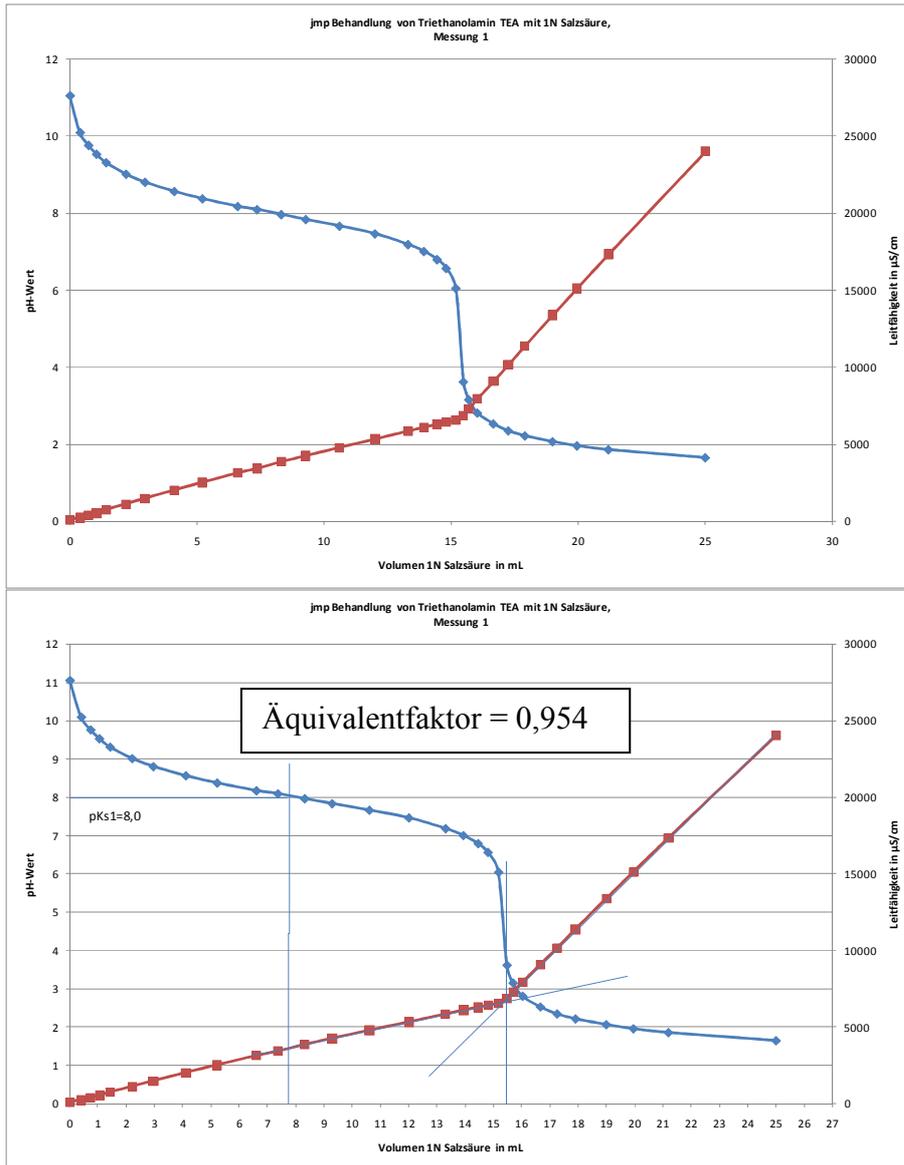


Abbildung 157 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit der bei der Behandlung von 2,394g TEA in verdünnter wässriger Lösung mit 1N-Salzsäure

#### 1.7.4 Behandlung einer 10,15m%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 10,15m%ige TEA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,3 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,3 behandelt.

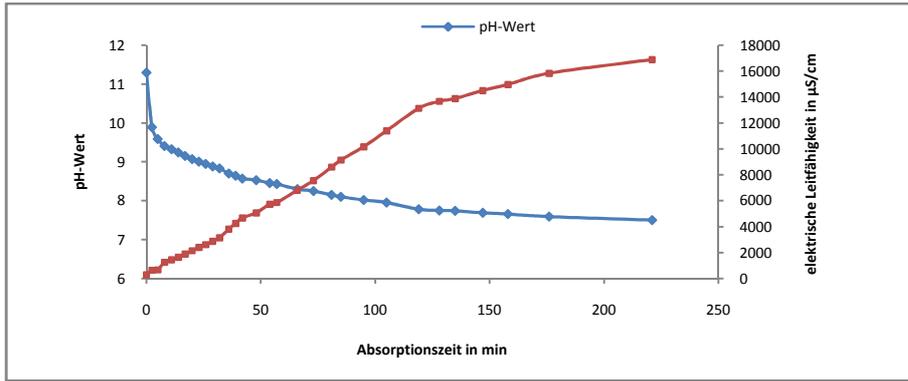


Abbildung 158 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

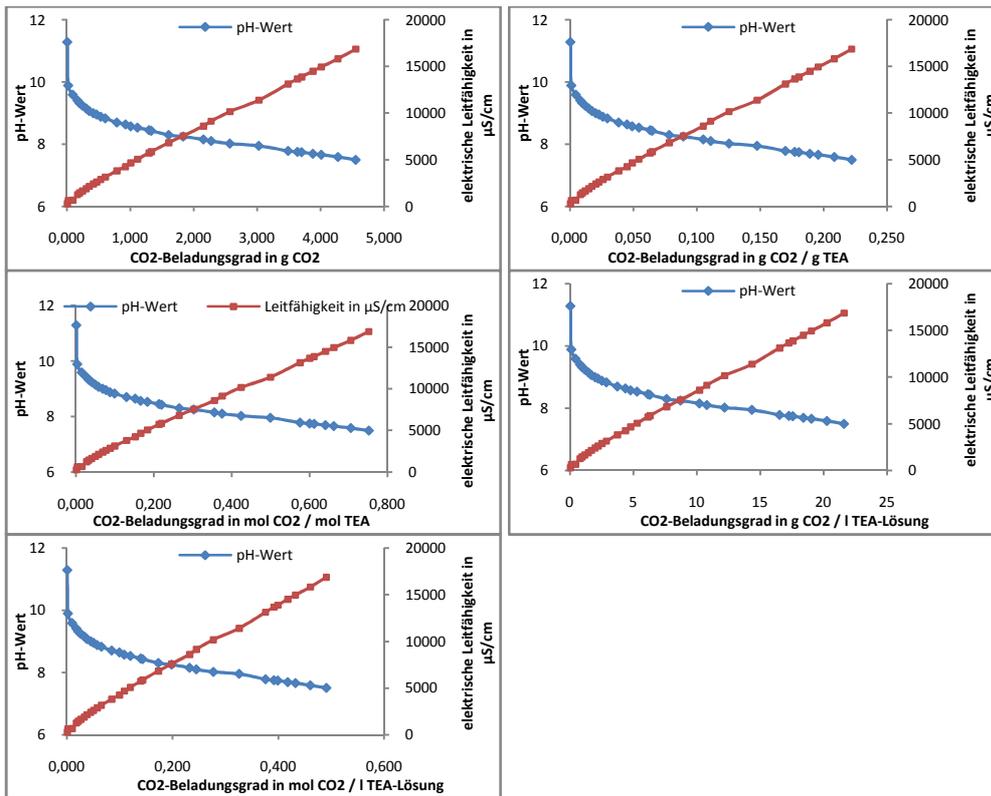


Abbildung 159 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

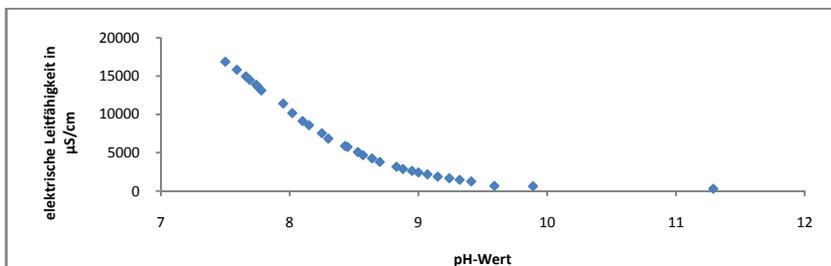


Abbildung 160 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

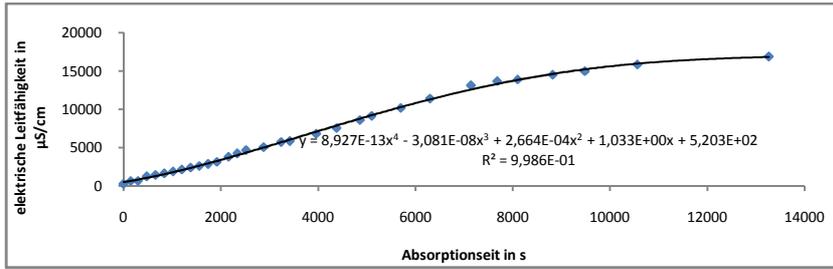


Abbildung 161 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

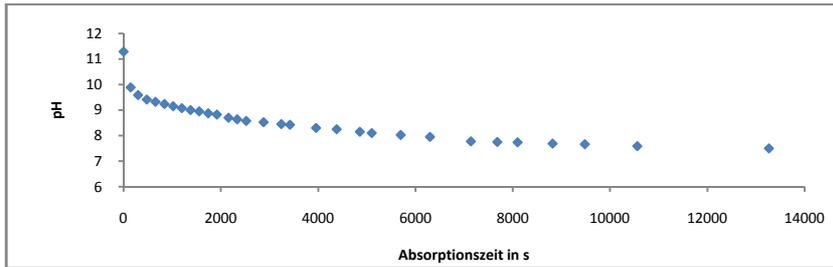


Abbildung 162 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

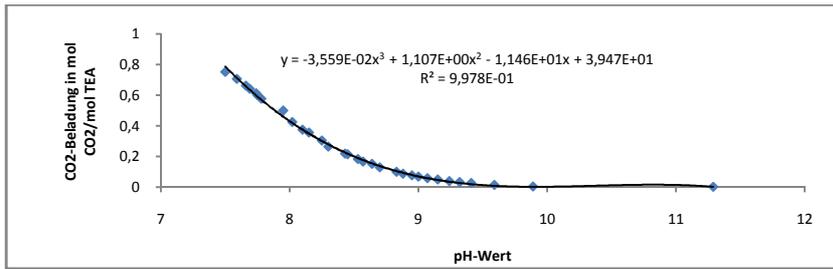


Abbildung 163 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

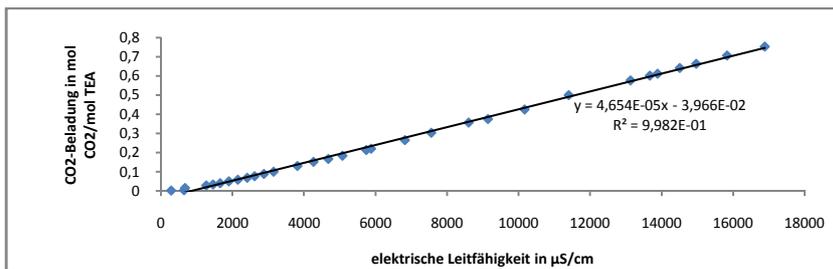


Abbildung 164 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TEA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

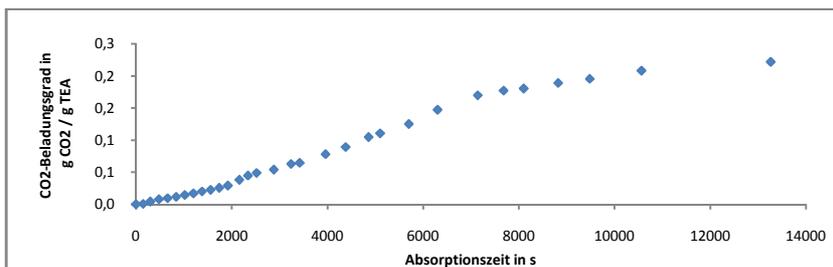


Abbildung 165 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g TEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

CO<sub>2</sub>

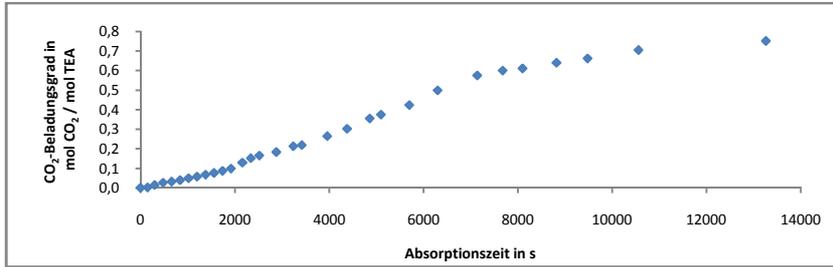


Abbildung 166 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TEA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

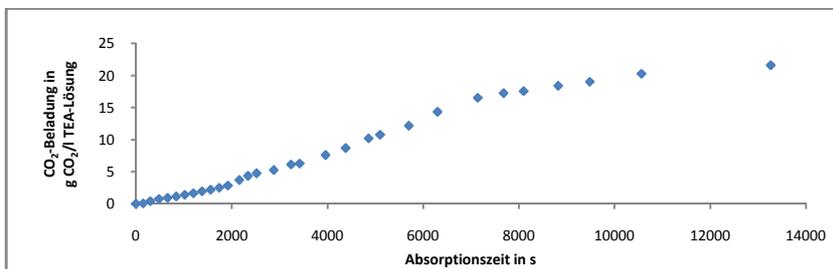


Abbildung 167 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

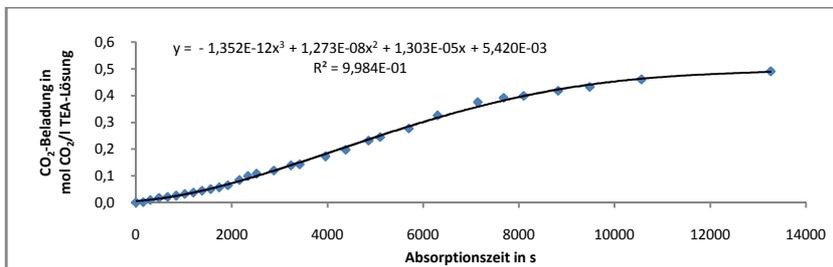


Abbildung 168 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

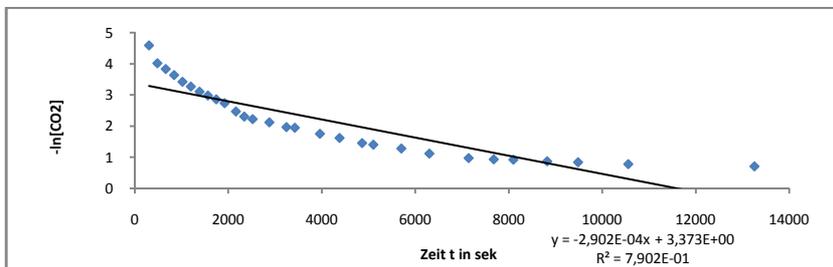


Abbildung 169 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

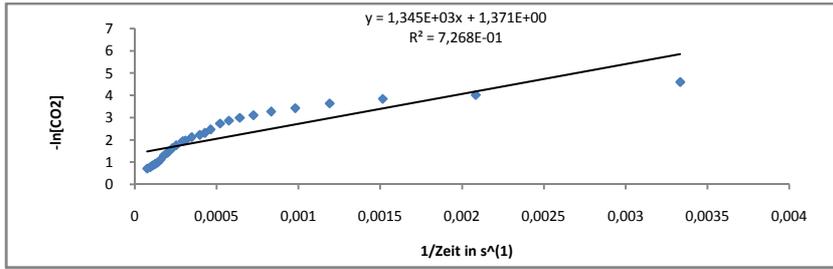


Abbildung 170 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

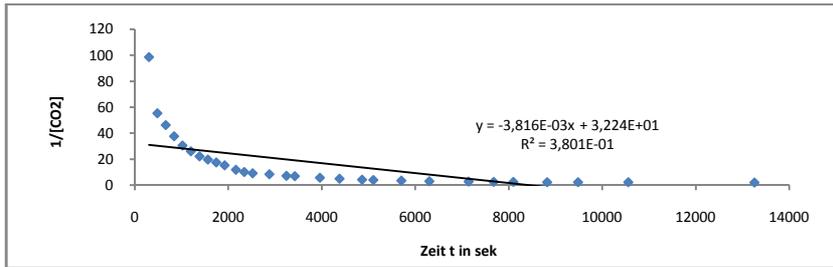


Abbildung 171 Verlauf des Kehrwerts der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

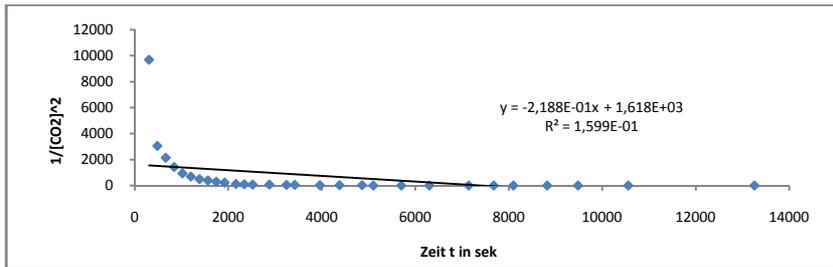


Abbildung 172 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

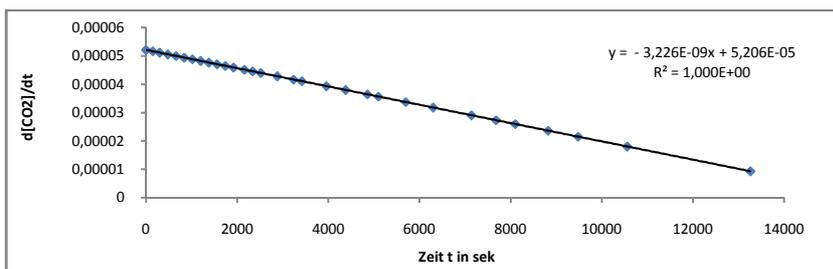
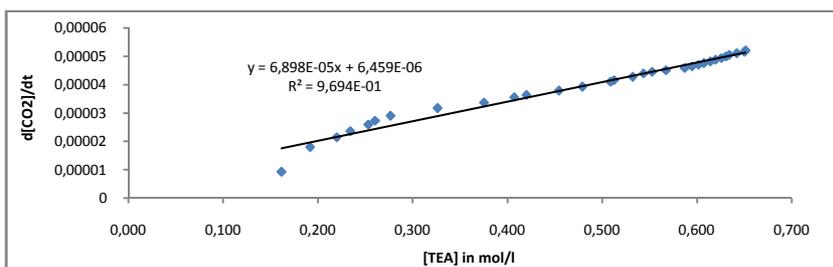
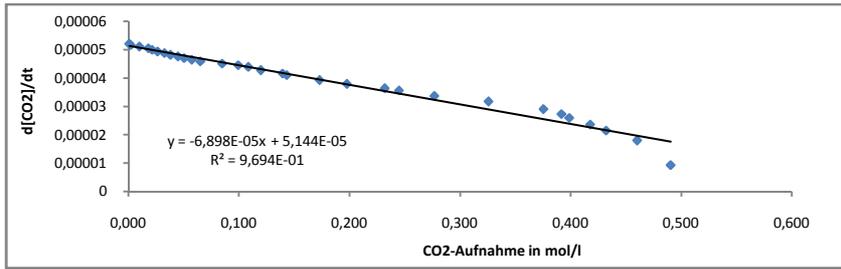


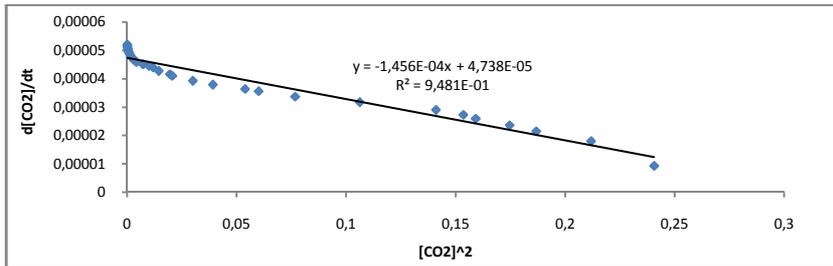
Abbildung 173 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



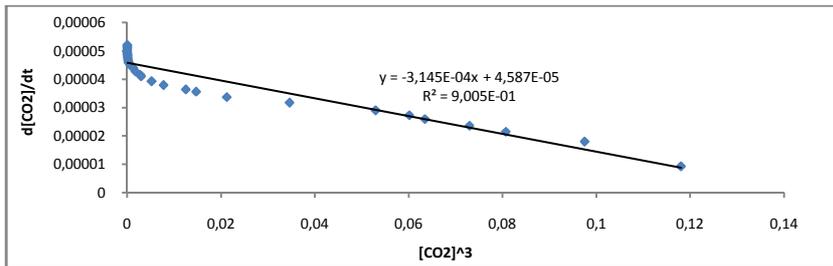
**Abbildung 174** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



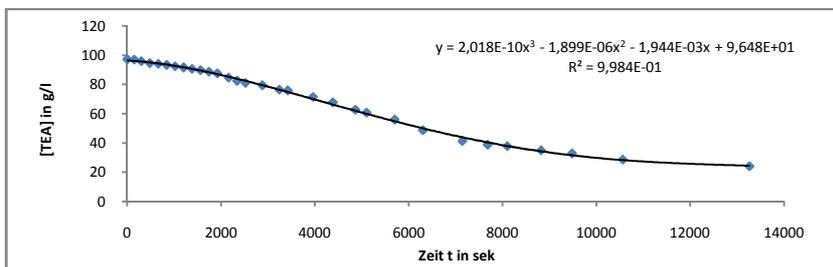
**Abbildung 175** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von TEA in mol/l bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 176** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 177** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 178** Verlauf der Konzentration von TEA in g TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



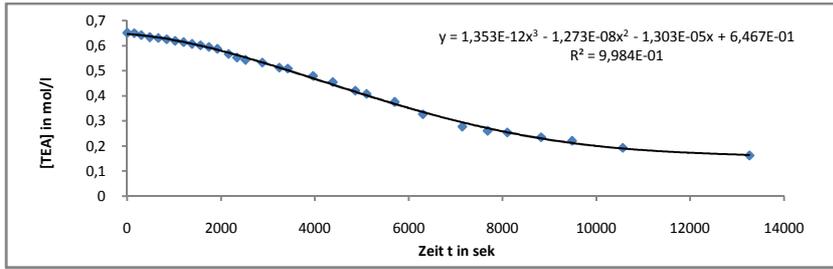


Abbildung 179 Verlauf der Konzentration von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

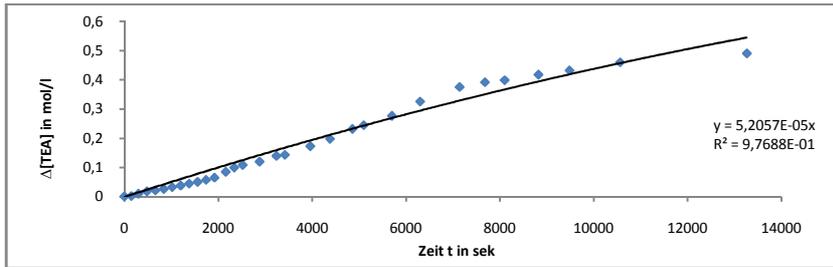


Abbildung 180 Verlauf des Umsatzes von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

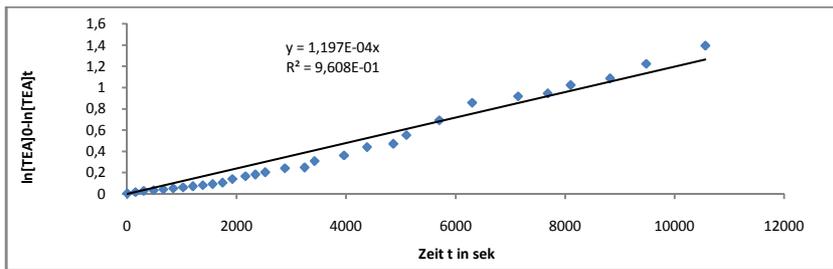


Abbildung 181 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

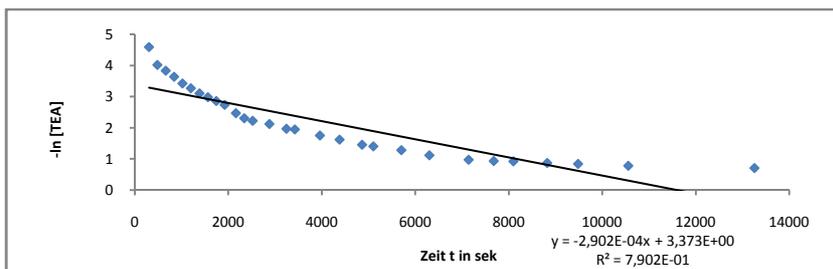
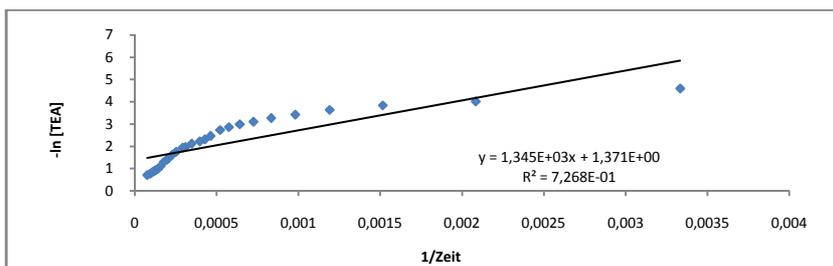
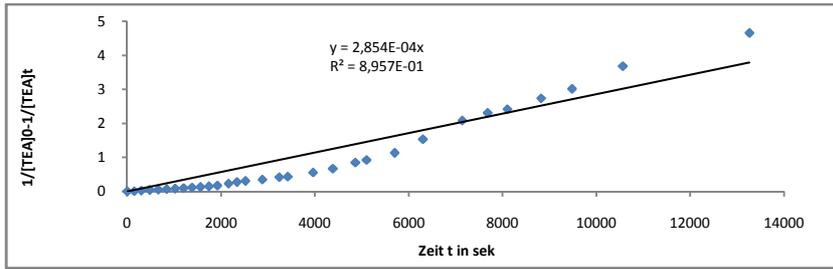


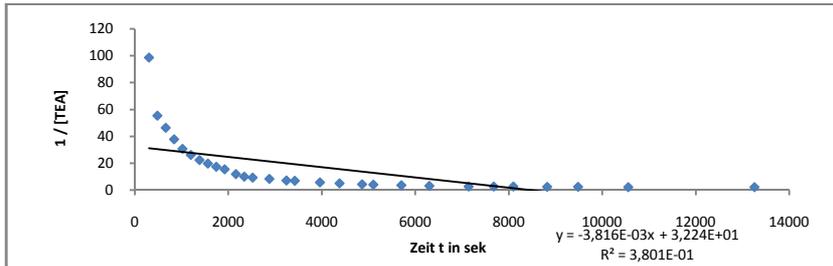
Abbildung 182 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



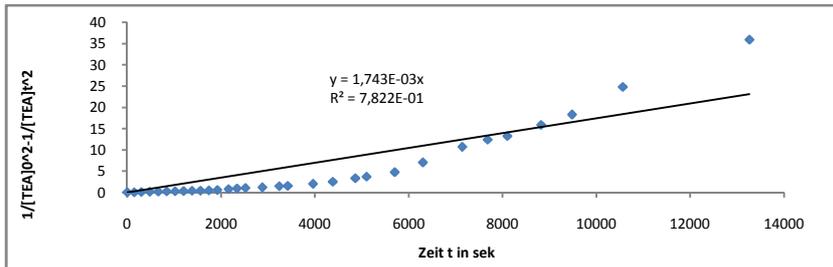
**Abbildung 183** Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



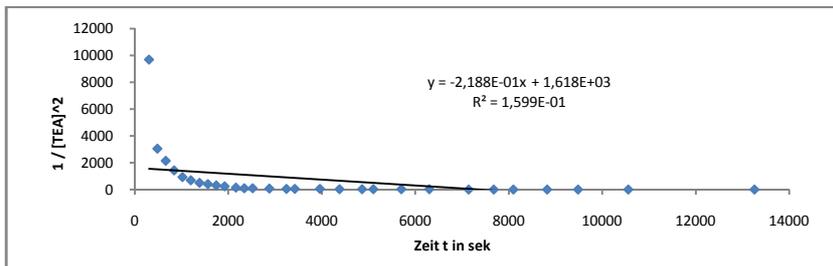
**Abbildung 184** Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



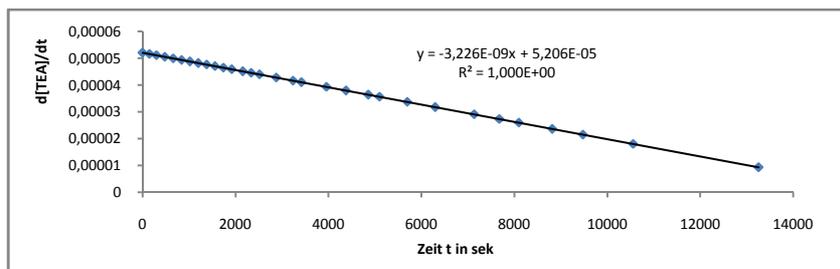
**Abbildung 185** Verlauf des Kehrwerts des Umsatz von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



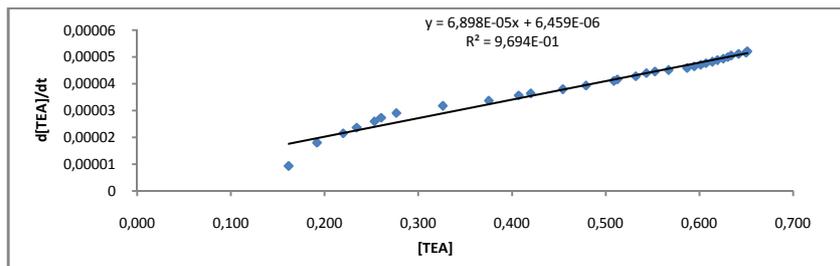
**Abbildung 186** Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 187** Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatz von TEA in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 188** Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TEA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 189** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TEA/(l\*s) gegen die Konzentration von TEA in mol/l bei der Behandlung einer 10,151%igen TEA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

### 1.7.5 Kommentar

TEA ist ein tertiäres Hydroxyalkylamin, das mit CO<sub>2</sub> ausschließlich in Anwesenheit von Wasser reagieren kann und abhängig vom pH dann TEA-Carbonat und/oder TEA-Hydrogencarbonat bildet. Donaldson und Nguyen führen aus, dass tertiäre Amine nicht direkt mit CO<sub>2</sub> reagieren können und als „pseudo catalyst“ die Hydratation von CO<sub>2</sub> beschleunigen.

## 1.8 Das Reaktionssystem Natriumhydroxid/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.8.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten

Natriumhydroxid NaOH ist ein hygroskopischer weißer Feststoff, der bis 1090 g/l bei 20 °C mit Wasser mischbar ist. Wässrige Lösungen des Hydroxids sind sehr stark alkalisch und formal 1-fach protonierbar.

CAS-Nummer 1310-73-2, Molare Masse 39,997 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 2,13 g·cm<sup>-3</sup> (20 °C), Schmelztemperatur 323 °C, pKs 12,25, Spezifische Wärmekapazität Cp 59.66J/mol·K, Standardbildungsenthalpie ΔH<sub>f</sub><sup>°</sup> -427kJ/mol, molare Standardentropie S<sup>°</sup> 64 J/mol·K, freie Gibbs Energie ΔG<sub>f</sub><sup>°</sup> -380.7 kJ/mol

### 1.8.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit Natriumhydroxid

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung

#### Gefahr

#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 290, 314 und P: 280, 301+330+331, 305+351+338, 308+310

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung

#### Ätzend (C)

#### R- und S-Sätze

R: 35 und S: S: (1/2), 26, 37/39, 45

### 1.8.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von NaOH

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 0,708 m%igen NaOH-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt für eine Äquivalentwertigkeit von 0,916 einen pKa-Wert für NaOH bei 25 °C von 12,2.

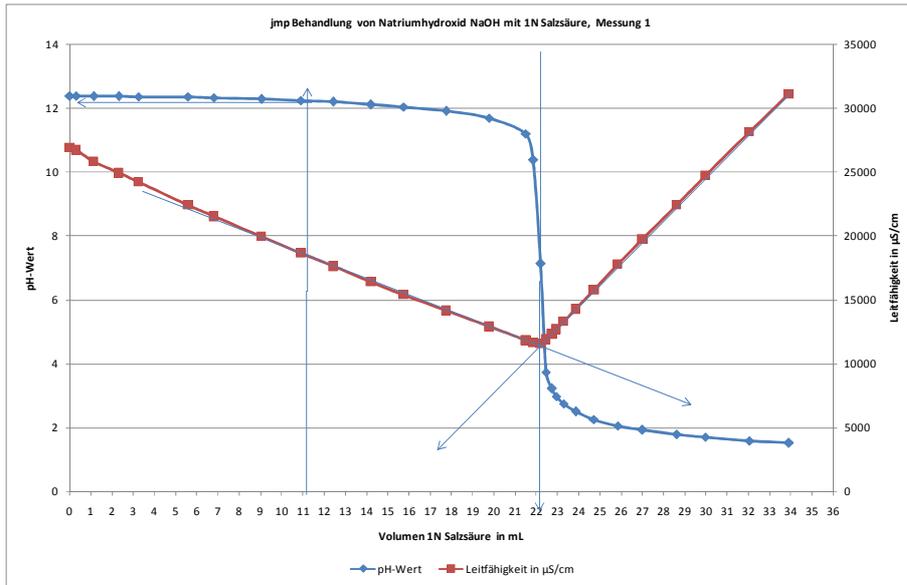


Abbildung 190 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 0,967g Natriumhydroxid in wässriger Lösung mit 1N-Salzsäure bei 25 °C

#### 1.8.4 Behandlung einer 1,432 m%igen NaOH-Lösung in Wasser mit $\text{CO}_2$

Eine 1,43m%ige NaOH-Lösung in Wasser wurde im Grawmikroblasenwäscher mit  $\text{CO}_2$  unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar  $\text{CO}_2$ -Dampfdruck bei RT von pH 12,5 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

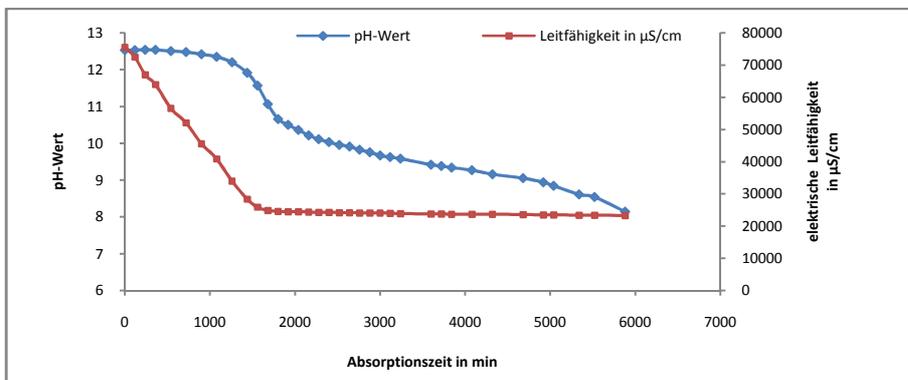


Abbildung 191 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

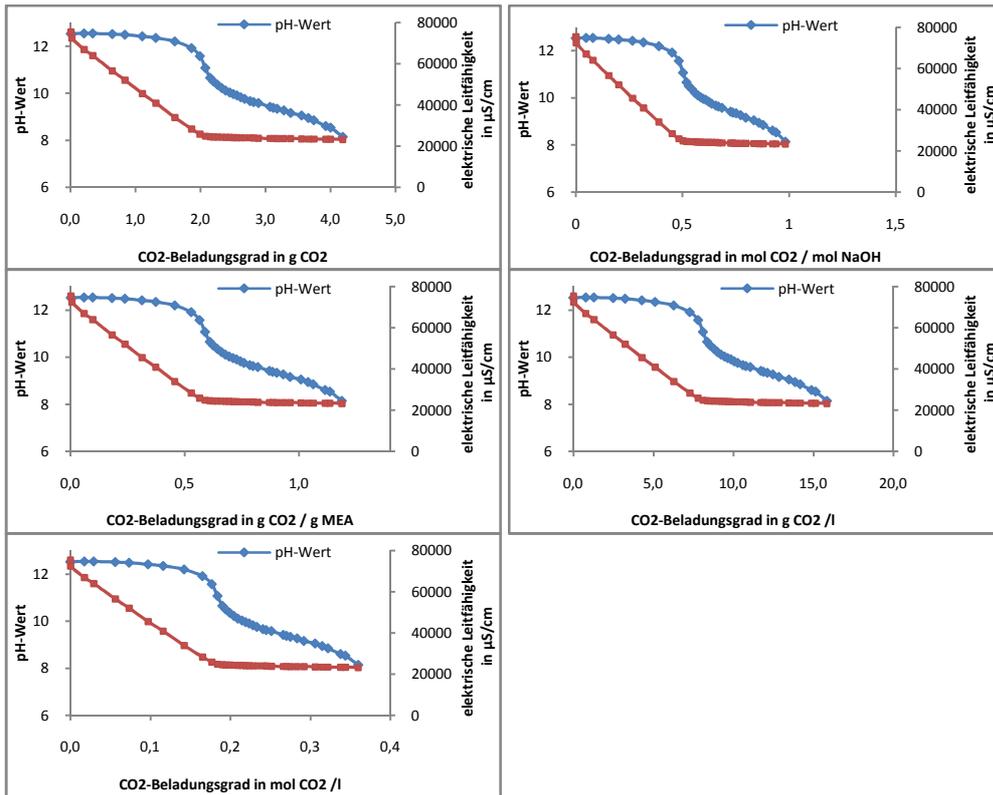


Abbildung 192 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

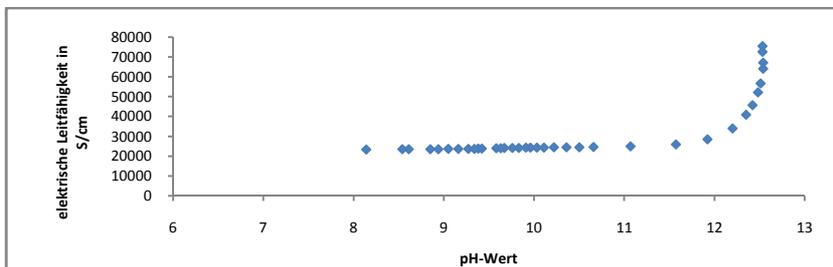


Abbildung 193 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

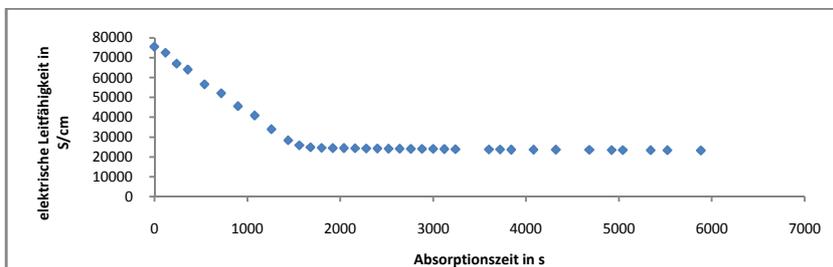


Abbildung 194 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

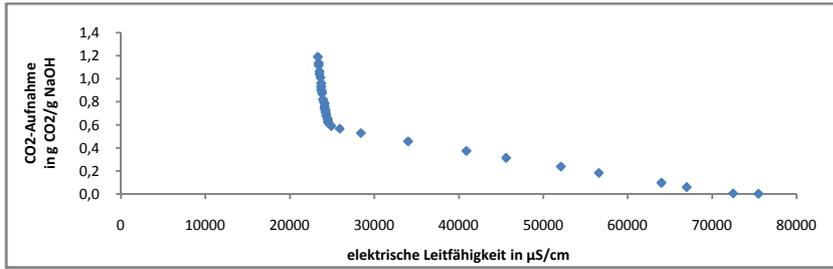


Abbildung 195 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g NaOH gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

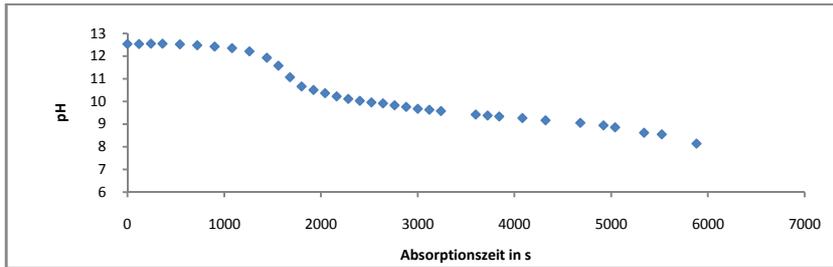


Abbildung 196 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

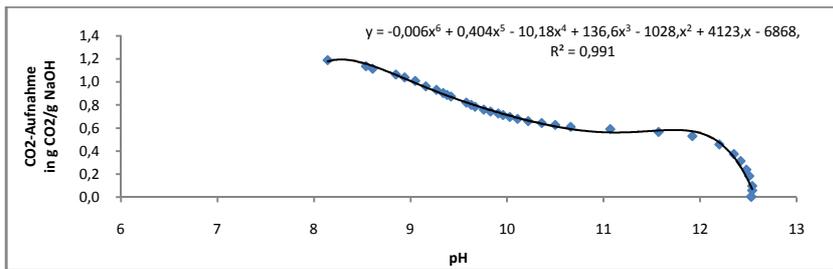


Abbildung 197 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g NaOH gegen den pH bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

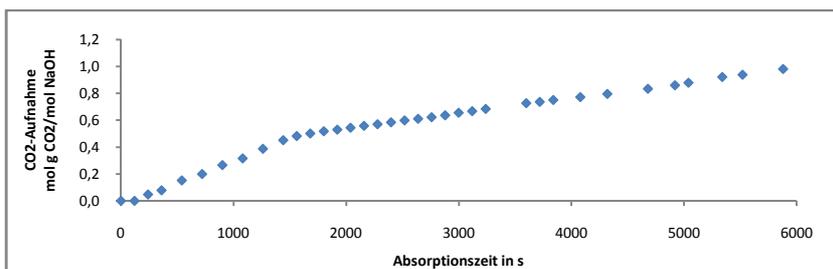


Abbildung 198 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol NaOH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

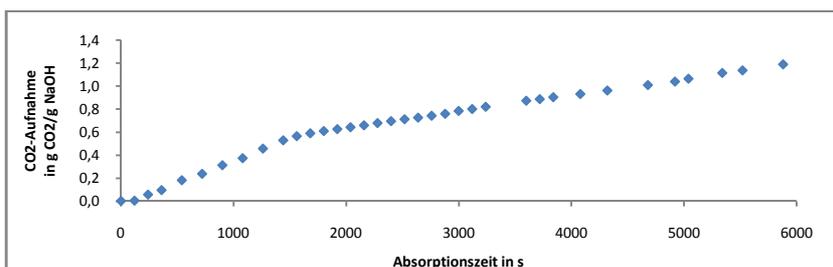


Abbildung 199 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g NaOH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

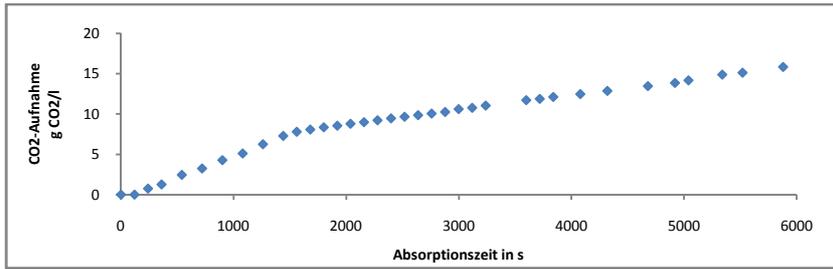


Abbildung 200 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

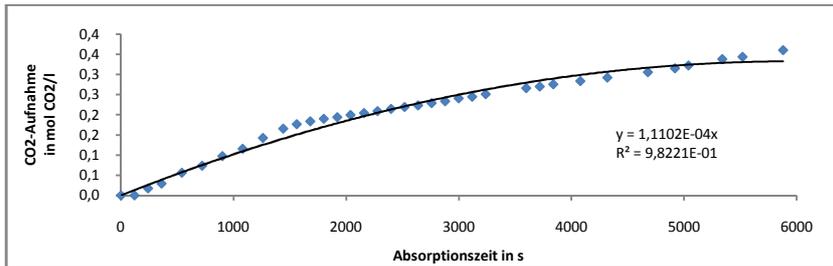


Abbildung 201 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

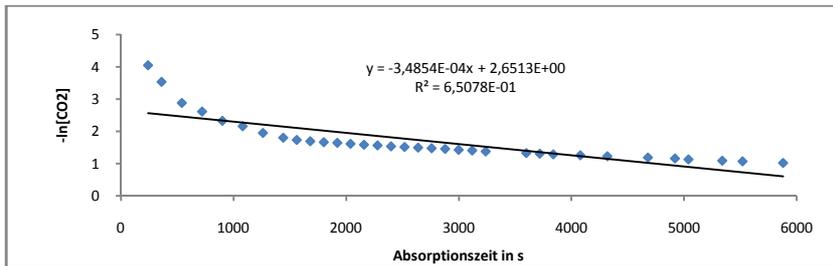


Abbildung 202 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

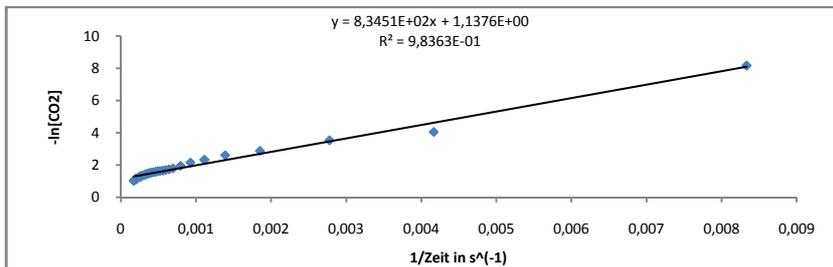


Abbildung 203 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

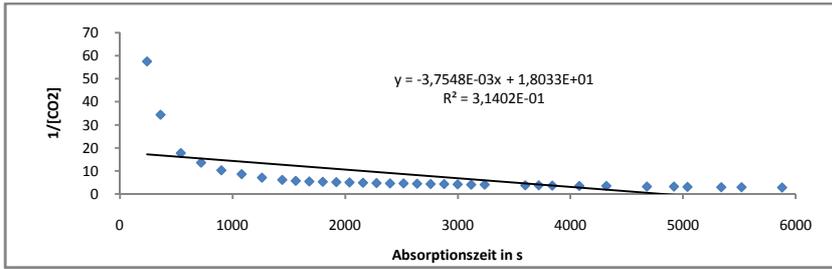


Abbildung 204 Verlauf des Kehrwerts der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

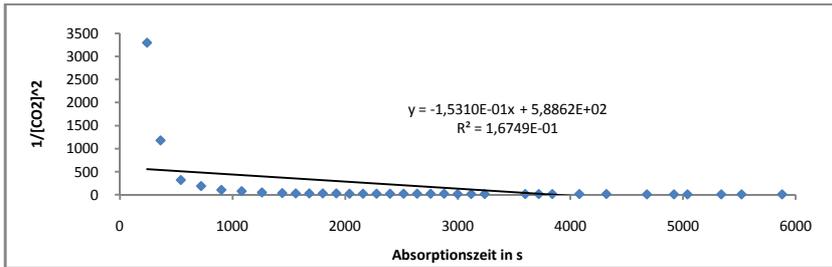


Abbildung 205 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

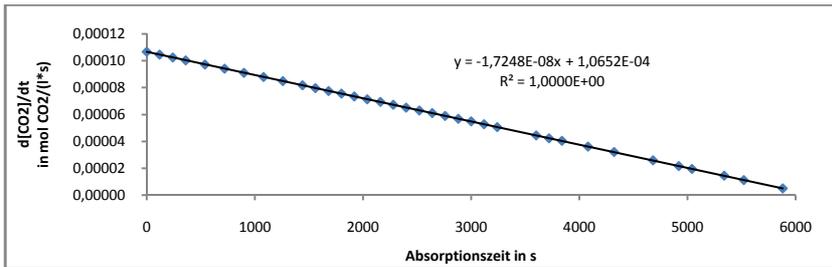


Abbildung 206 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2$ /(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

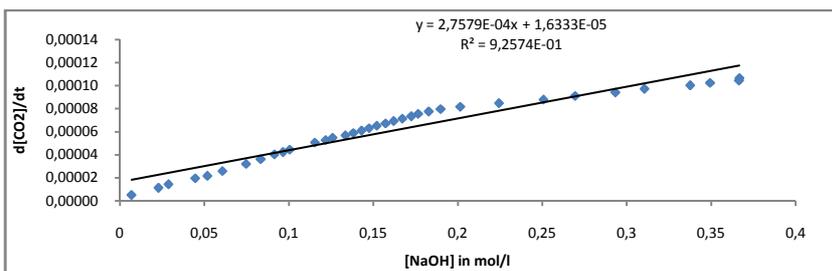


Abbildung 207 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2$ /(l\*s) gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

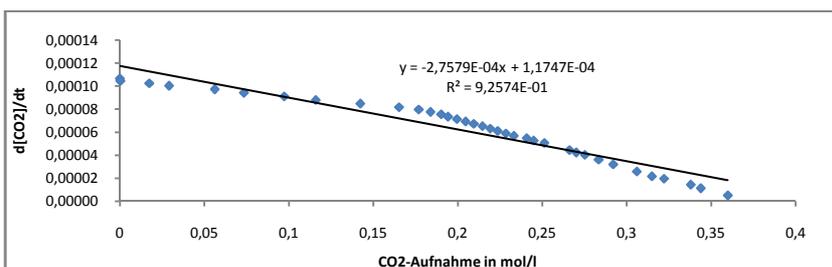


Abbildung 208 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von NaOH in mol/l bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

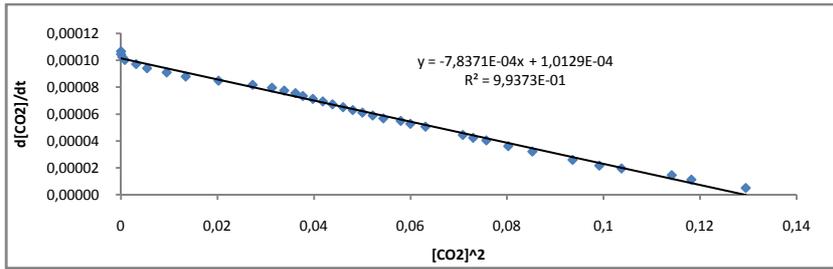


Abbildung 209 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

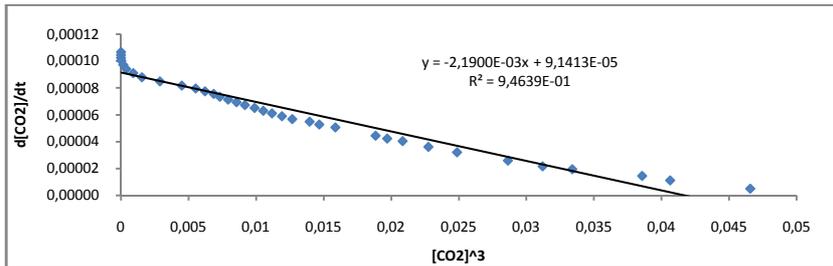


Abbildung 210 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

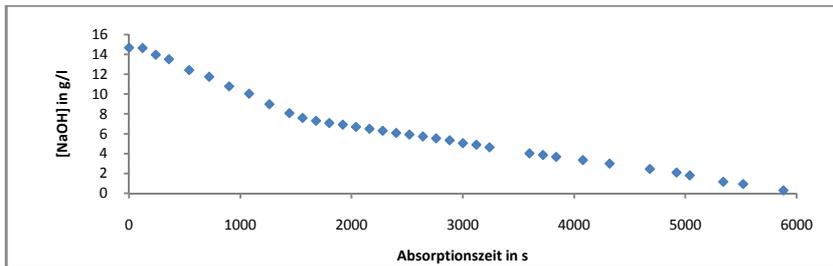


Abbildung 211 Verlauf der Konzentration von NaOH in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

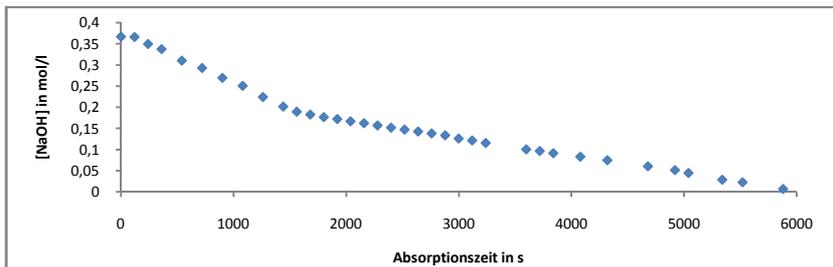
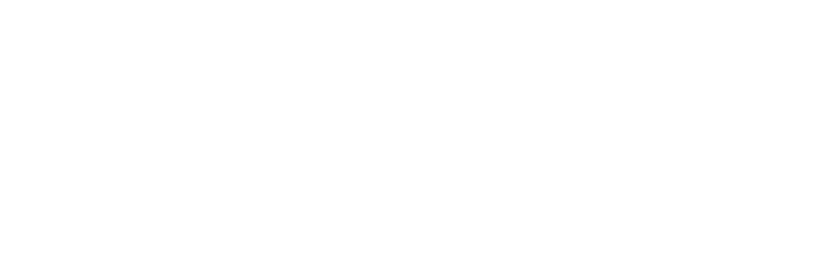


Abbildung 212 Verlauf der Konzentration von NaOH in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



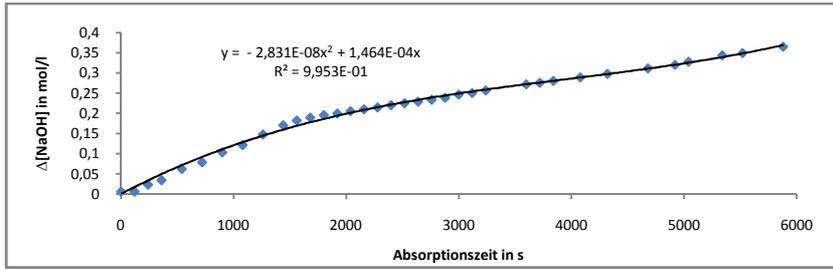


Abbildung 213 Verlauf des Umsatzes von NaOH in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

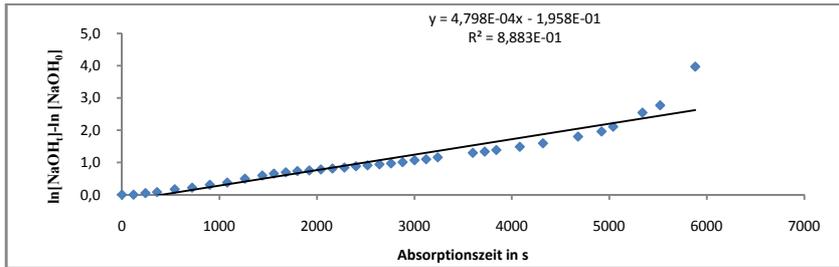


Abbildung 214 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

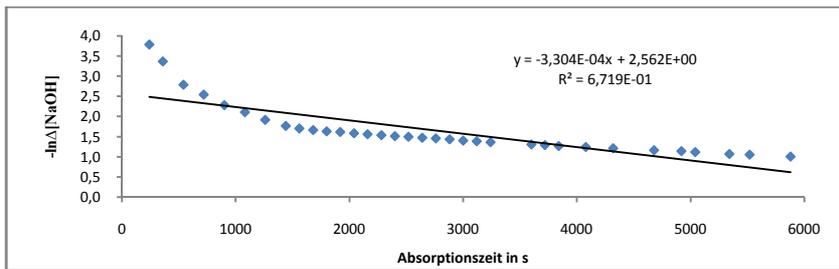


Abbildung 215 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von NaOH in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

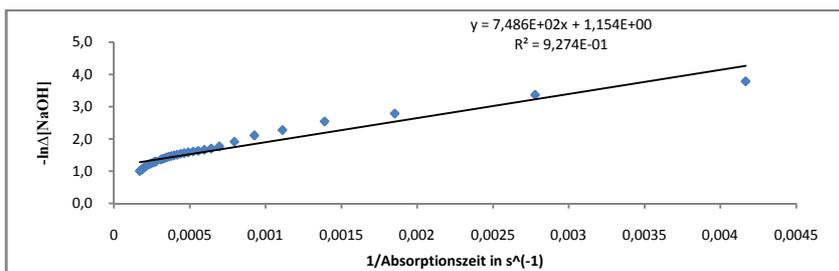


Abbildung 216 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von NaOH in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

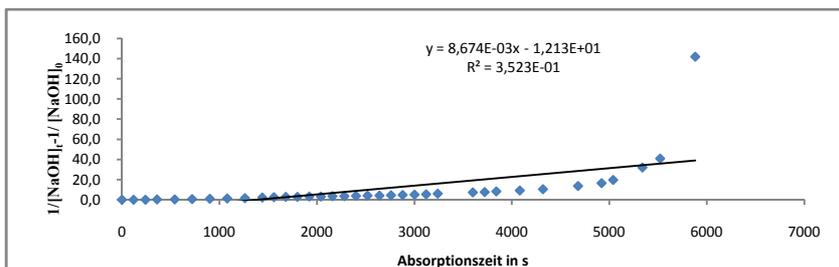


Abbildung 217 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

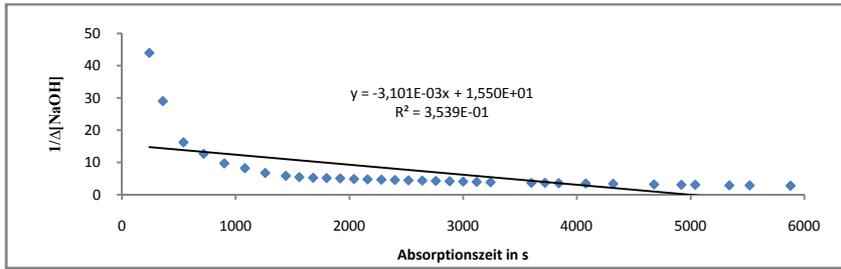


Abbildung 218 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von NaOH in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

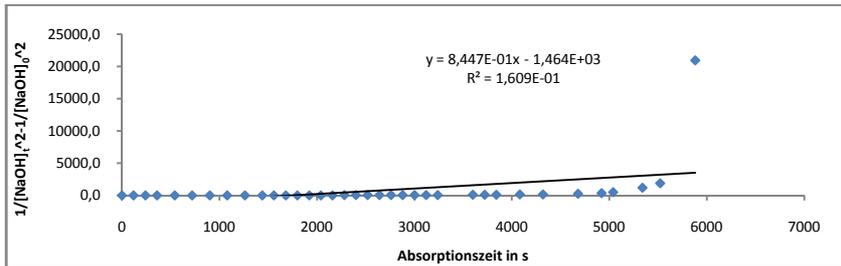


Abbildung 219 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

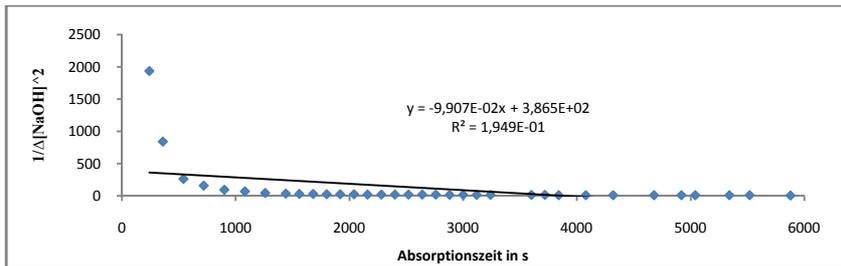


Abbildung 220 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von NaOH in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

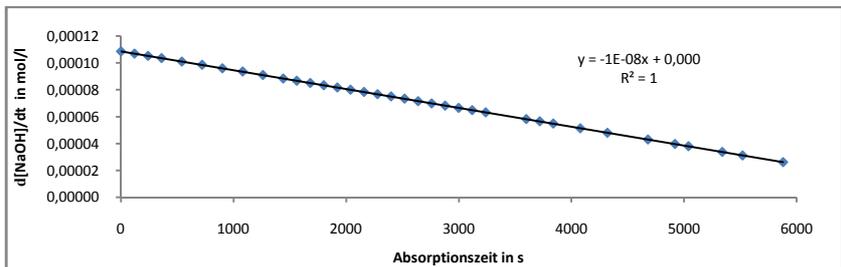
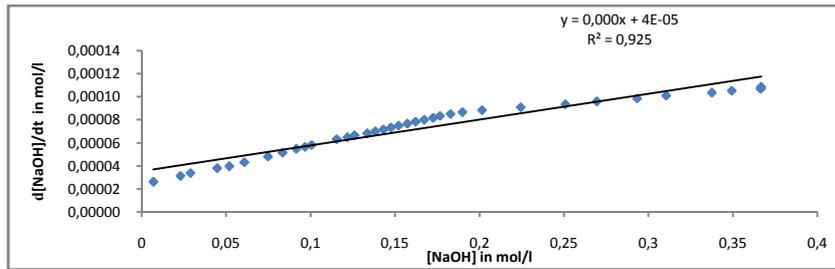


Abbildung 221 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol NaOH/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 222** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol NaOH/(l\*s) gegen die Konzentration von NaOH in mol/l bei der Behandlung einer 1,432 m%igen Lösung von Natriumhydroxid in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

## 1.9 Das Reaktionssystem Natriumcarbonat/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.9.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten

Natriumcarbonat, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ist ein hygroskopischer kristalliner Feststoff, der bis 217 g/l bei 20 °C mit Wasser mischbar ist. Wässrige Lösungen des Carbonats sind alkalisch und formal 2-fach protonierbar (CAS-Nummer 141-43-5, Molare Masse 105,99 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 2,53 g·cm<sup>-3</sup> (20 °C), Schmelztemperatur 854 °C, Dampfdruck 0,5 hPa (20 °C), pKs 9,5, Spezifische Wärmekapazität Cp 112.3 J/mol·K, Standardbildungsenthalpie ΔHf° -1130,7 kJ/mol, molare Standardentropie S° 298135 J/mol·K, freie Gibbs Energie ΔfG° -1044.4 kJ/mol).

### 1.9.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit Natriumcarbonat

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung

#### Achtung

#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 319 und P: 260, 305+351+338

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung

#### Reizend (Xi)

#### R- und S-Sätze

R: 36 und S: S: (2), 22, 26

### 1.9.3 Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 3,18m%ige Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub> von pH 12,5 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

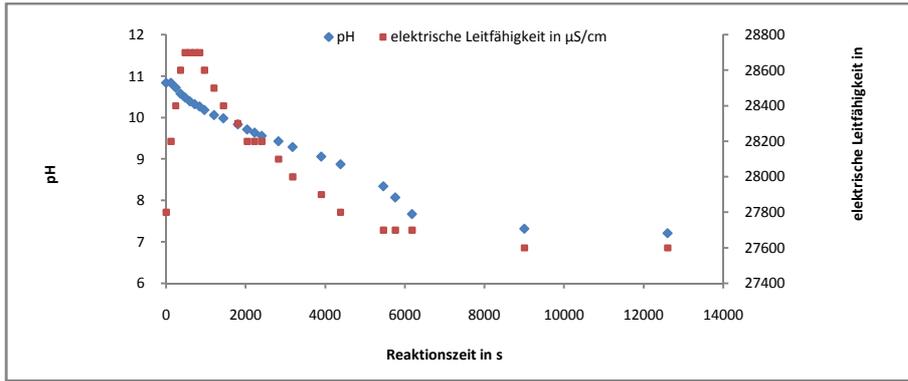


Abbildung 223 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

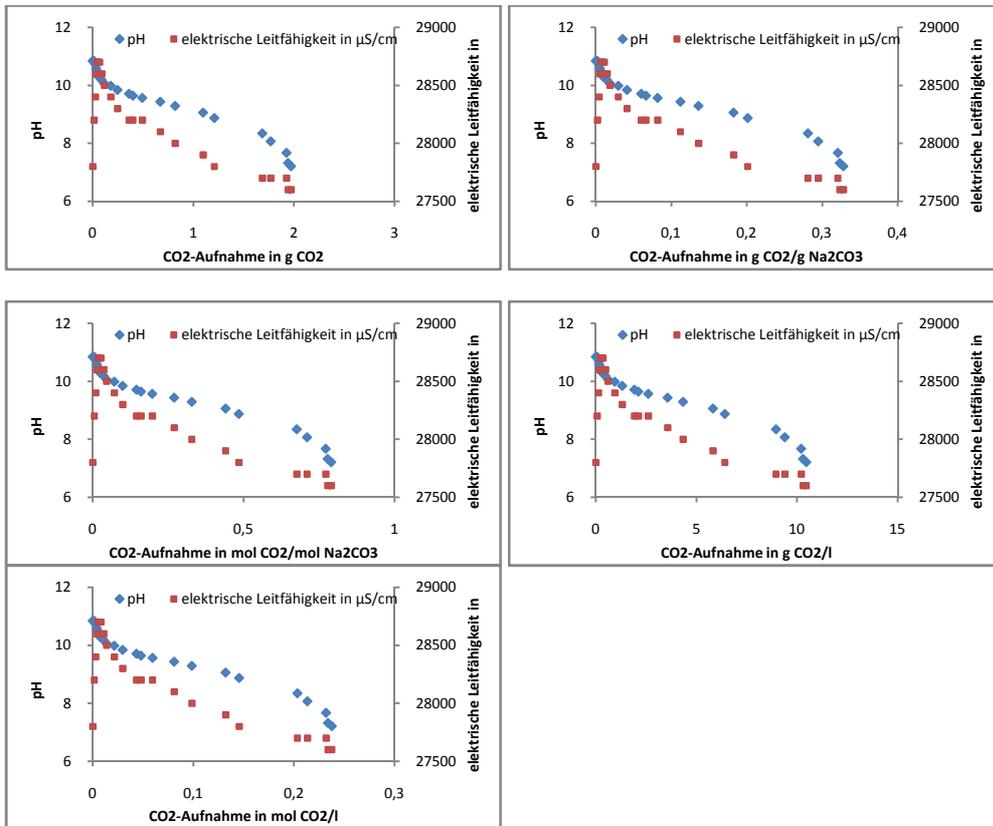


Abbildung 224 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

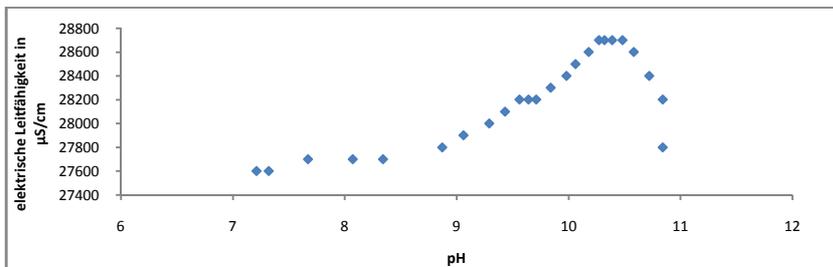


Abbildung 225 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

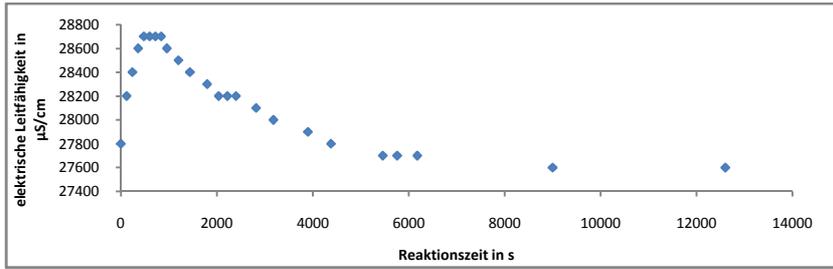


Abbildung 226 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

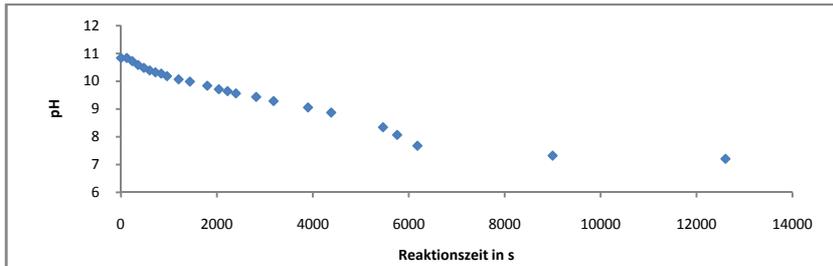


Abbildung 227 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

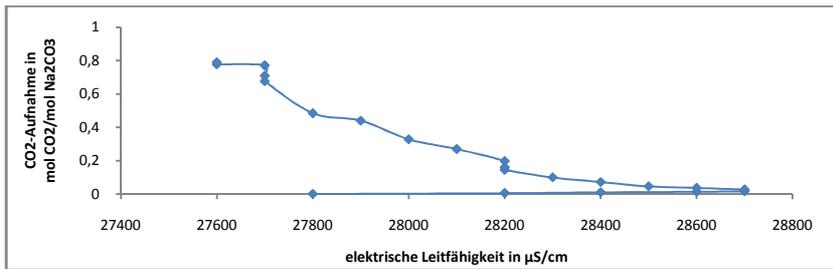


Abbildung 228 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

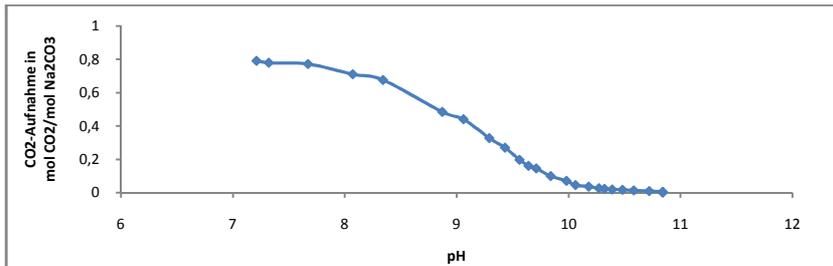


Abbildung 229 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gegen den pH bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

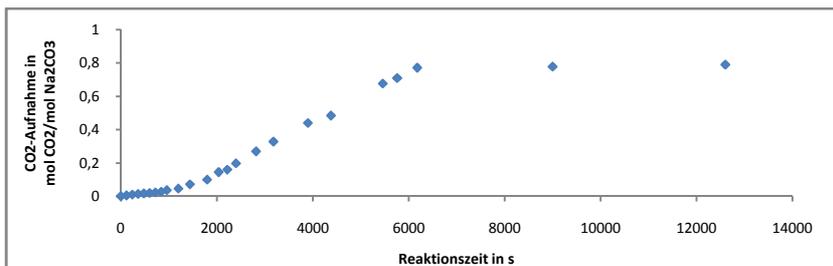


Abbildung 230 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

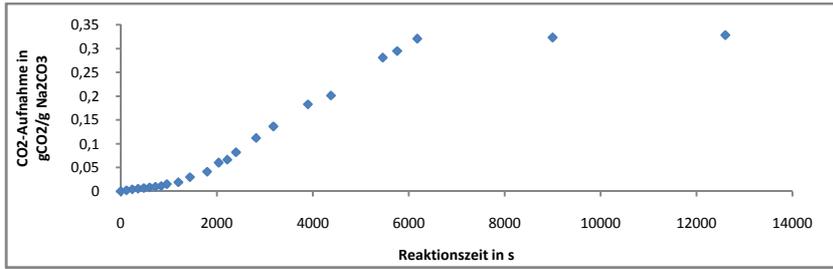


Abbildung 231 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

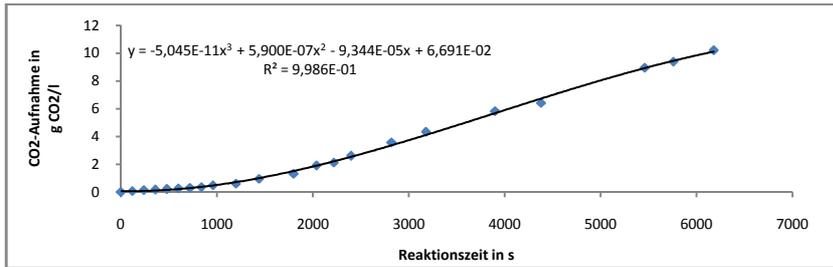


Abbildung 232 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

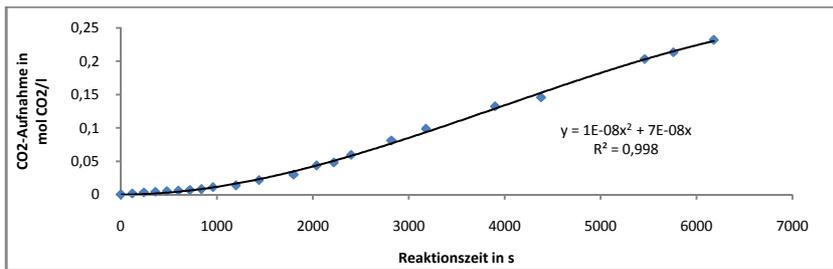


Abbildung 233 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

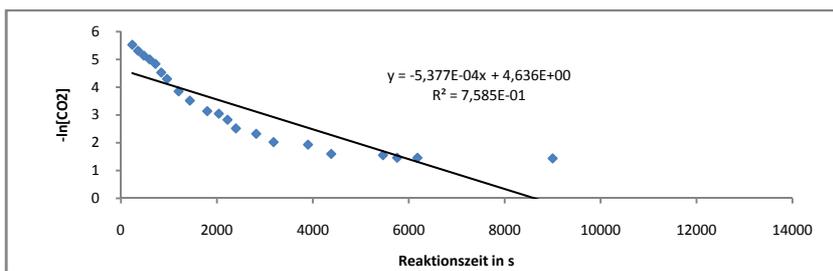
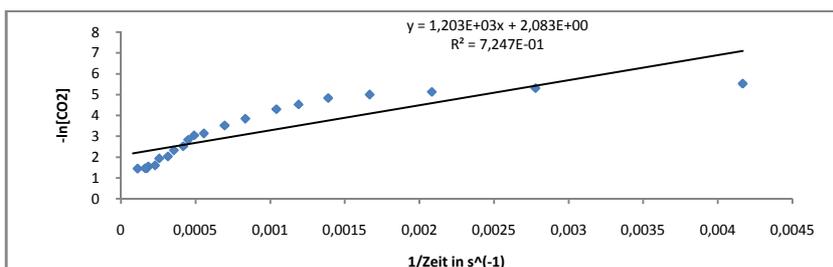
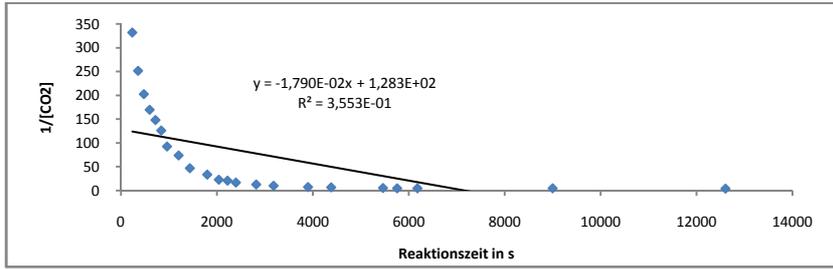


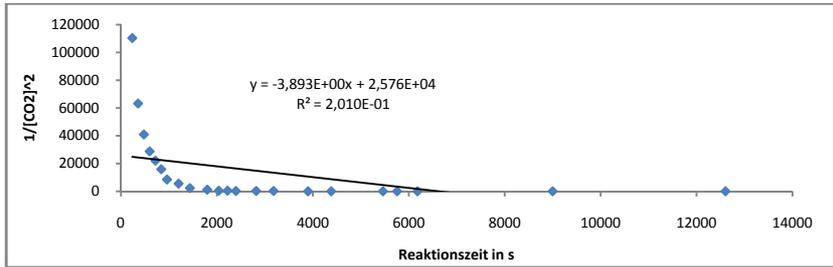
Abbildung 234 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



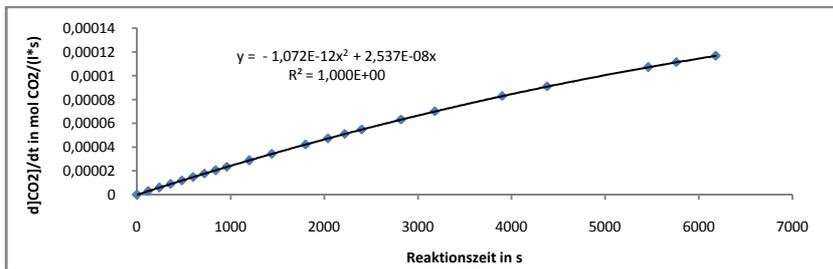
**Abbildung 235** Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



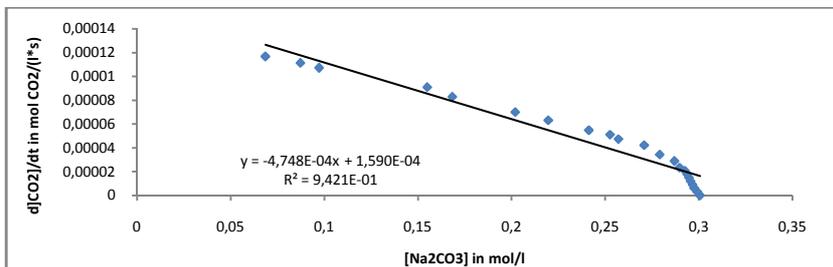
**Abbildung 236** Verlauf des Kehrwerts der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 237** Verlauf des Kehrwerts der quadrierten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 238** Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 239** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) g/l gegen die Konzentration von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in mol/l bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

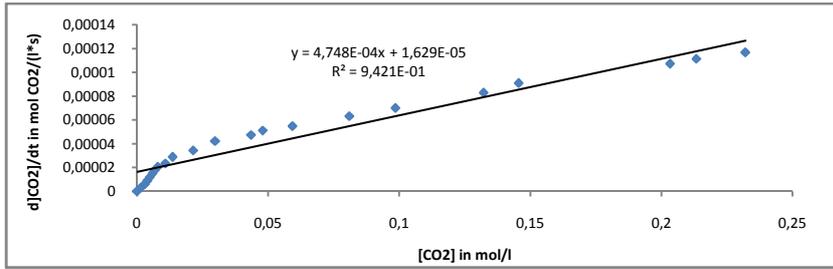


Abbildung 240 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) g/l gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

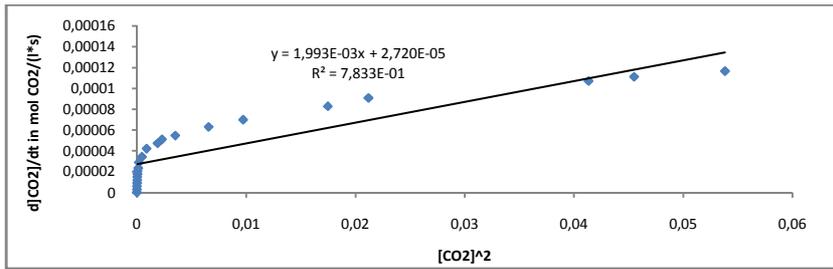


Abbildung 241 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) g/l gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

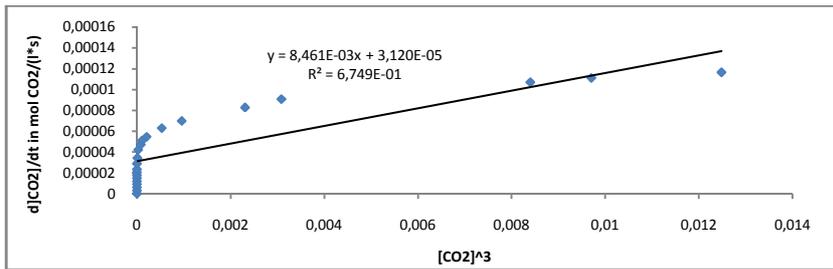


Abbildung 242 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) g/l gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

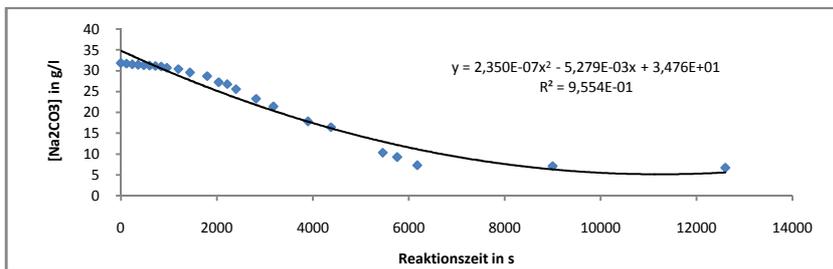


Abbildung 243 Verlauf der Konzentration von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

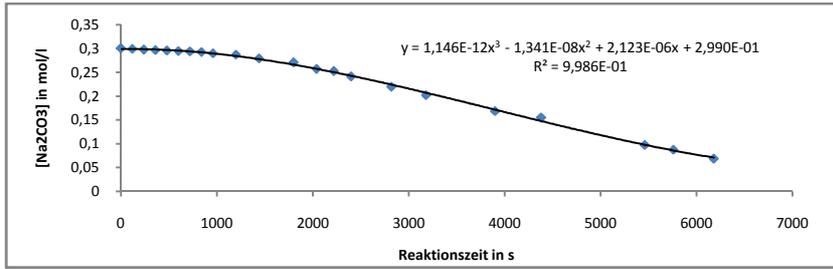


Abbildung 244 Verlauf der Konzentration von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

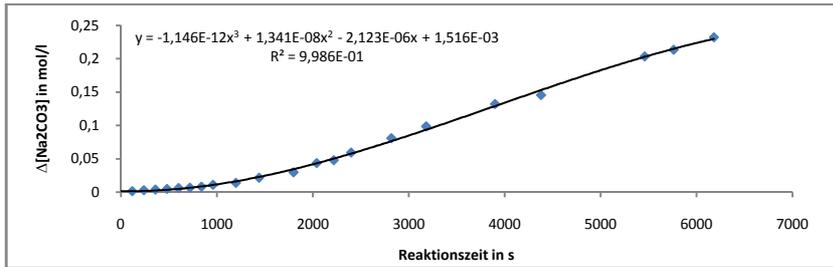


Abbildung 245 Verlauf des Umsatzes von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

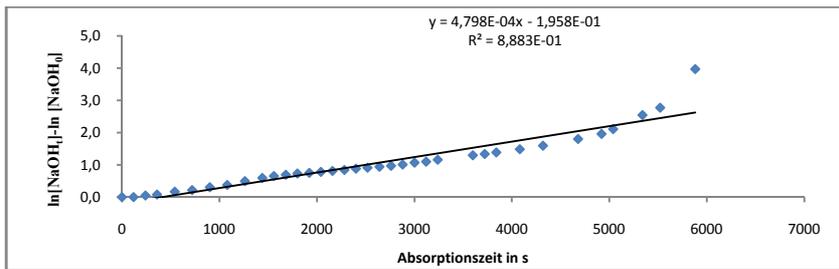


Abbildung 246 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

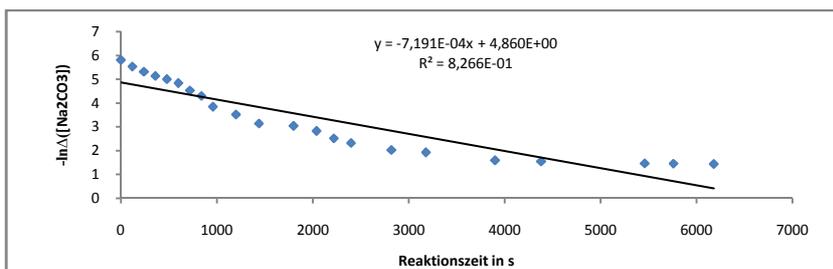
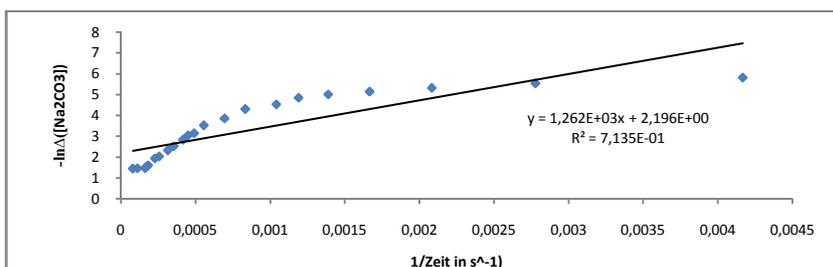
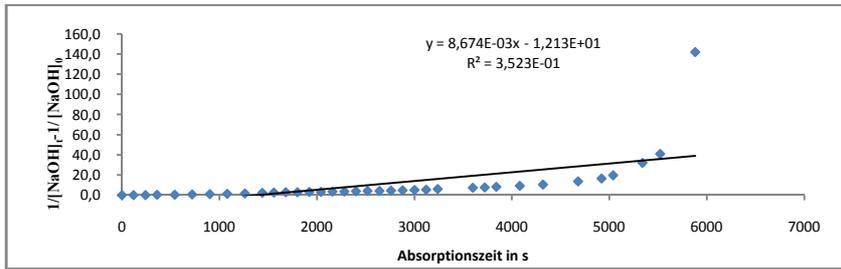


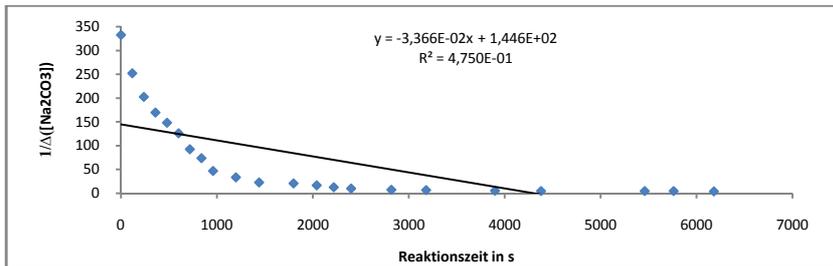
Abbildung 247 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen



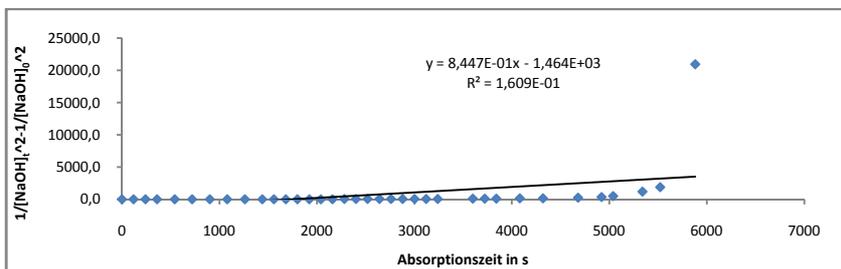
**Abbildung 248** Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen



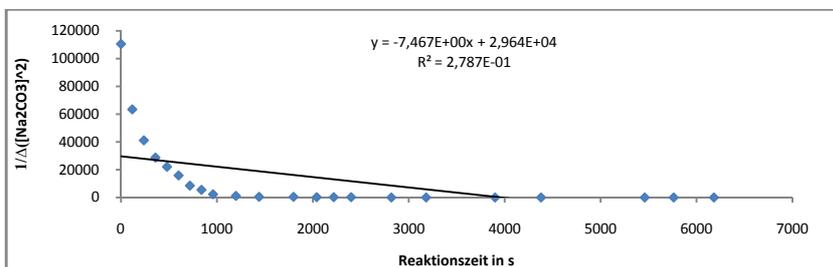
**Abbildung 249** Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen.



**Abbildung 250** Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen



**Abbildung 251** Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen.



**Abbildung 252** Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

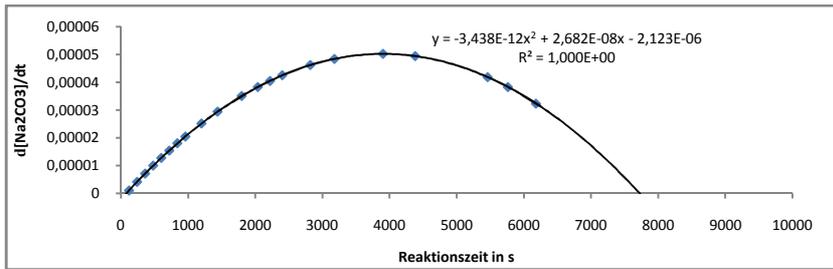


Abbildung 253 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

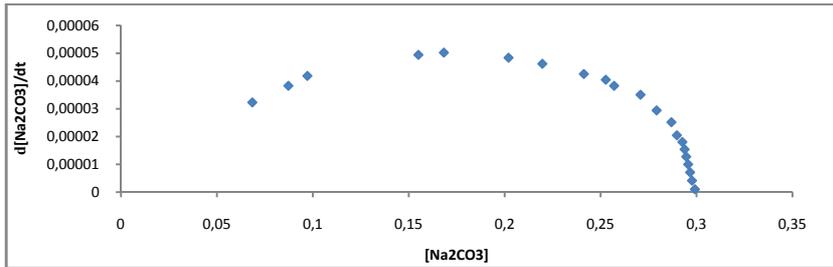


Abbildung 254 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in mol/l bei der Behandlung einer 3,185 m%igen Lösung von Natriumcarbonat in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

## 1.10 Das Reaktionssystem tert. Pentylamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.10.1 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TPA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer TPA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von **1,947** die zwei pKs-Wert 10,8 (Literaturwert = **10,08**).

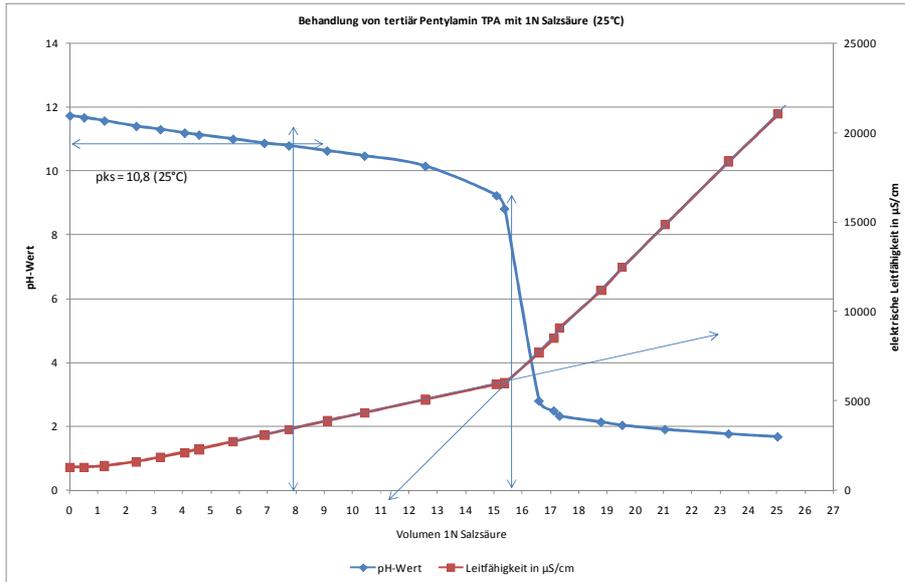


Abbildung 255 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,497 g TPA in verdünnter wässriger Lösung mit 1N-Salzsäure bei 25 °C

### 1.10.2 Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 2,85 m%ige TPA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,8 bis zur Gleichgewichtseinstellung behandelt.

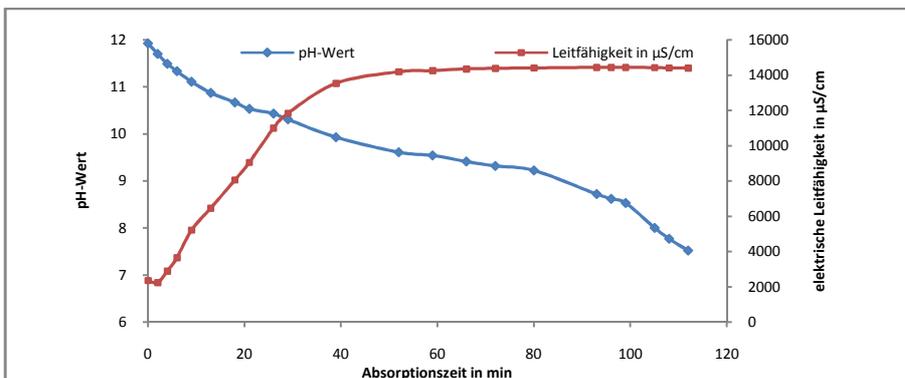


Abbildung 256 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

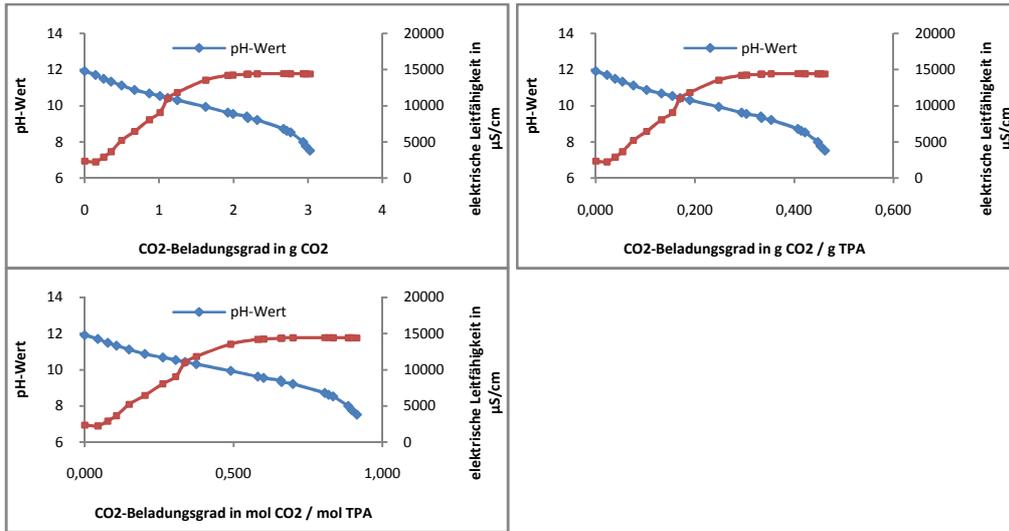


Abbildung 257 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

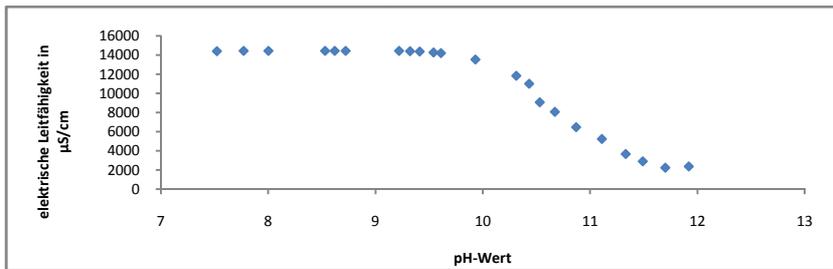


Abbildung 258 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

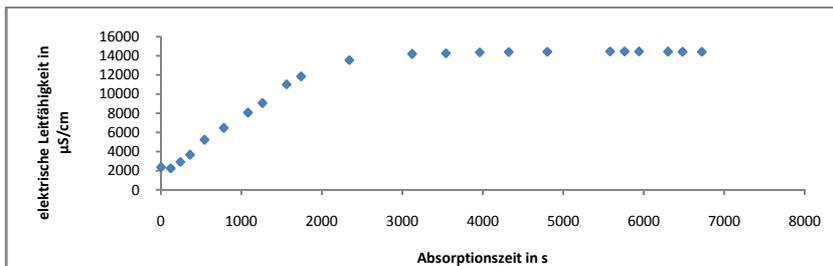


Abbildung 259 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

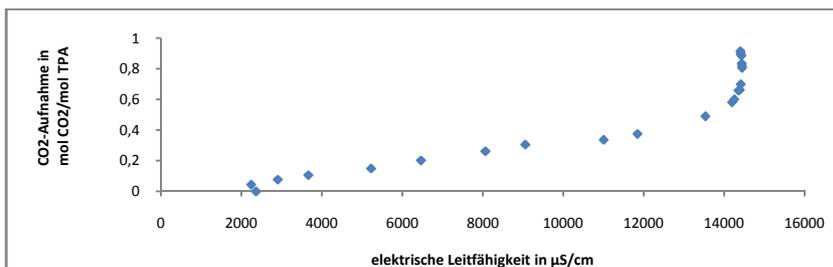


Abbildung 260 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TPA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

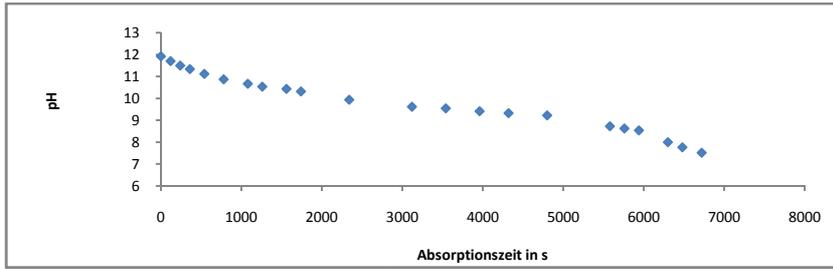


Abbildung 261 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

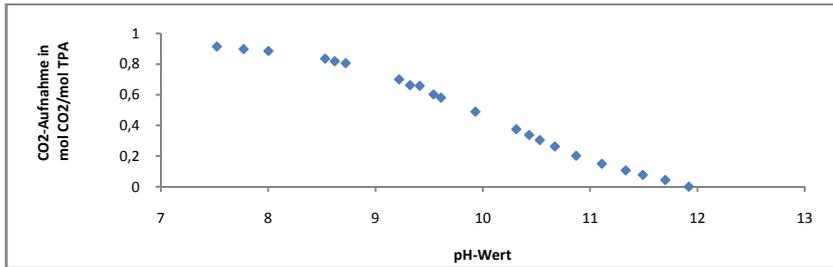


Abbildung 262 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TPA gegen den pH bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

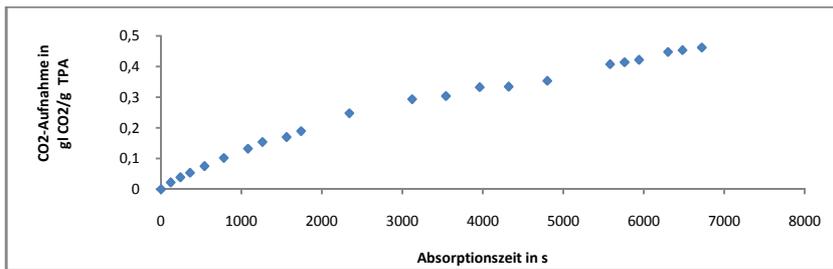


Abbildung 263 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g TPA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

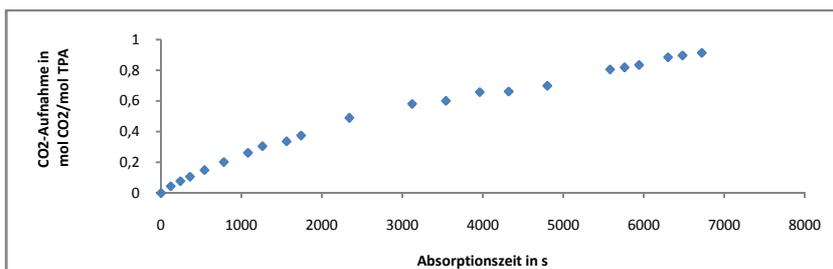


Abbildung 264 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TPA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

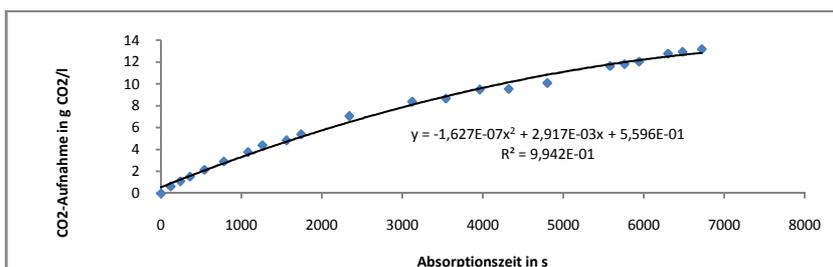


Abbildung 265 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

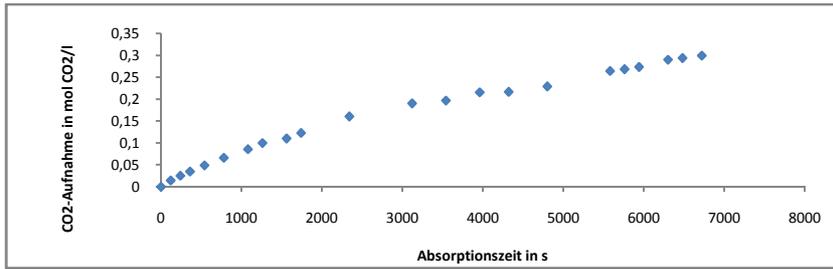


Abbildung 266 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

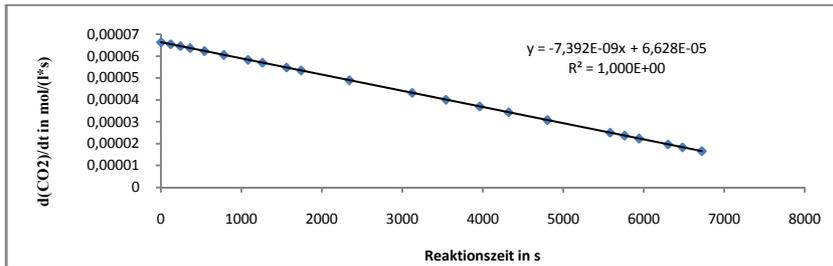


Abbildung 267 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

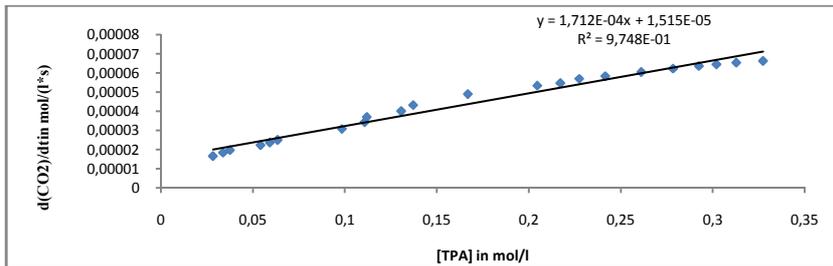


Abbildung 268 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

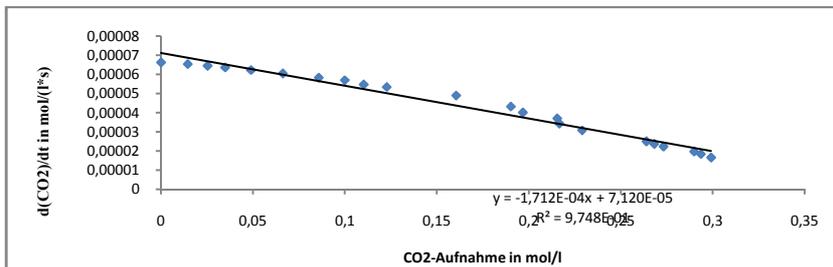


Abbildung 269 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

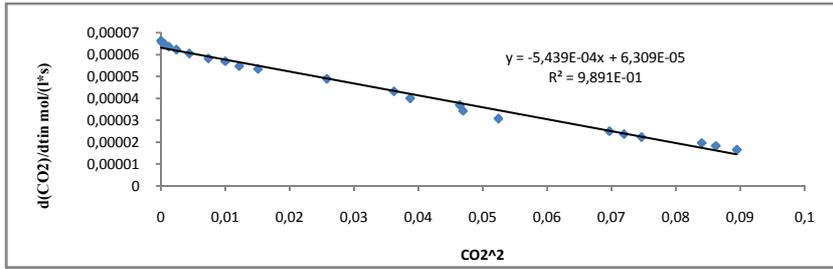


Abbildung 270 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2$ /(l\*s) gegen die quadrierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

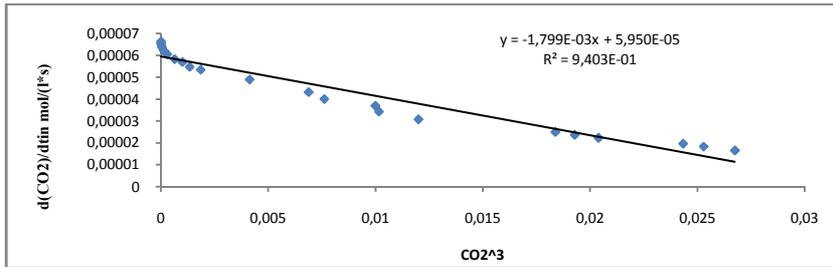


Abbildung 271 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2$ /(l\*s) gegen die kubierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

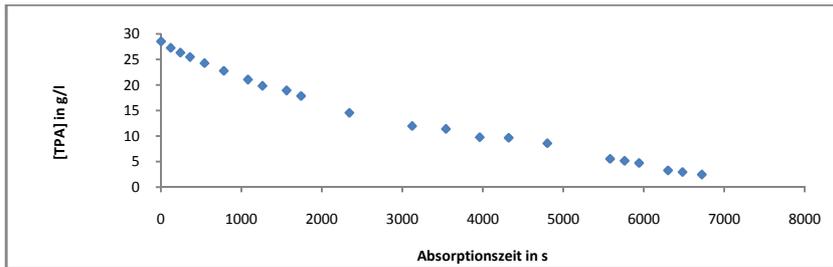


Abbildung 272 Verlauf der Konzentration von TPA in g  $\text{CO}_2$ /l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

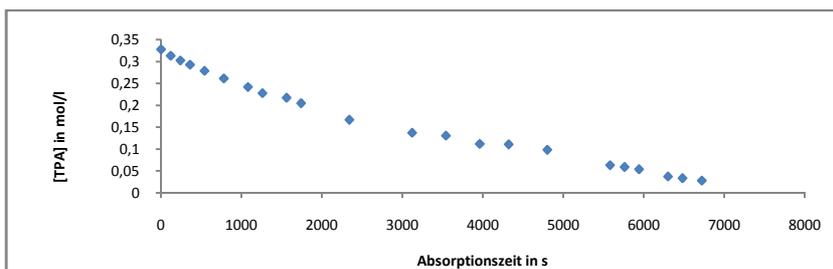


Abbildung 273 Verlauf der Konzentration von TPA in mol  $\text{CO}_2$ /l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

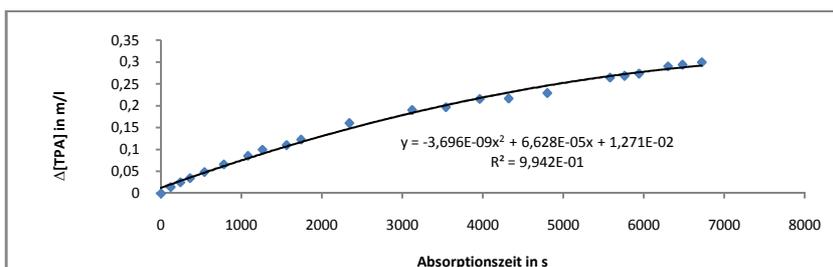


Abbildung 274 Verlauf des Umsatzes von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

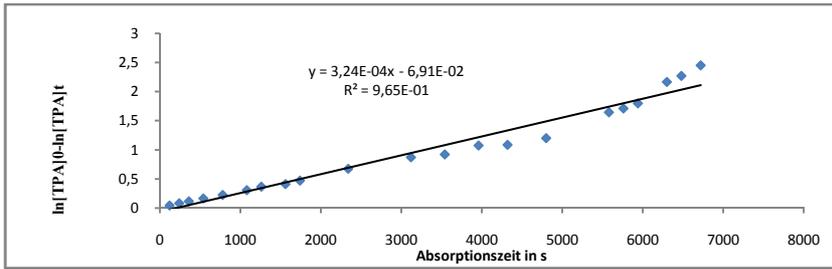


Abbildung 275 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

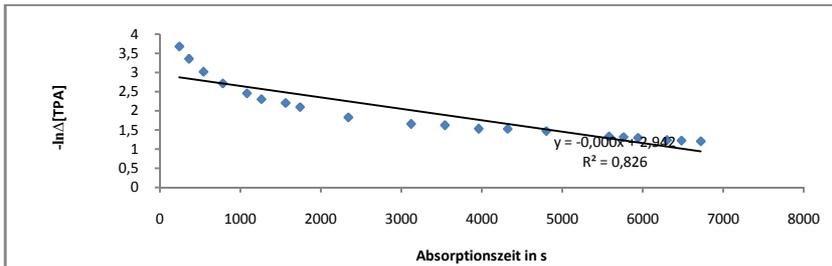


Abbildung 276 Verlauf des neg. Logarithmus des Umsatzes von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

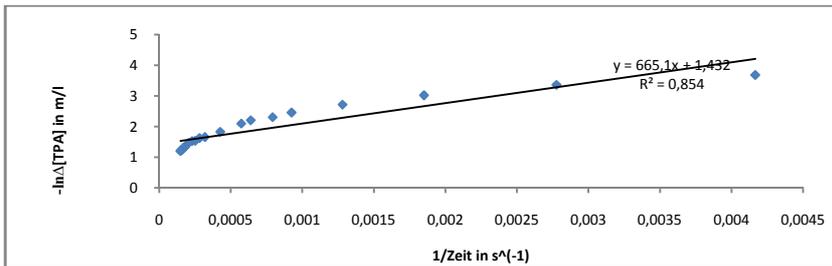


Abbildung 277 Korrelation des neg. Logarithmus des Umsatzes von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

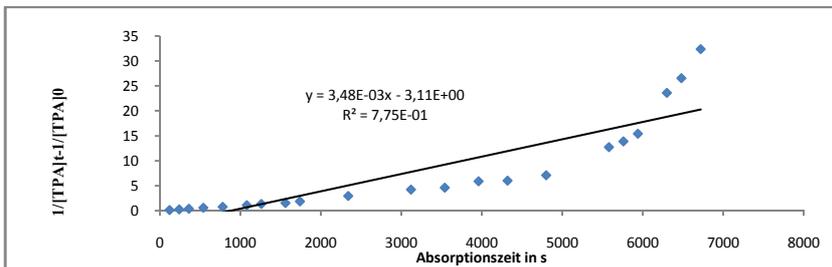


Abbildung 278 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

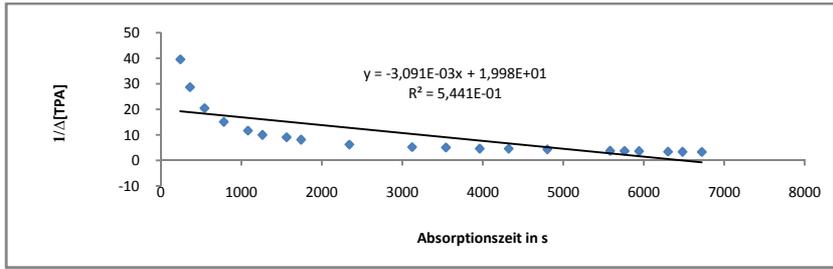


Abbildung 279 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

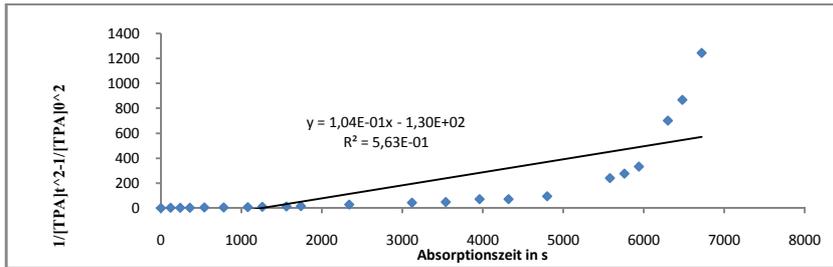


Abbildung 280 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

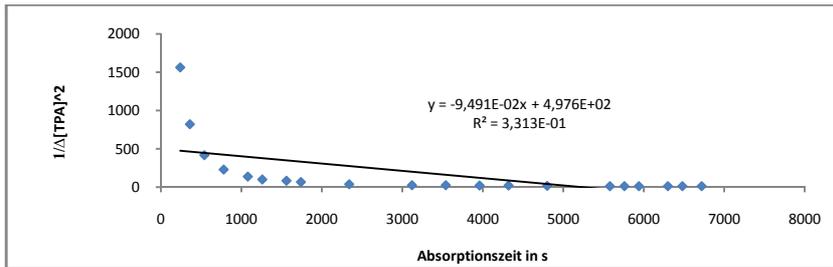


Abbildung 281 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von TPA in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

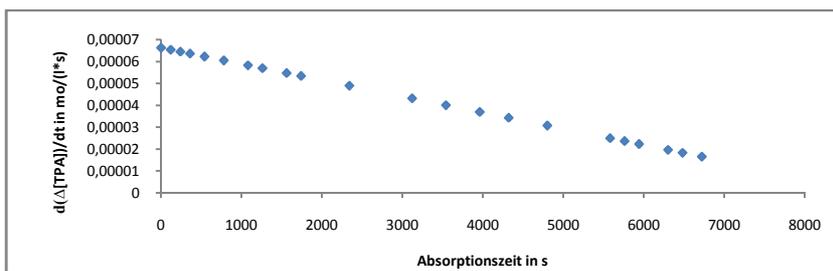
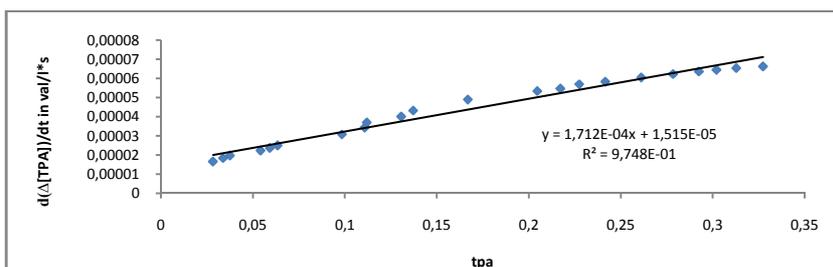


Abbildung 282 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TPA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 283** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TPA/(l\*s) gegen die Konzentration von TPA bei der Behandlung einer 2,85 m%igen TPA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

## 1.11 Das Reaktionssystem Monomethylethylendiamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.11.1 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MMEDA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer MMEDA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von 1,947 die zwei pKs-Wert 9,8 und 7,0 (Literaturwerte = 10,08 und 6,99).

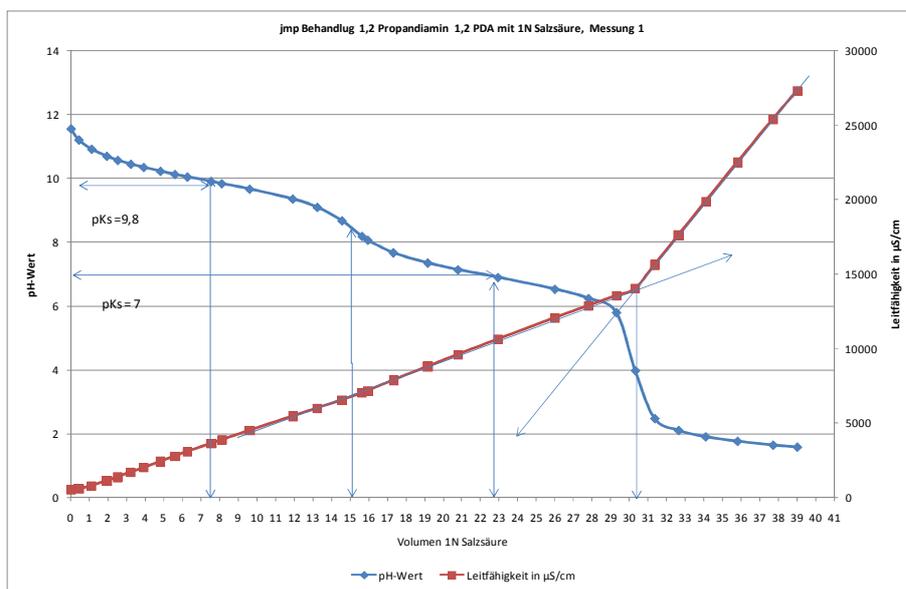


Abbildung 284 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,126g MMEDA in verdünnter wässriger Lösung mit 1N Salzsäure bei 25 °C

### 1.11.2 Behandlung einer 2,724 m%igen MMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 2,724 m%ige MMEDA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,8 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

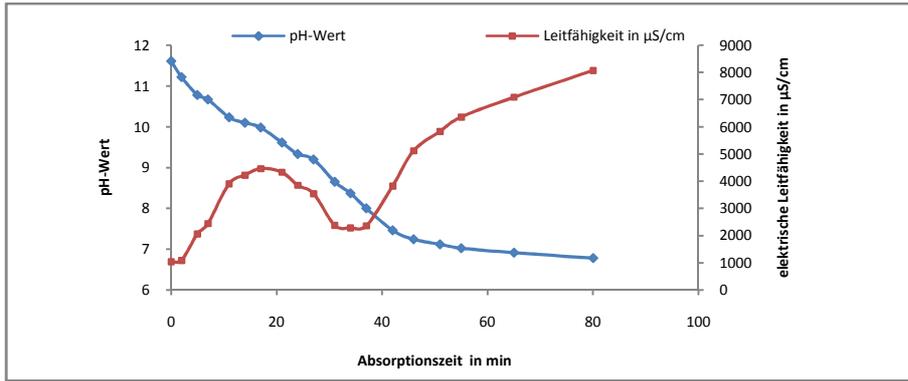


Abbildung 285 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

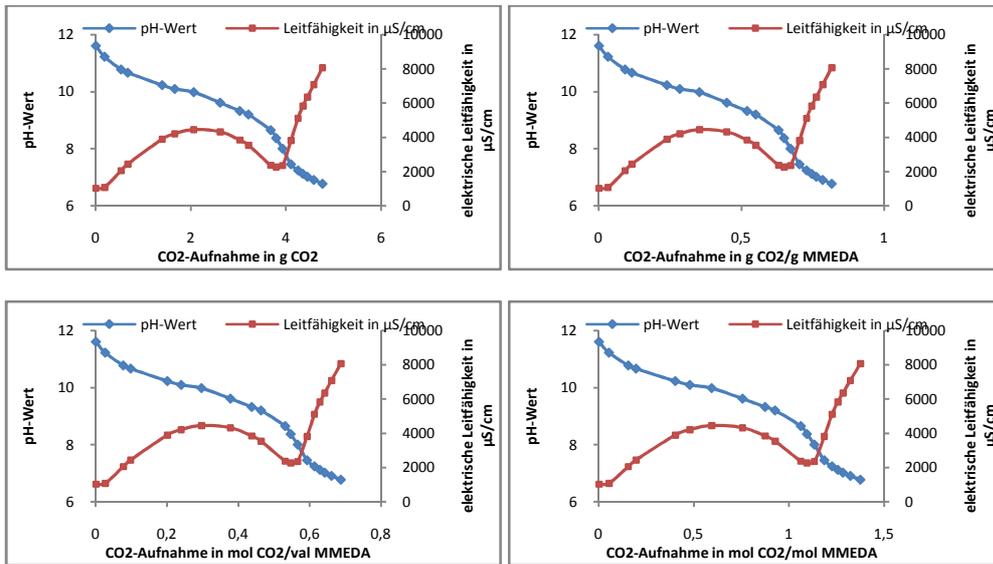


Abbildung 286 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

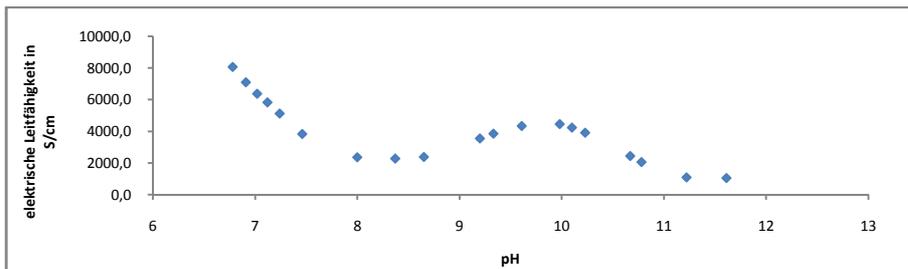


Abbildung 287 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

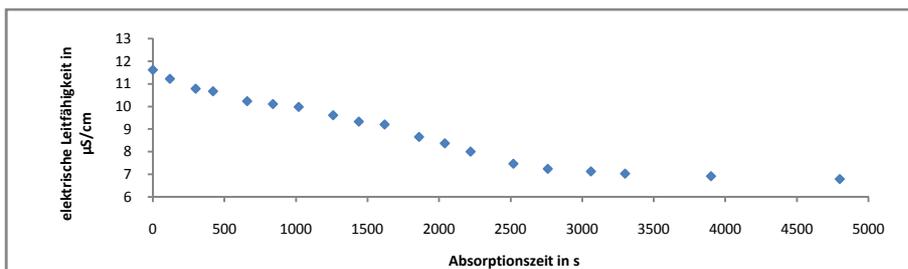


Abbildung 288 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

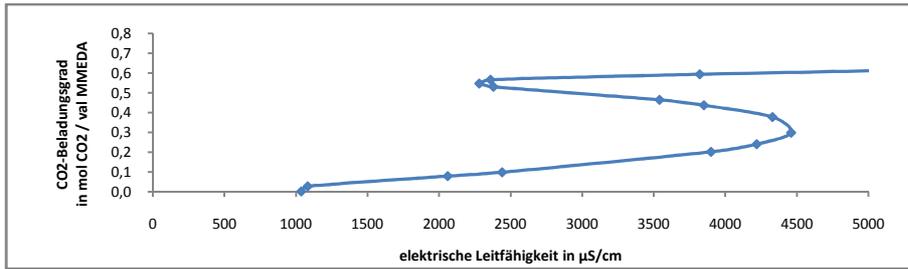


Abbildung 289 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/vol MMEDA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

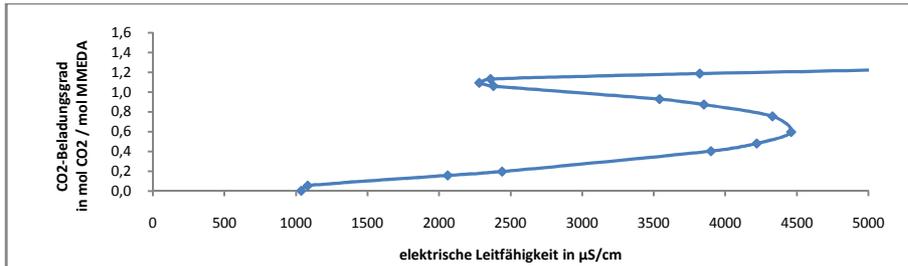


Abbildung 290 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MMEDA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

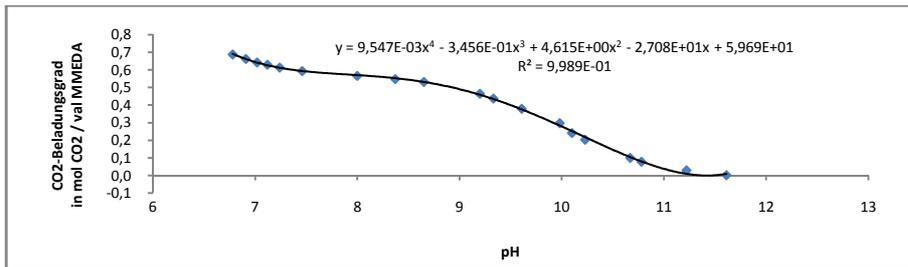


Abbildung 291 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val MMEDA gegen den pH bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

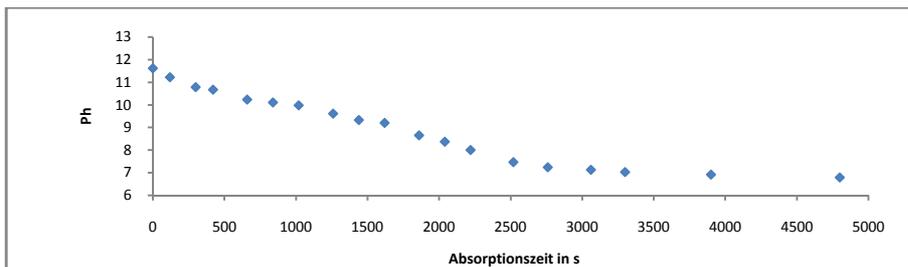
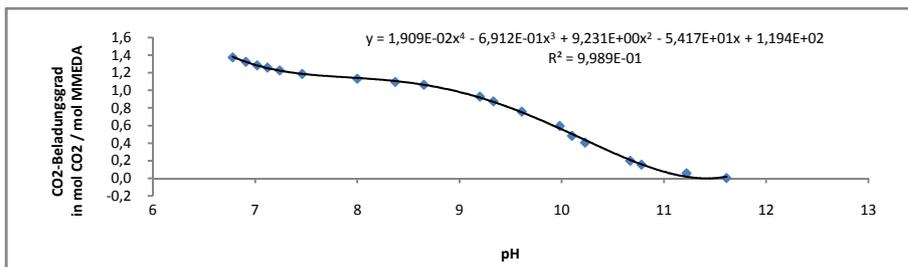
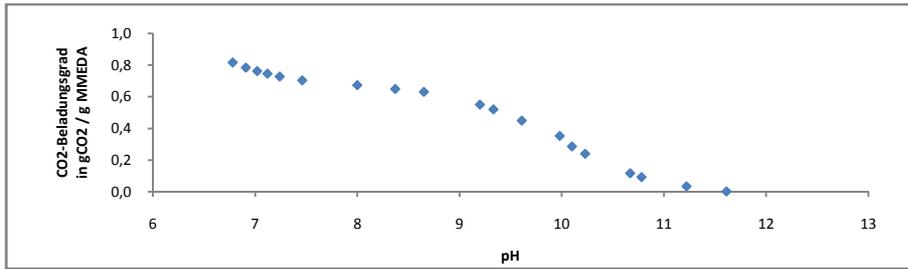


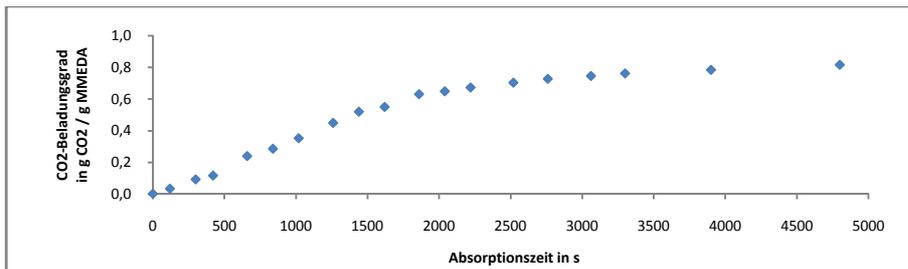
Abbildung 292 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



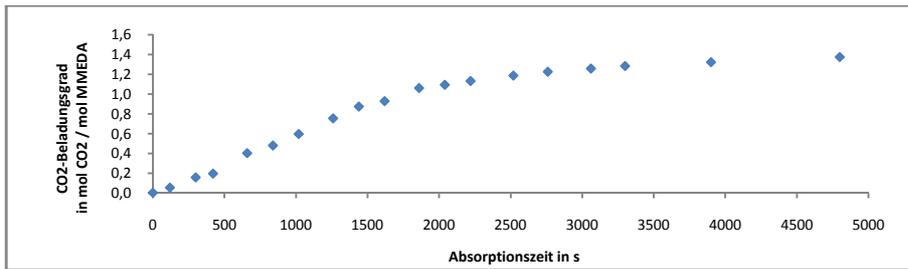
**Abbildung 293** Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MMEDA gegen den pH bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



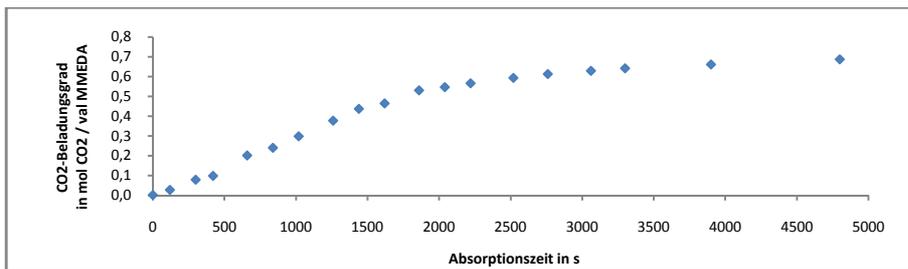
**Abbildung 294** Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g MMEDA gegen den pH bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 295** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g MMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 296** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 297** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

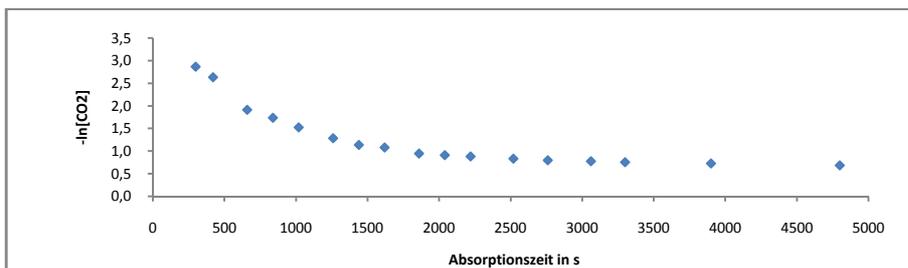


Abbildung 298 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

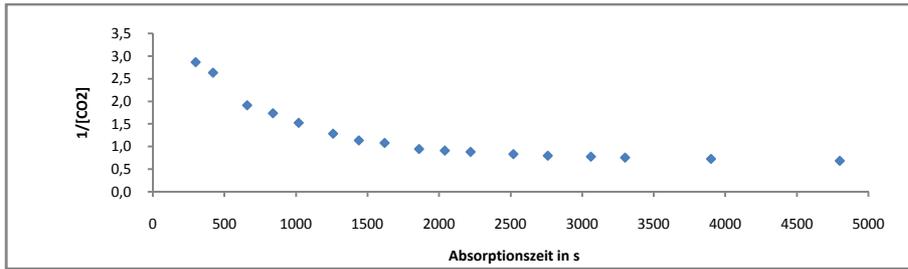


Abbildung 299 Verlauf des Kehrwerts der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

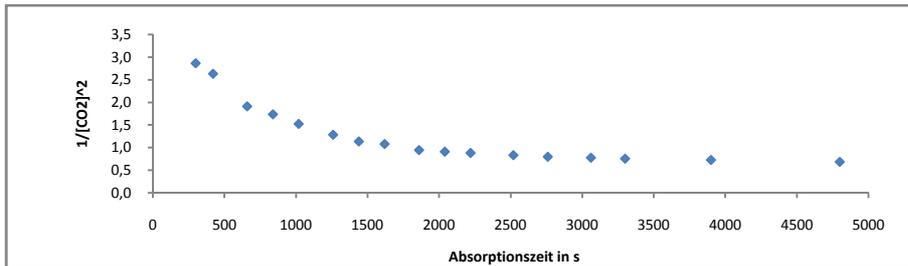


Abbildung 300 Verlauf des quadrierten Kehrwerts der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

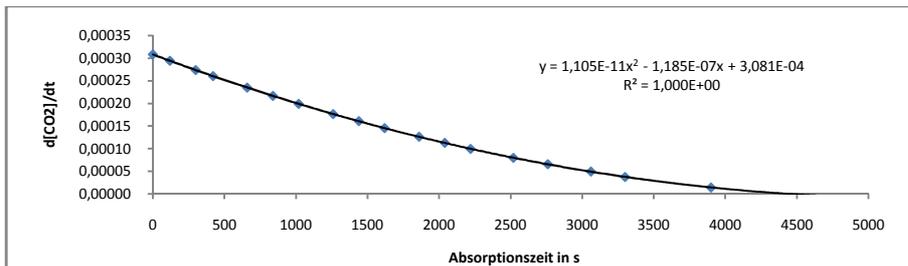


Abbildung 301 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

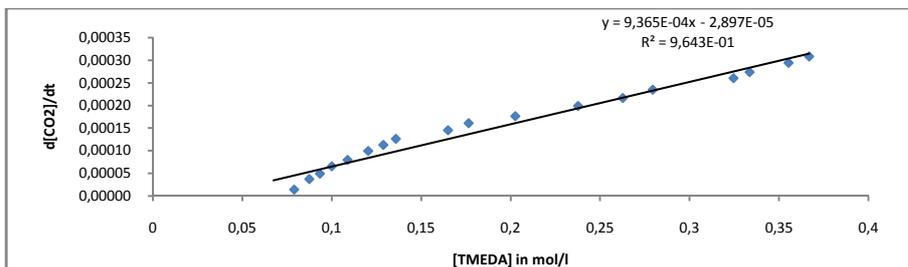


Abbildung 302 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von MMEDA in mol/l bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

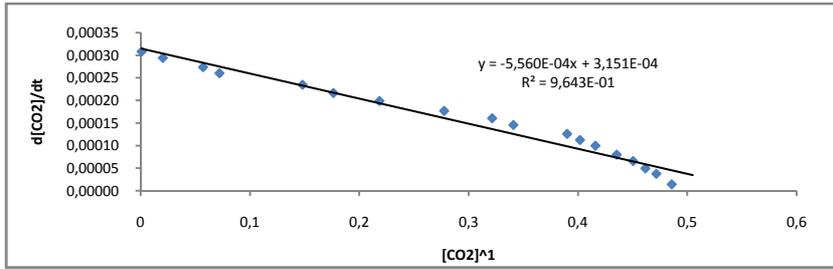


Abbildung 303 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $CO_2/(l*s)$  gegen die  $CO_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit  $CO_2$  bei Raumbedingungen

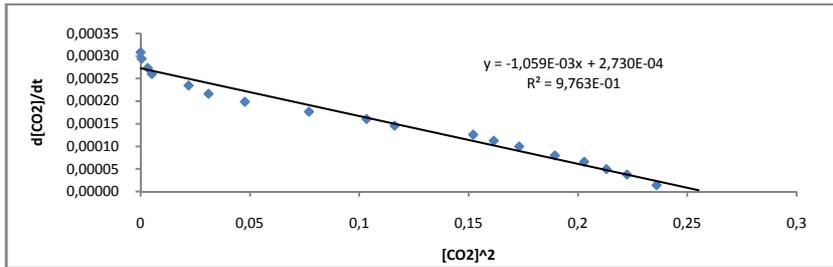


Abbildung 304 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $CO_2/(l*s)$  gegen die quadrierte  $CO_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit  $CO_2$  bei Raumbedingungen

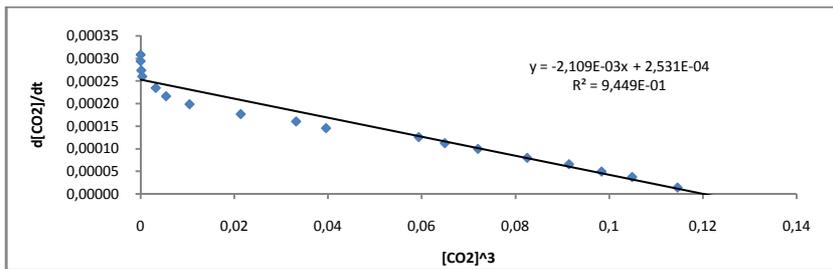


Abbildung 305 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $CO_2/(l*s)$  gegen die kubierte  $CO_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit  $CO_2$  bei Raumbedingungen

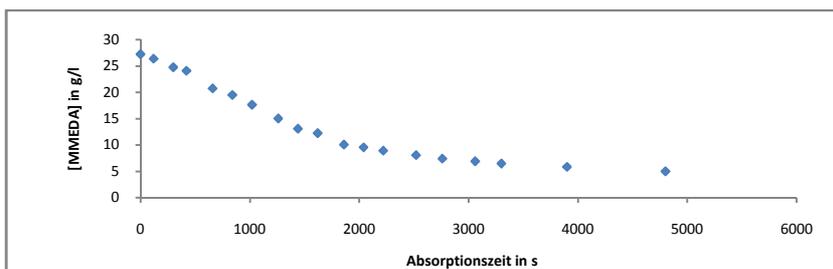


Abbildung 306 Verlauf der Konzentration von MMEDA in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit  $CO_2$  bei Raumbedingungen

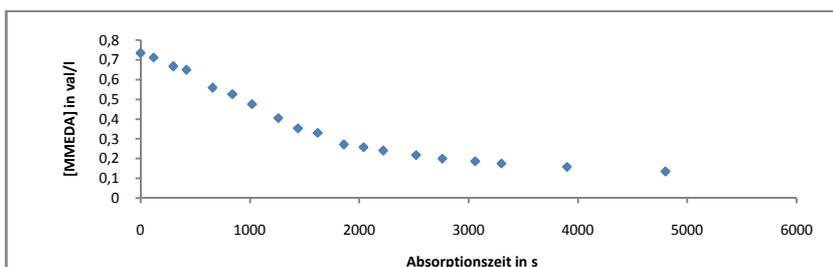


Abbildung 307 Verlauf der Konzentration von MMEDA in va/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

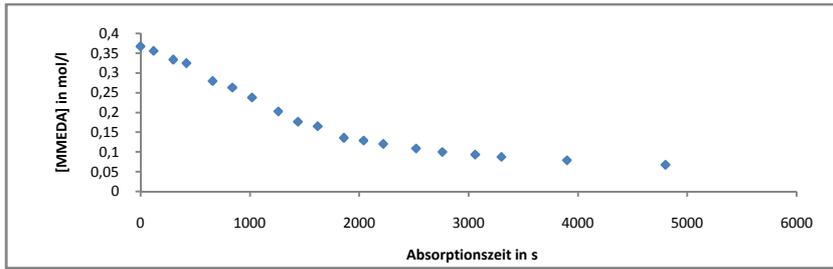


Abbildung 308 Verlauf der Konzentration von MMEDA in mo/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

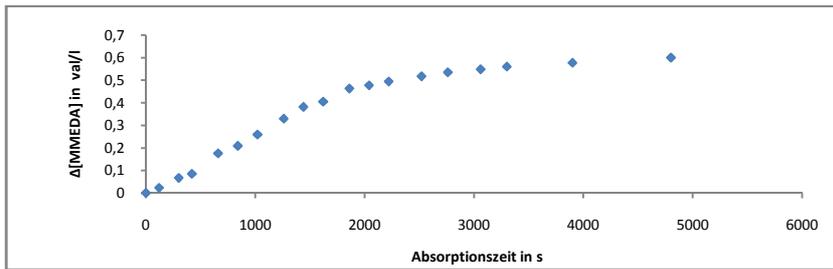


Abbildung 309 Verlauf des Umsatzes von MMEDA in va/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

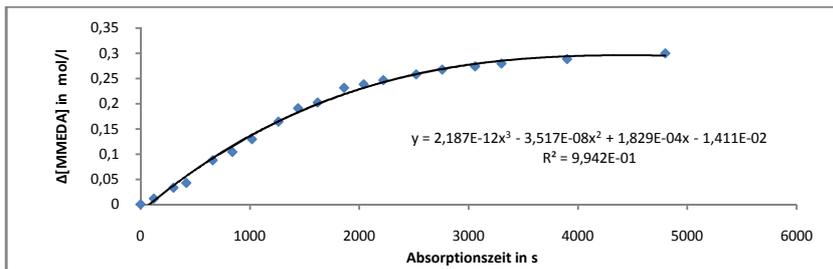


Abbildung 310 Verlauf des Umsatzes von MMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

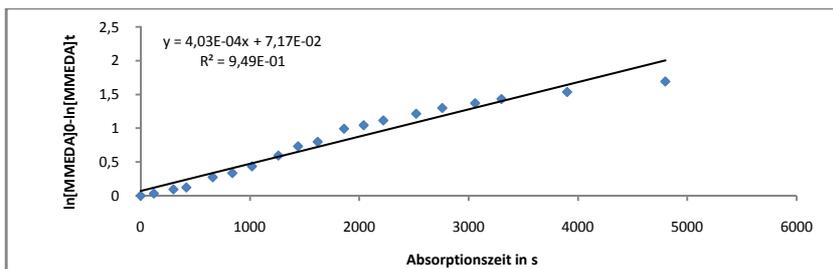


Abbildung 311 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

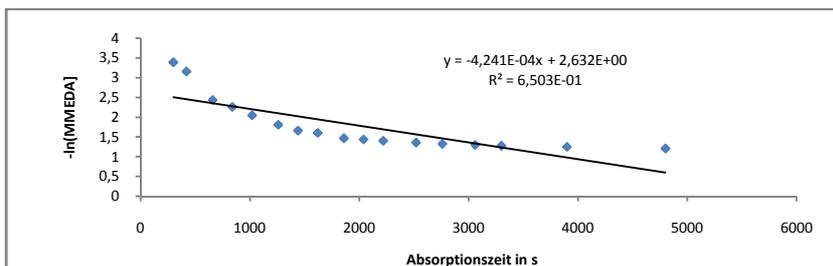


Abbildung 312 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

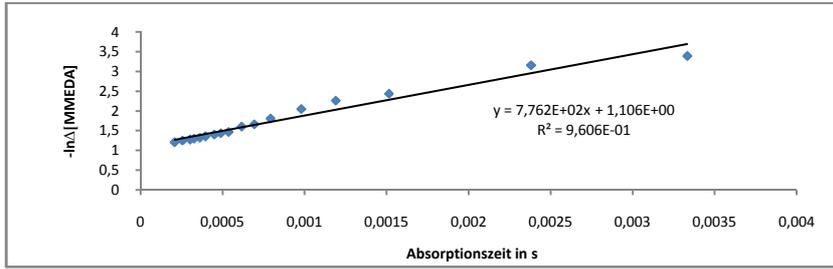


Abbildung 313 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MMEDA in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

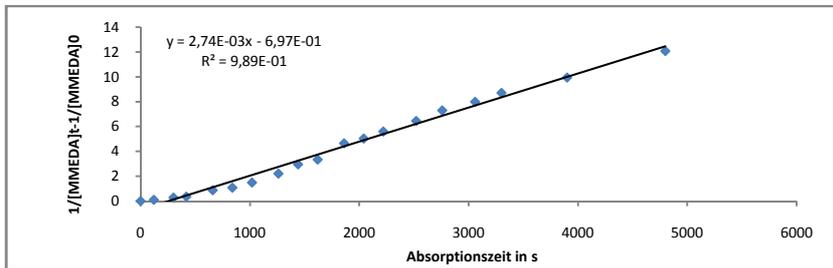


Abbildung 314 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

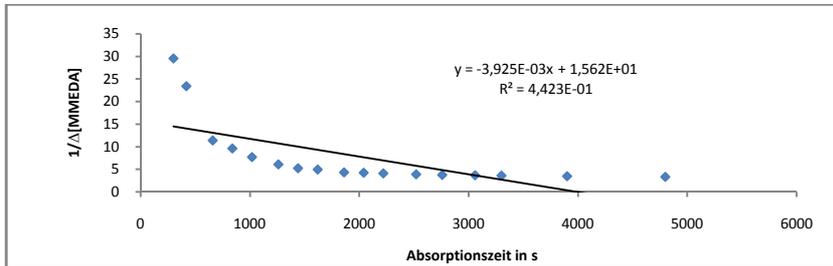


Abbildung 315 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von MMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

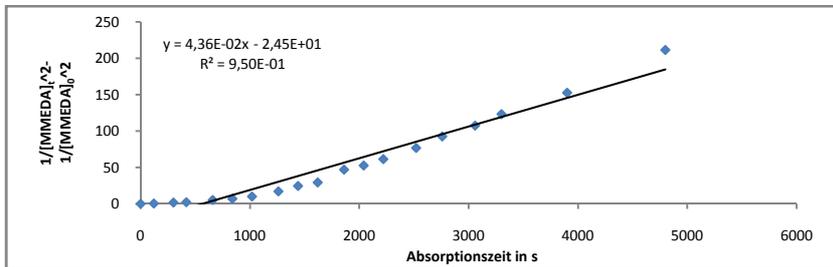


Abbildung 316 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

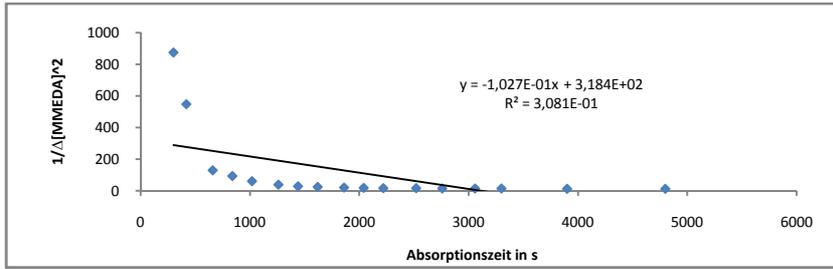
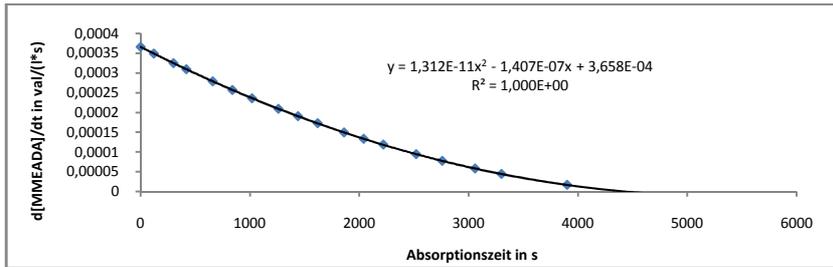
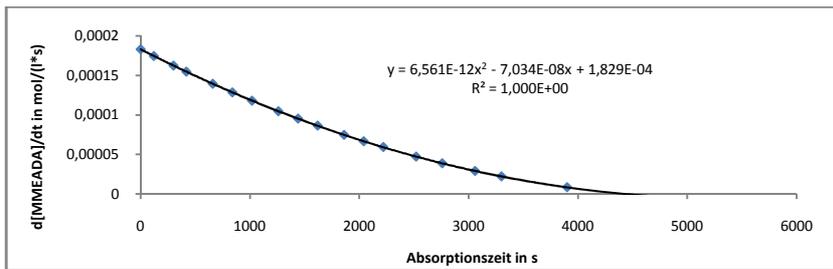


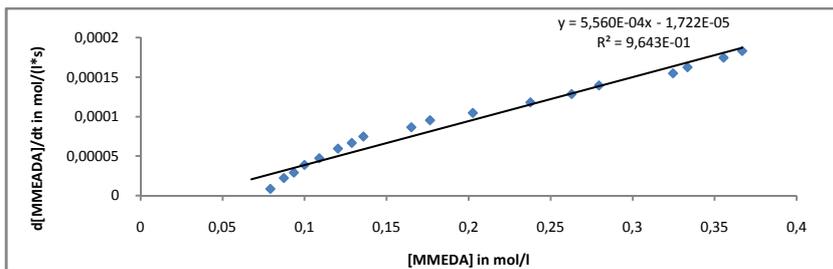
Abbildung 317 Verlauf des quadrierten Kehrwerts des Umsatzes von MMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val MMEDA/l(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



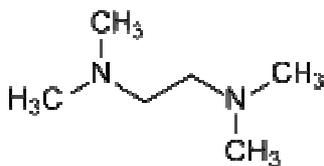
Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MMEDA/l(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MMEDA/l(l\*s) gegen die Konzentration von MMEDA in mol/l bei der Behandlung einer 2,724 m%igen Lösung von MMEDA in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

## 1.12 Das Reaktionssystem N,N,N',N'-Tetramethylethyldiamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.12.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten



C<sub>6</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>

N,N,N',N'-Tetramethylethyldiamin TMEDA

N,N,N',N'-Tetramethylethyldiamin TMEDA ist eine leichtentzündliche, klare, farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit aminartigem Geruch, die in allen Verhältnissen mit Wasser mischbar ist. TMEDA zersetzt sich bei Erhitzung unter Bildung von Stickoxiden, Kohlenmold und Kohlendioxid. Wässrige Lösungen des Diamins mit zwei tertiären Aminogruppen sind alkalisch und formal 2-fach protonierbar. TMEDA ist kein Nucleophil.

CAS-Nummer 110-18-9, Molare Masse 116,2 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 0,77 g·cm<sup>-3</sup>, Schmelzpunkt -55 °C, Siedepunkt 120 °C, Dampfdruck 12 hPa bei 20 °C, Brechungsindex 1,4179 (20 °C), pK<sub>S1</sub>=6,99, pK<sub>S2</sub>=10,08

### 1.12.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit TMEDA

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



Gefahr

#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 225, 332, 302, 314 und P: 210, 280, 305+351+338, 310

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung



Ätzend(C)



Leicht-entzündlich

#### R- und S-Sätze

R: 11, 20/22, 34 und S: (1/2), 16, 26, 36/37/39, 45

### 1.12.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TMEDA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 0,627 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von 1,896 die zwei pKa-Werte 9,5 und 6,2.

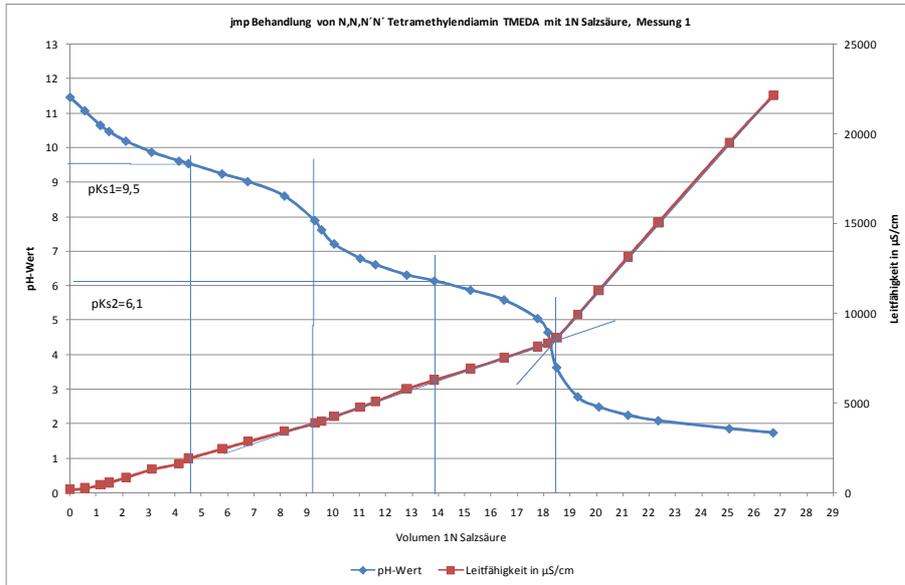


Abbildung 318 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen das Volumen 1N Salzsäure bei der Behandlung einer 0,627 m%igen TMEDA-Lösung mit 1N Salzsäure

### 1.12.4 Behandlung einer TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 3,11m%ige TMEDA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und ca. 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,3 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

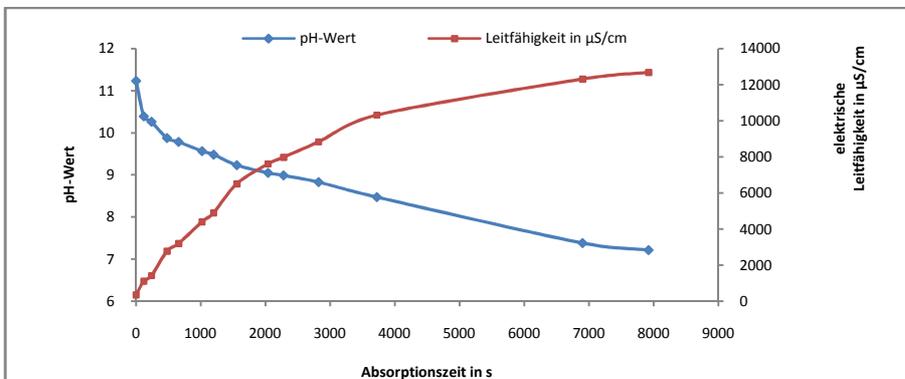


Abbildung 319 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

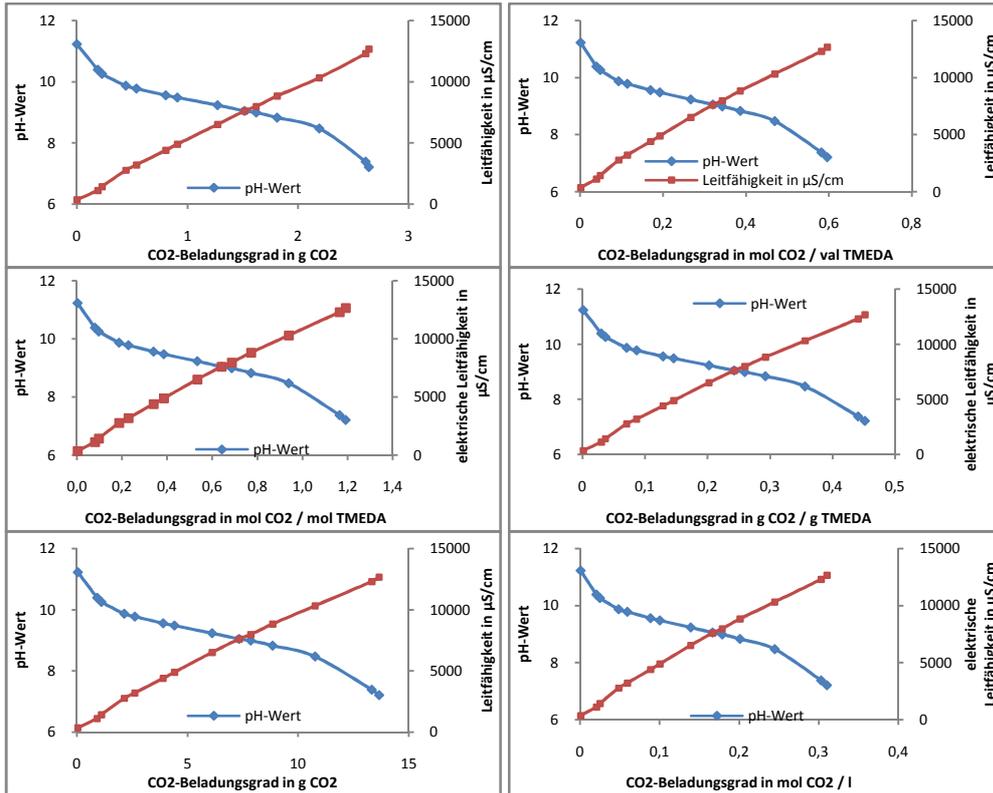


Abbildung 321 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

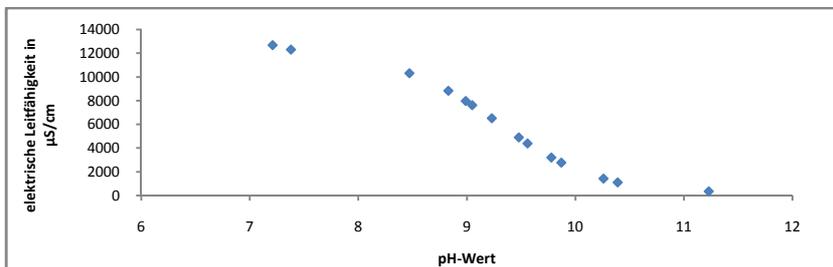


Abbildung 322 Korrelation von pH und elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

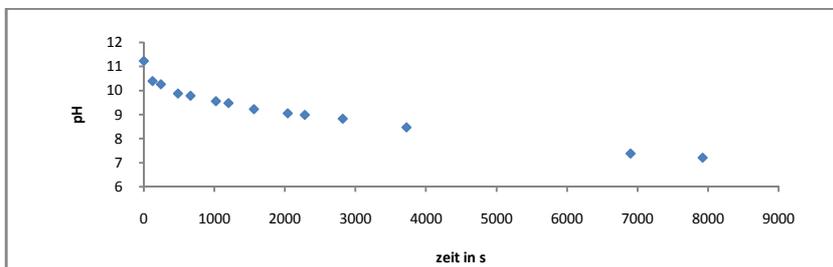


Abbildung 323 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

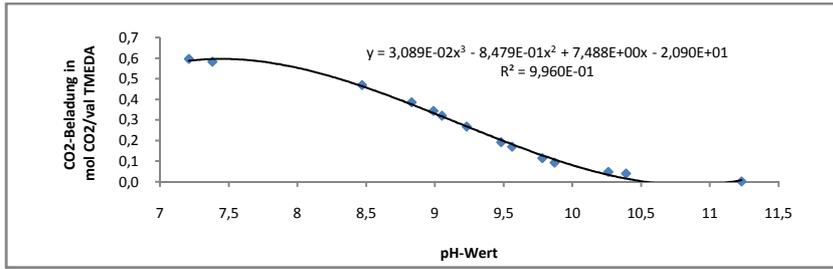


Abbildung 324 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val TMEDA gegen den pH bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

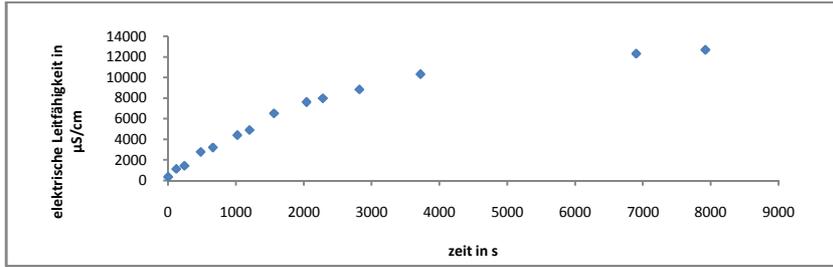


Abbildung 325 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

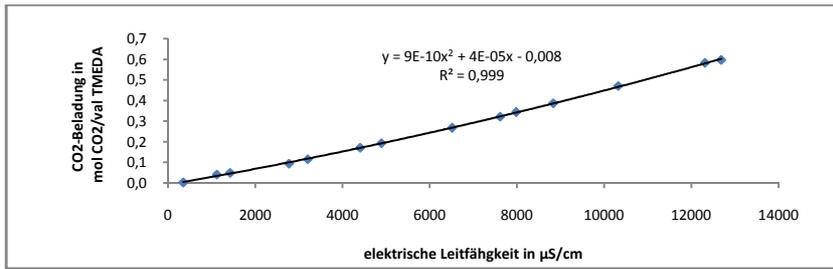


Abbildung 326 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val TMEDA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

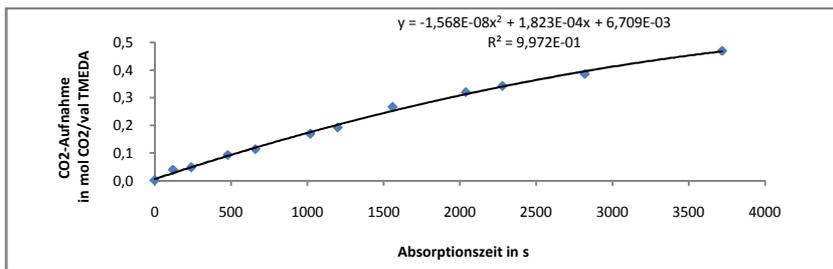


Abbildung 327 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val TMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

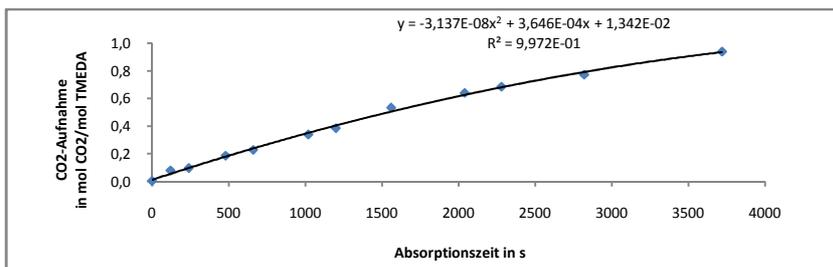


Abbildung 328 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

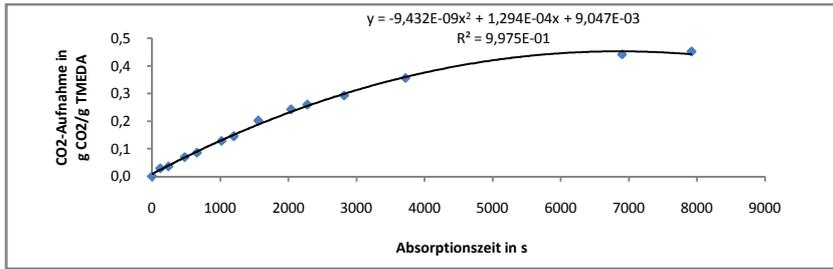


Abbildung 329 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g TMEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

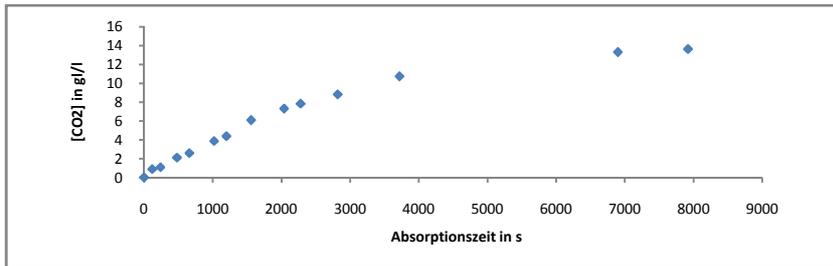


Abbildung 330 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

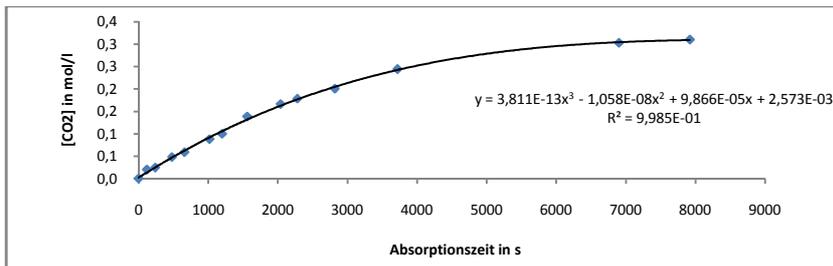


Abbildung 331 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

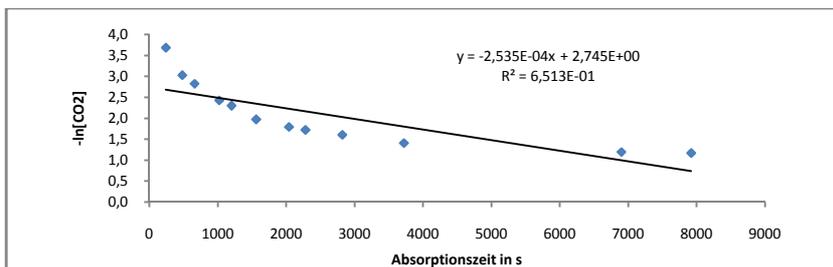


Abbildung 332 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

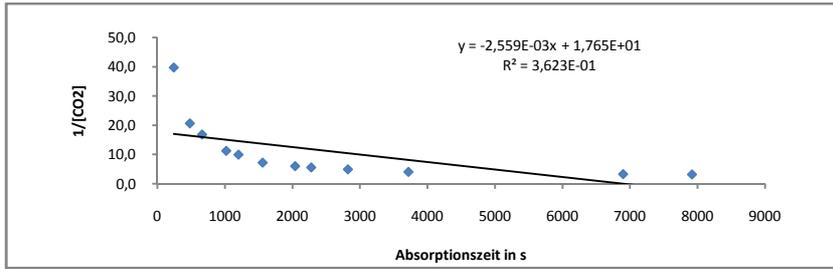


Abbildung 333 Verlauf des Kehrwertes der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

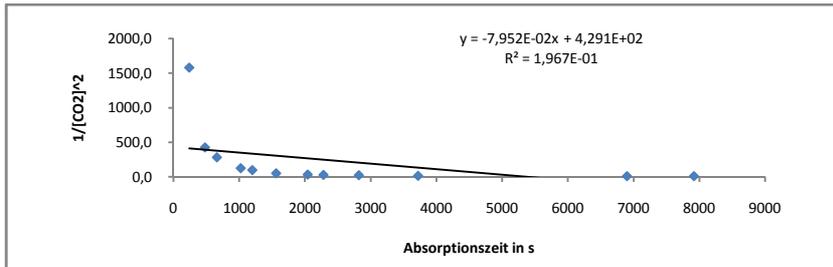


Abbildung 334 Verlauf des Kehrwertes der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

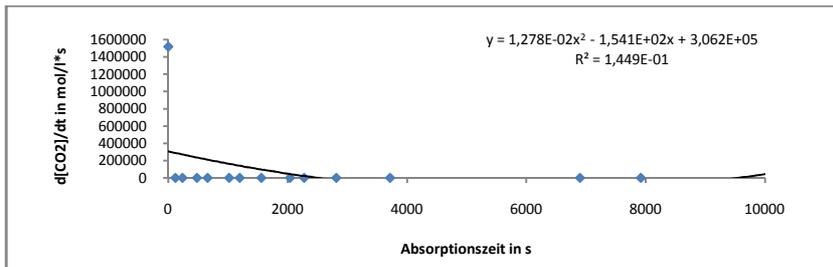


Abbildung 335 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}^*\text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

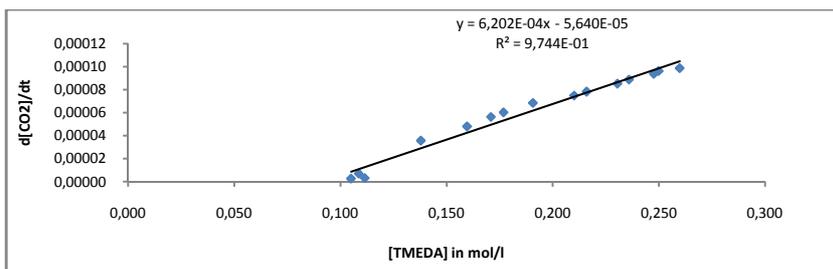
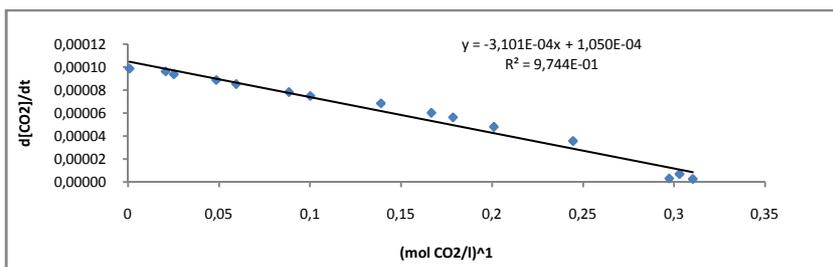


Abbildung 336 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}^*\text{s})$  gegen die Konzentration von TMEDA in mol/l bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen



# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

Abbildung 337 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

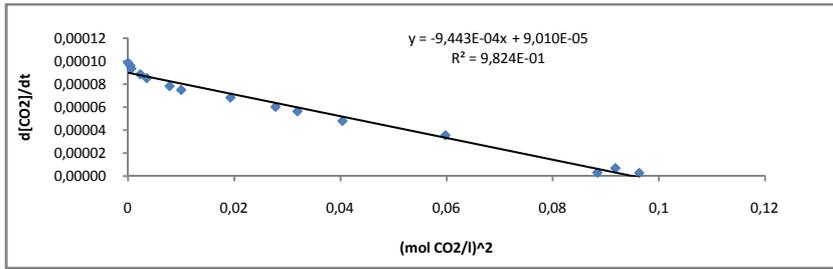


Abbildung 338 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

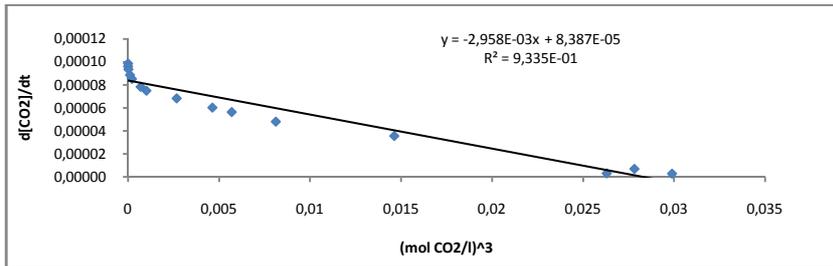


Abbildung 339 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

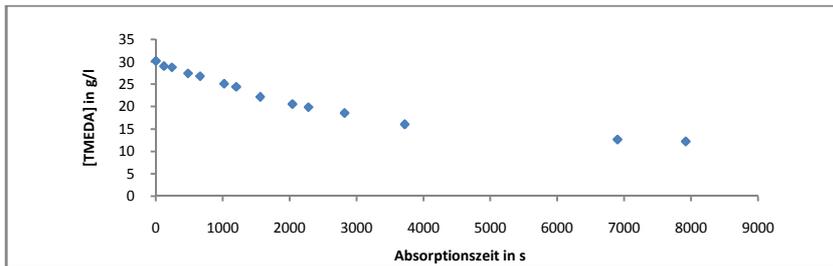


Abbildung 340 Verlauf der Konzentration TMEDA in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

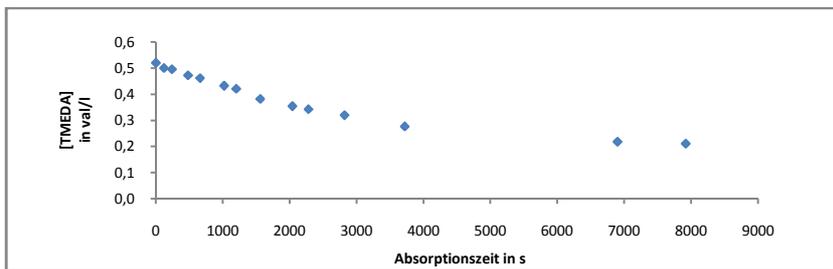


Abbildung 341 Verlauf der Konzentration TMEDA in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

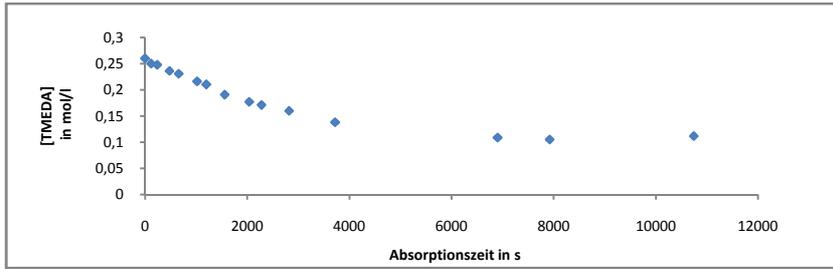


Abbildung 342 Verlauf der Konzentration TMEDA in mol TMEDA/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

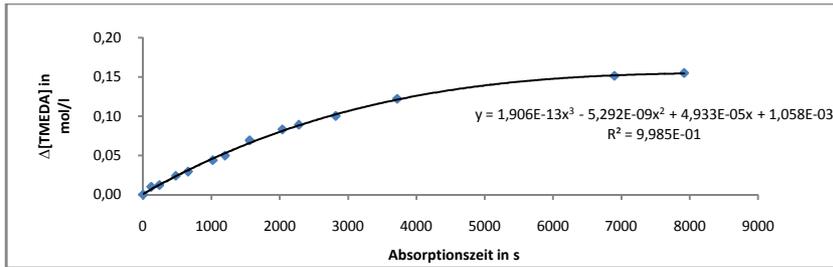


Abbildung 343 Verlauf des Umsatzes von TMEDA in mol TMEDA/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

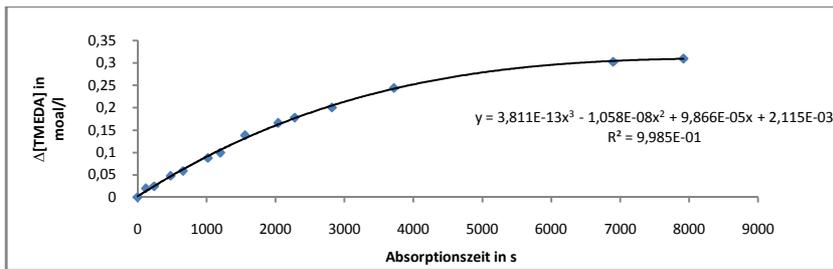


Abbildung 344 Verlauf des Umsatzes von TMEDA in val TMEDA/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

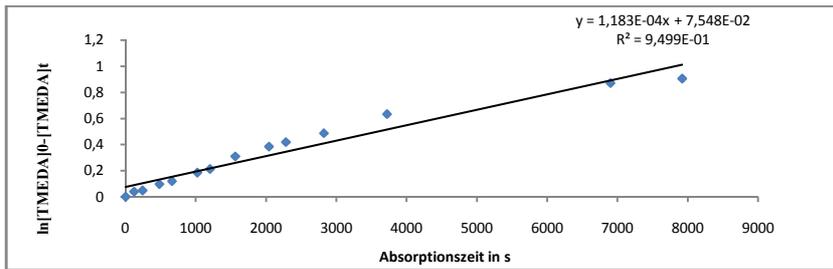
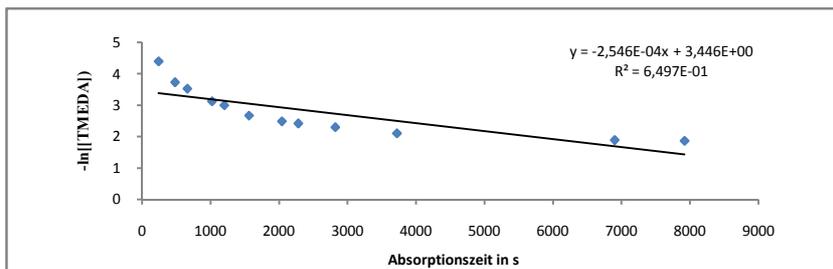


Abbildung 345 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

Abbildung 346 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von TMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

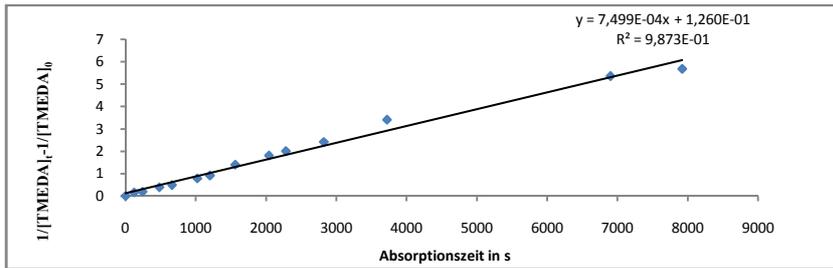


Abbildung 347 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

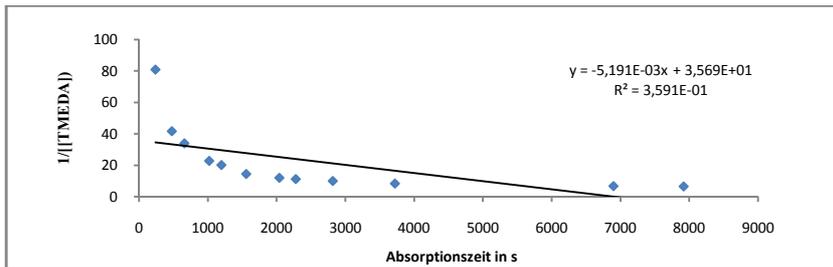


Abbildung 348 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von TMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

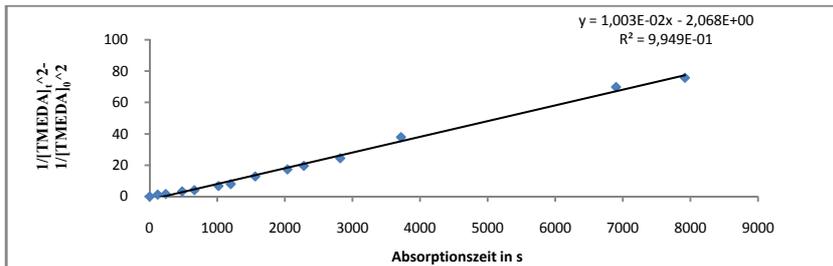


Abbildung 349 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

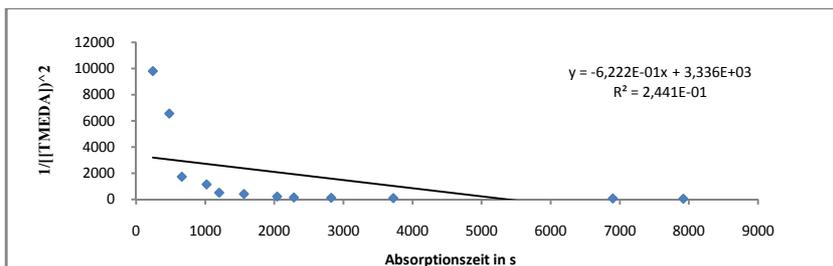


Abbildung 350 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von TMEDA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

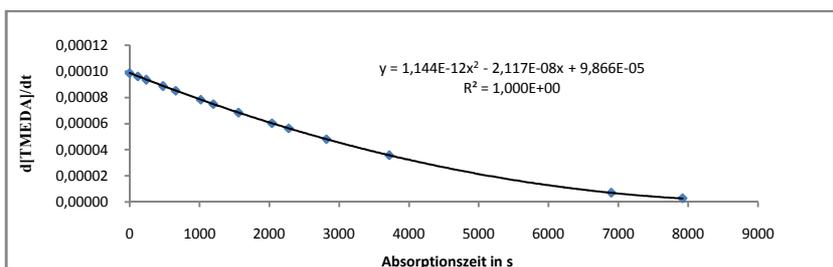


Abbildung 351 Verlauf des Reaktionsgeschwindigkeit in val TMEDA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

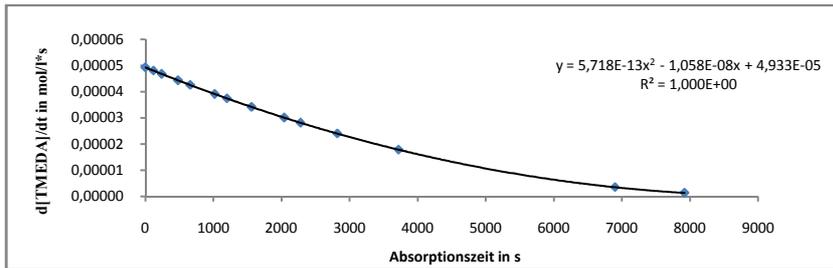


Abbildung 352 Verlauf des Reaktionsgeschwindigkeit in mol TMEDA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

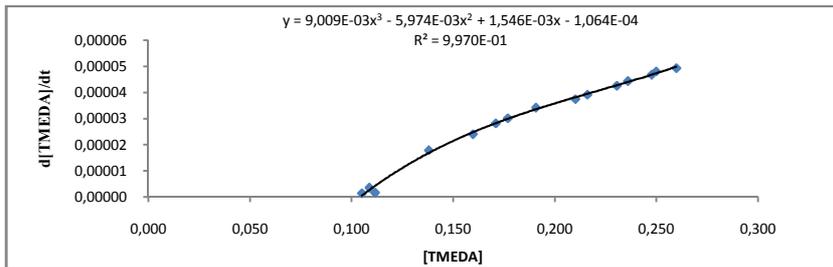


Abbildung 353 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in val TMEDA/(l\*s) gegen die Konzentration TMEDA bei der Behandlung einer 3,11 m%igen TMEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

### 1.13 Das Reaktionssystem Monoethylendiamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

Monoethylendiamin, MEDA, ist eine ölige, gelbliche hygroskopische Flüssigkeit mit strengamoniakalischen Geruch, die mit Wasser in allen Verhältnissen mischbar ist. Wässrige Lösungen des Diamins MEDA mit zwei primären Aminogruppen sind stark alkalisch und formal 2-fach protonierbar. MEDA ist ein starkes Nucleophil.

CAS-Nummer 107-15-3, Molare Masse 60,10 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 0,90 g·cm<sup>-3</sup>, Schmelzpunkt 8 °C, Siedepunkt 116 °C, Dampfdruck 12 hPa bei 20 C, Brechungsindex 1,4565 (20 C), pK<sub>S1</sub>=6,99, pK<sub>S2</sub>=10,08

#### 1.13.1 Sicherheitshinweise für den Umgang mit MEDA

GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 226, 312, 302, 314, 334, 317 und P: 280, 305+351+338, 304+340, 302+352, 309+310

EU-Gefahrstoffbezeichnung



R- und S-Sätze

R: 10, 21/22, 34, 42/43 und S: (1/2), 23, 26, 36/37/39, 45

#### 1.13.2 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von MEDA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer 0,688 m%igen MEDA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von 1,947 die zwei pKs-Wert 10,1 und 7,2 (Literaturwerte = 10,08 und 6,99).

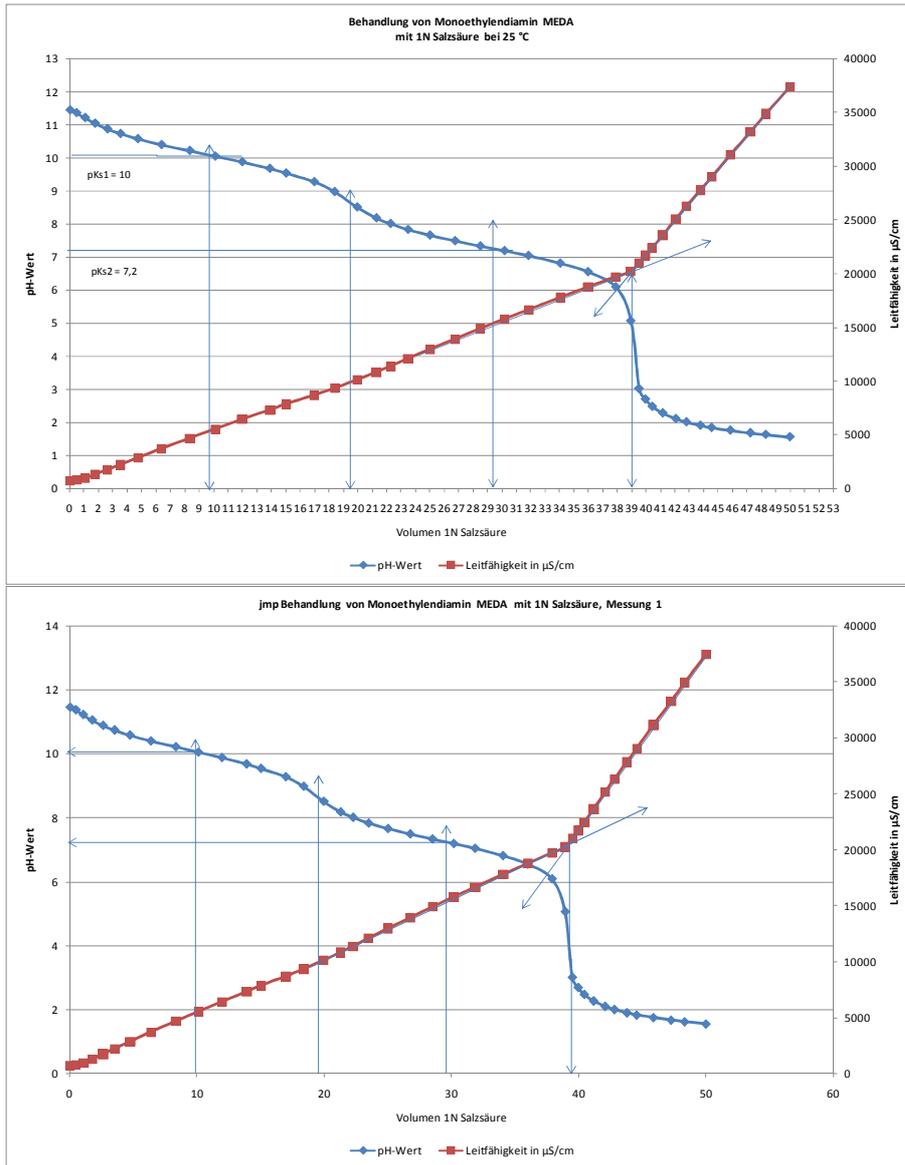


Abbildung 354 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,207g MEDA in verdünnter wässriger Lösung mit 1N Salzsäure

### 1.13.3 Behandlung einer 7,67 m%igen MEDA-Lösung in Wasser mit CO

Eine 7,67m%ige MEDA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,8 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

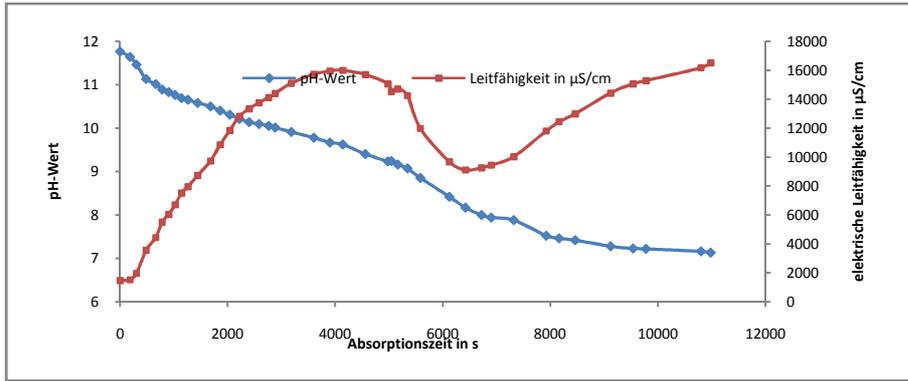


Abbildung 355 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67 m%igen MEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

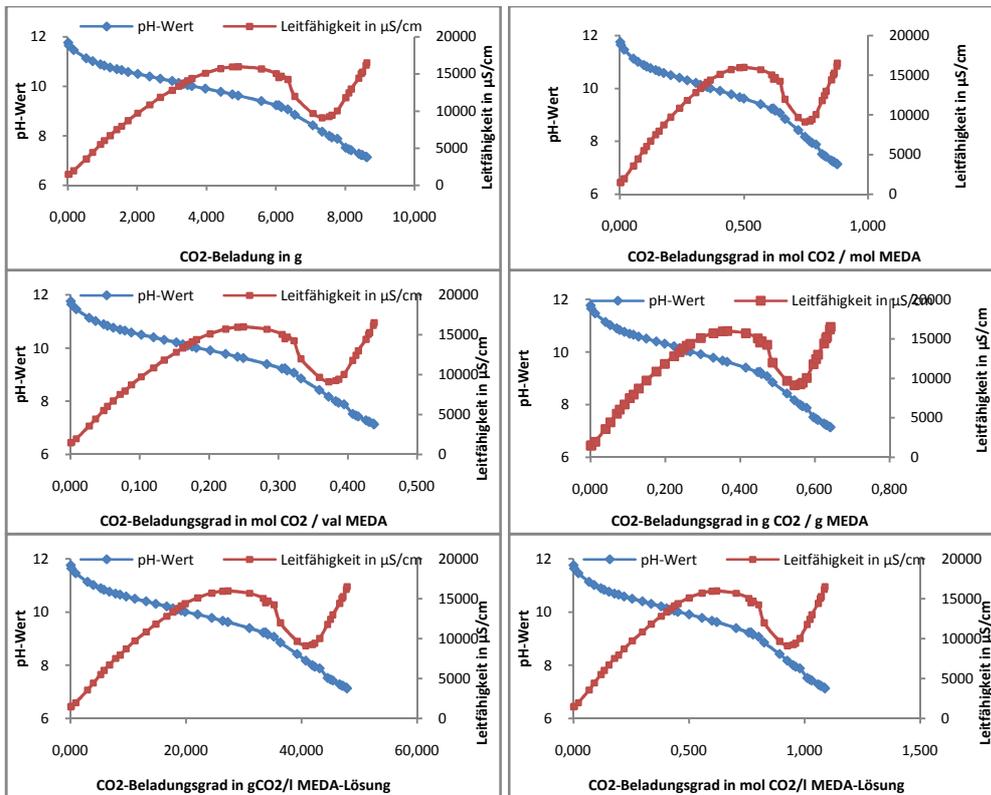


Abbildung 356 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 7,67 m%igen MEDA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme und die Reaktionszeit

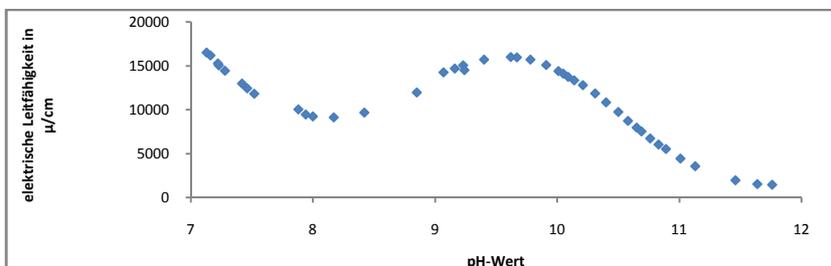


Abbildung 357 Korrelation von pH und der elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 7,67 m%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

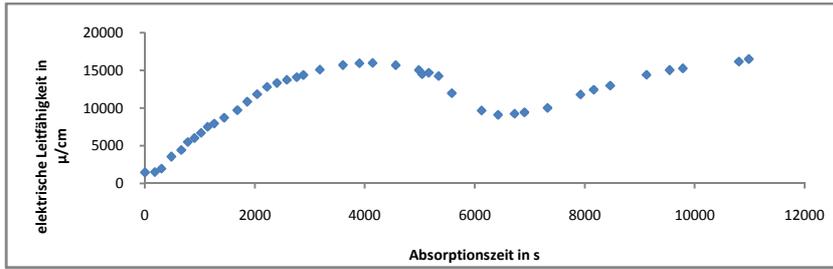


Abbildung 358 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

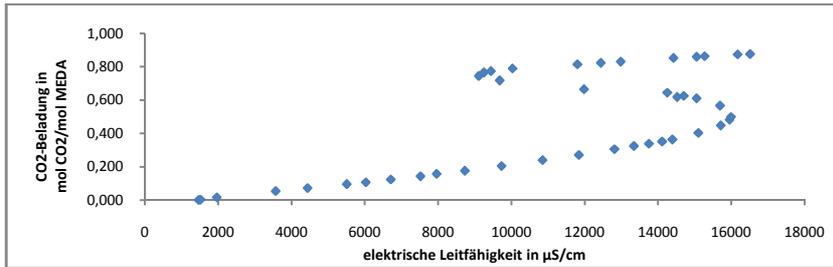


Abbildung 359 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEDA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

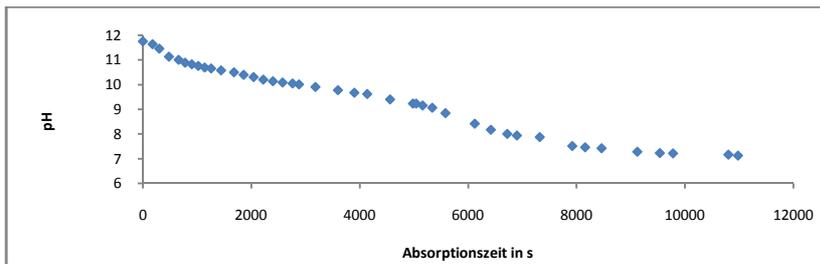


Abbildung 360 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

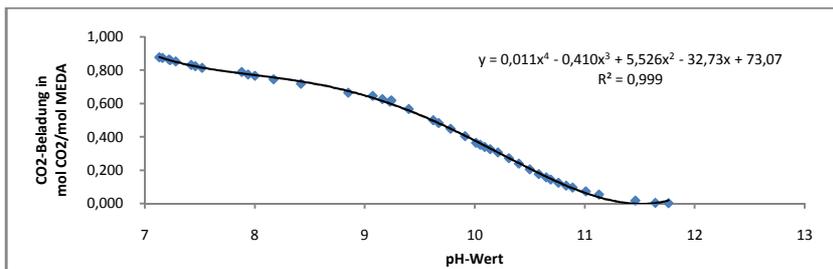


Abbildung 361 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEDA gegen den pH bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

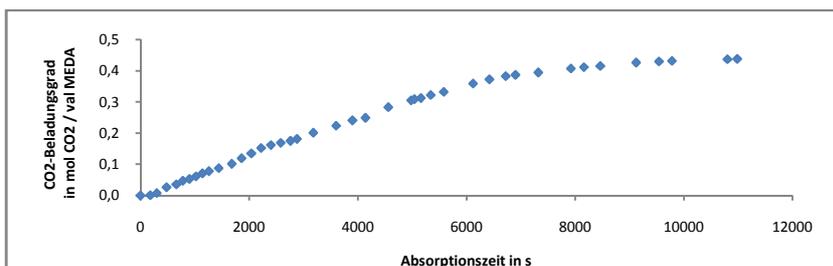


Abbildung 362 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

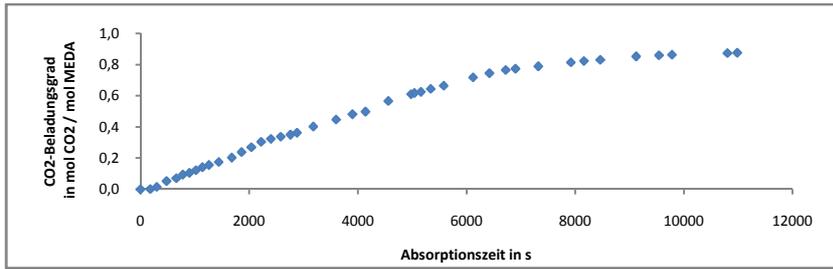


Abbildung 363 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol MEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

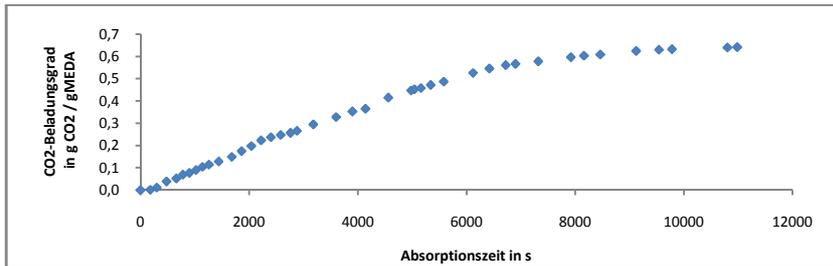


Abbildung 364 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g MEDA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

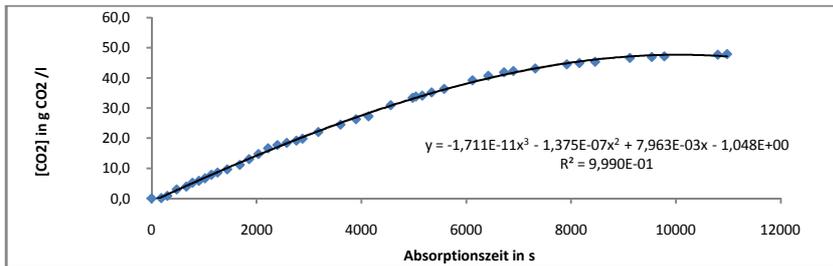


Abbildung 365 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

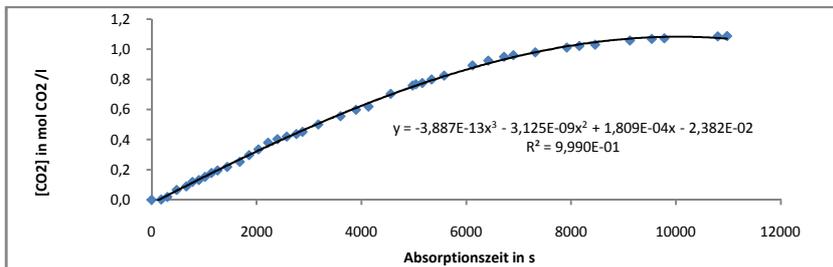


Abbildung 366 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

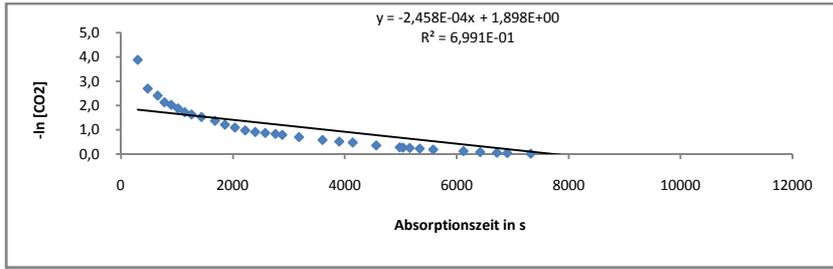


Abbildung 367 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

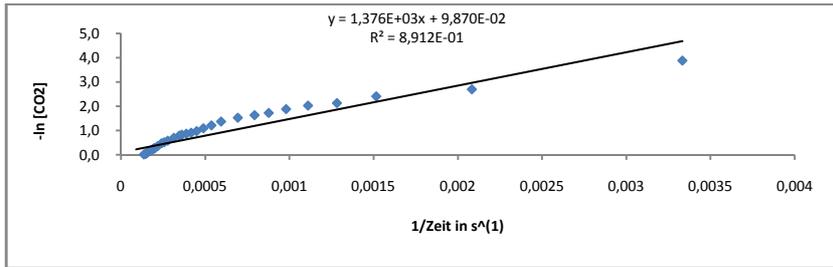


Abbildung 368 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

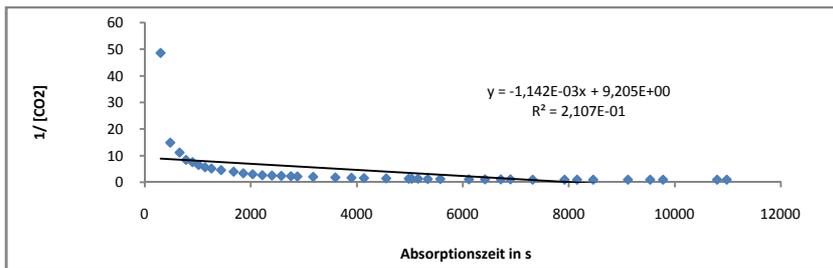


Abbildung 369 Verlauf des Kehrwerts der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

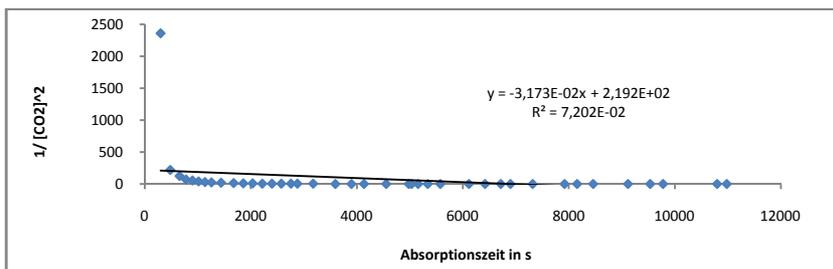


Abbildung 370 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

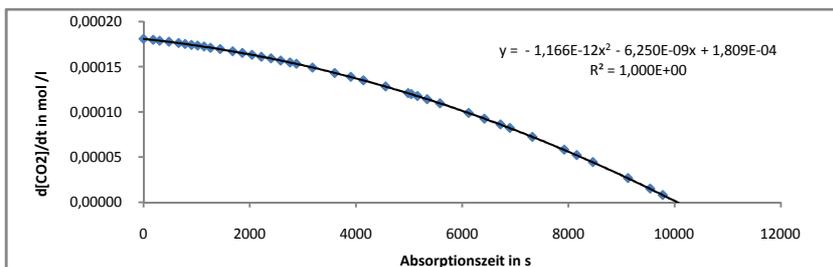


Abbildung 371 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

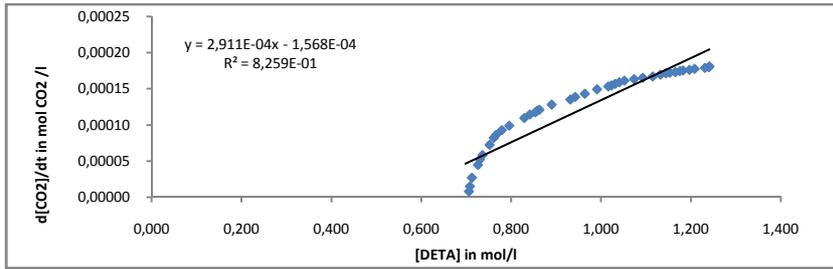


Abbildung 372 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von MEDA bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

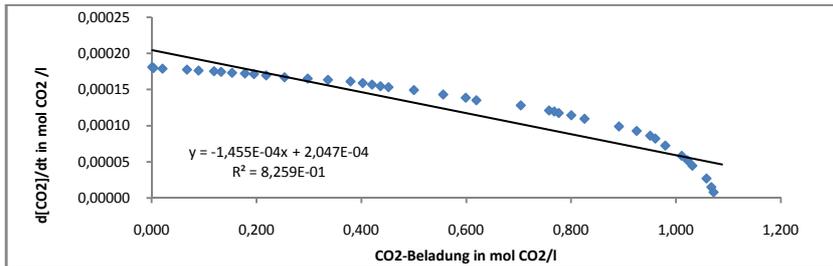


Abbildung 373 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

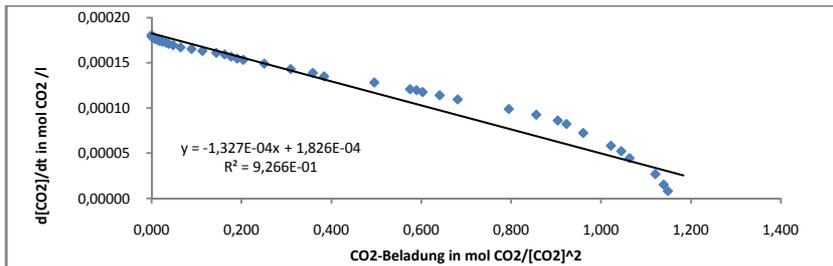


Abbildung 374 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

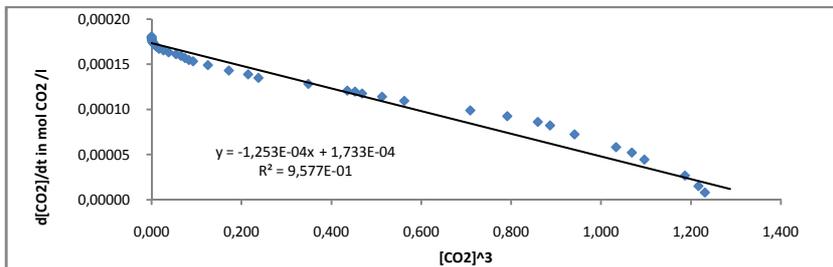


Abbildung 375 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

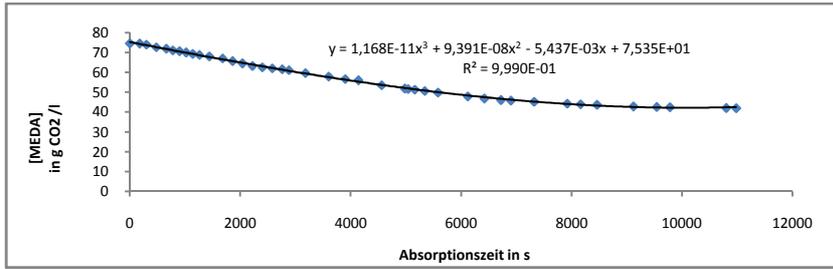


Abbildung 376 Verlauf der Konzentration von MEDA in g MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

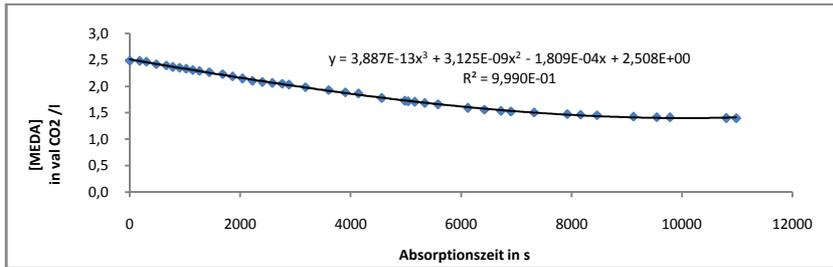


Abbildung 377 Verlauf der Konzentration von MEDA in val MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

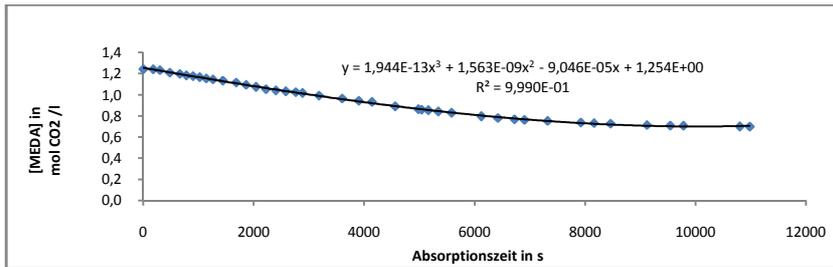


Abbildung 378 Verlauf der Konzentration von MEDA in mol MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

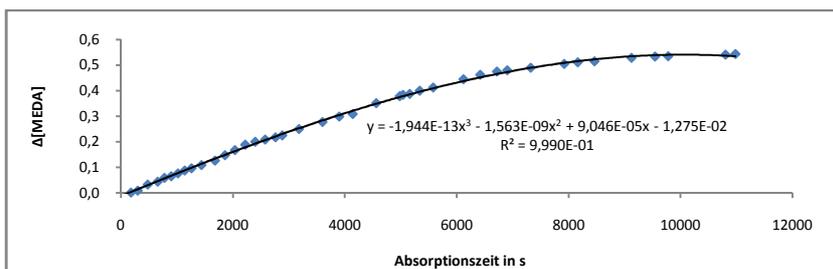
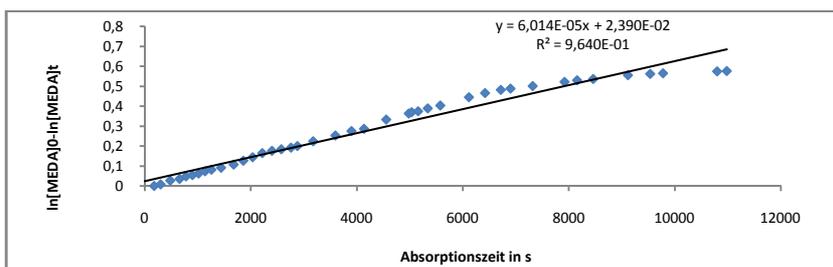


Abbildung 379 Verlauf des des Umsatzes von MEDA in mol MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>



# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

Abbildung 380 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

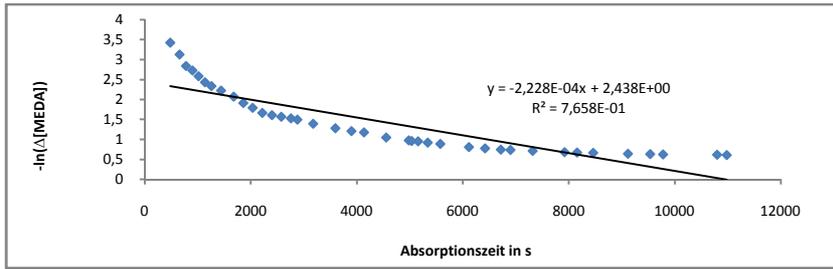


Abbildung 381 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MEDA in mol MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

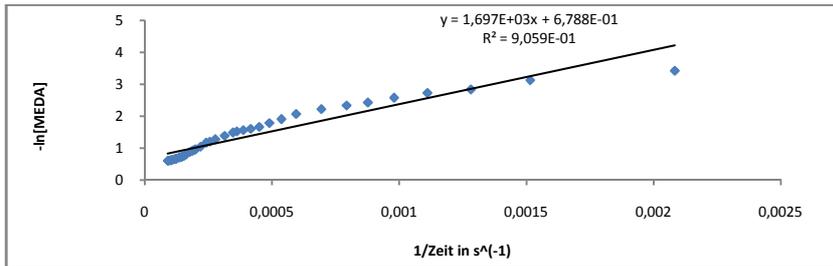


Abbildung 382 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von MEDA in mol MEDA/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

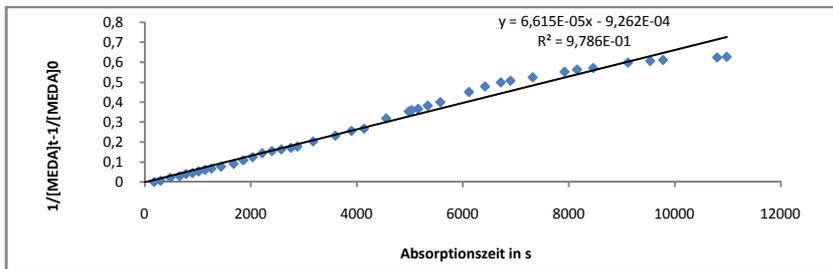


Abbildung 383 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

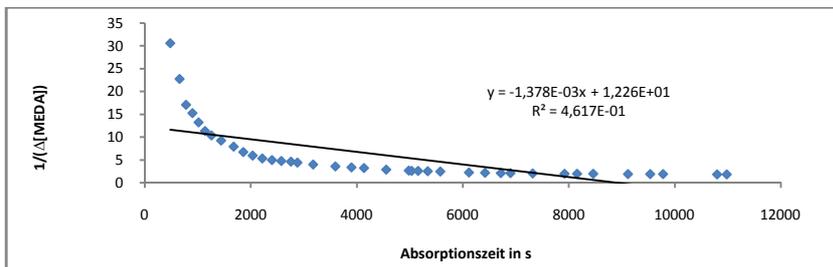


Abbildung 384 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von MEDA in mol MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

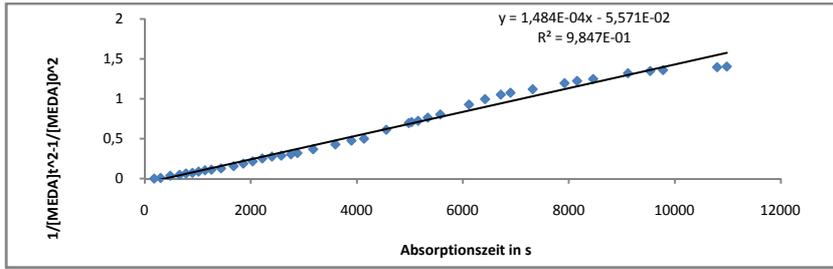


Abbildung 385 Arrhenius-Plot 3

.Ordnung für die Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

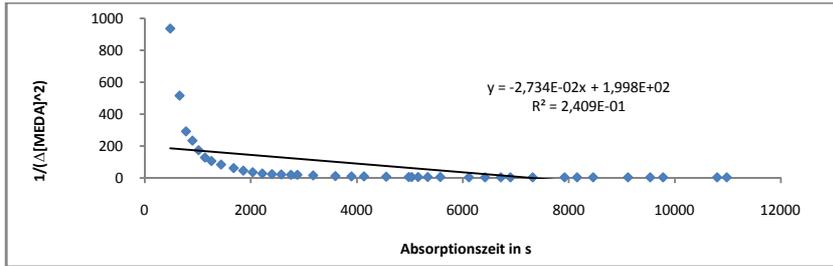


Abbildung 386 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von MEDA in mol MEDA/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

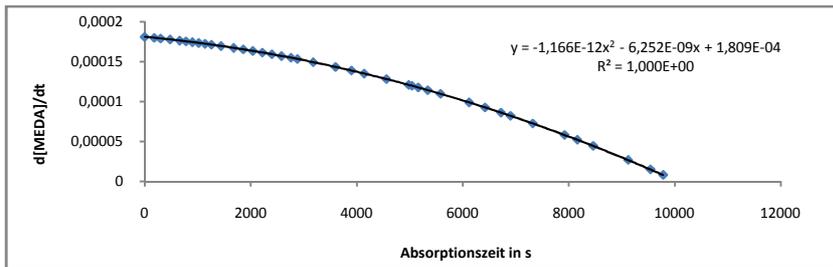


Abbildung 387 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val MEDA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

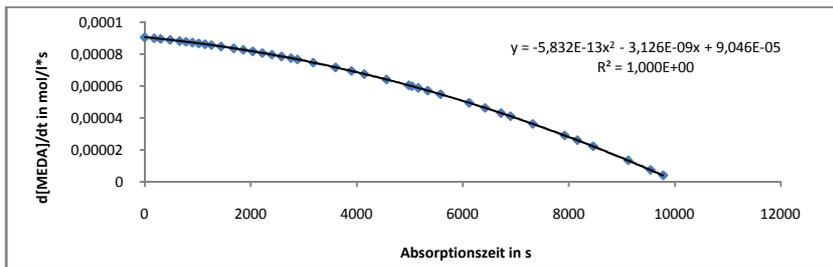


Abbildung 388 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MEDA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

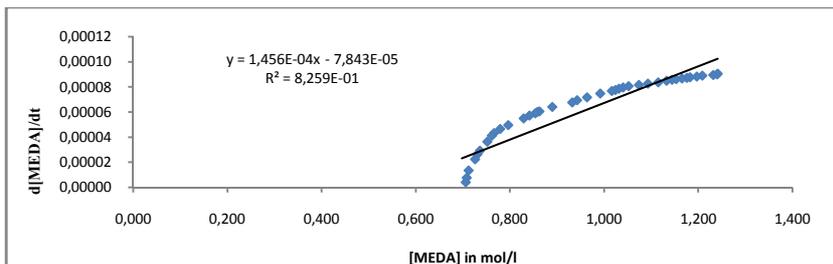


Abbildung 389 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol MEDA/(l\*s) gegen die Konzentration MEDA in mol/l bei der Behandlung einer 7,67%igen MEDA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

#### 1.13.4 Kommentar

Monoethylendiamin MEDA kann als kleinstes oligomeres Polyethylenimin mit einem primären Amin als Endgruppe aufgefaßt werden. Das Diamin, oder besser die dazu konjugierten bzw. korrespondierenden Säuren haben die pKs-Werte 6,9 und 9,95, .d.h. bei pH 6,9 stellt sich ein Äquivalentverhältnis von monoprotonierter Base zu diprotonierter Base von ca. 50:50 ein, bei pH 8,4 liegt der maximale Anteil monoprotonierter Base vor, bei pH 9,95 stellt sich ein Äquivalentverhältnis von freier Base zu monoprotonierter Base von ca. 50:50 ein. Das Ergebnis der konduktometrischen und potentiometrischen Untersuchung des Reaktionssystems MEDA/Wasser/CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen im offenen System ist ungewöhnlich. Den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit mit zunehmendem CO<sub>2</sub>-Umsatz erkläre ich mir über die Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit mit dem pH-Wert wie folgt. Bei der Behandlung mit CO<sub>2</sub> reagiert eine 5m%ige MEDA-Lösung in Wasser zunächst bis pH 10,4 zum intermolekularen MEA-Ammonium-Carbamat. Formal bilden sich aus 2 Äquivalenten Base und einem Äquivalent CO<sub>2</sub> dabei 2 Äquivalente Elektrolyt. Die elektrische Leitfähigkeit steigt daher bis pH 10,4 annähernd linear an. Mit weiter zunehmenden CO<sub>2</sub>-Umsatz reagieren die intermolekularen MEDA-Ammonium-Carbamate bei pH<10,4 zunehmend mit CO<sub>2</sub> zu intramolekularen MEDA-Carbamat. Formal bilden sich aus 2 Äquivalenten Elektrolyt 2 und einem Äquivalent CO<sub>2</sub> dabei 2 Äquivalente nach außen elektrisch neutraler Ampholyt. Mit weiter zunehmenden CO<sub>2</sub>-Umsatz steigt daher die elektrische Leitfähigkeit zunächst zunehmend schwächer an, erreicht bei pH 9,7 ein relatives Maximum und sinkt dann bis pH 8,9 zunehmend stärker ab. Unter pH 8,9 wird MEDA-Ammoniumcarbamat zunehmend hydrolysiert und reagiert dann bei pH<8,3 mit weiterem CO<sub>2</sub> ausschließlich zu MEDA-Ammonium-Hydrogencarbonat. Formal reagieren ein Äquivalent Ampholyt mit einem Äquivalent CO<sub>2</sub> dabei zu 3 Äquivalenten Elektrolyt. Mit zunehmenden CO<sub>2</sub>-Umsatz sinkt daher die elektrische Leitfähigkeit bei pH<8,9 zunehmend schwächer ab, erreicht in pH 8,3 ein relatives Minimum und steigt dann zunehmend bis pH7 an. Der erzielbare Umsatz im offenen System bei Raumbedingungen ist durch die pKs-Werte sowohl der beiden möglichen Protolysegleichgewichte von MEDA als auch des „Carbonat/Hydrogencarbonat/“freie Kohlensäure“ Gleichgewichts bestimmt. Mit einem pKs-Wert für „Kohlensäure“ oder besser für das in Wasser gelöste CO<sub>2</sub> von 6,5 stellt sich bei pH 6,5 ein HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup>/(CO<sub>2</sub>+Wasser)-Äquivalentverhältnis von ca. 50:50 ein, d.h. es wird der gleiche

Stoffmengenanteil Hydrogencarbonat in „freie Kohlensäure“ umgewandelt wie „freie Kohlensäure“ in Hydrogencarbonat. Während bei 8,3 der maximale Anteil Hydrogencarbonat vorliegt, stellt sich schon bei pH 7,5 ein  $\text{HCO}_3^-/(\text{CO}_2+\text{Wasser})$ -Äquivalentverhältnis von ca. 96:4 ein, d.h. in offenen wässrigen Systemen wird bei pH-Werten  $<7,5$  aus gebildetem Hydrogencarbonat  $\text{CO}_2$  freigesetzt. Berücksichtigt man die pKs-Werte 9,95 und 6,9 für die konjugierten Säuren der einfach und zweifach protonierten Base MEDA, läßt sich leicht aufzeigen, dass für den Bereich von pH 9,95 bis pH 7,5 das 2.te Protolysegleichgewicht von MEDA praktisch fast vollständig auf der Seite der monoprotinierten Base liegt. Daraus folgt für die Base MEDA, dass bei der Behandlung mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen im offenen System praktisch nur ein Basenäquivalent mit  $\text{CO}_2$  reagiert

## 1.14 Das Reaktionssystem Diethylentriamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.14.1 Allgemeines, Spezifikation, Daten



Diethylentriamin DETA ist eine ölige, gelbliche hygroskopische Flüssigkeit mit strengem amoniakalischen Geruch, die mit Wasser in allen Verhältnissen mischbar ist. Wässrige Lösungen des Triamins DETA mit zwei primären und einer sekundären Aminogruppe sind stark alkalisch und formal 3-fach protonierbar. DETA ist ein starkes Nucleophil (CAS-Nummer 111-40-0, Molare Masse 103,17 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 0,96 g·cm<sup>-3</sup>, Schmelzpunkt -39 °C, Siedepunkt 207 °C, Dampfdruck 27,2 mbar (100 °C), Brechungsindex 1,481).

### 1.14.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit DETA

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 330, 302, 312, 314, 317, 335 und P: 260, 280, 304+340, 305+351+338, 310, 403+233

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung



#### R- und S-Sätze

R: 21/22, 34, 43 und S: (1/2), 26, 36/37/39, 45

### 1.14.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von DETA

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer DETA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von 2,995 die drei pKa-Werte 10,4 und 9,2 und 4,6.

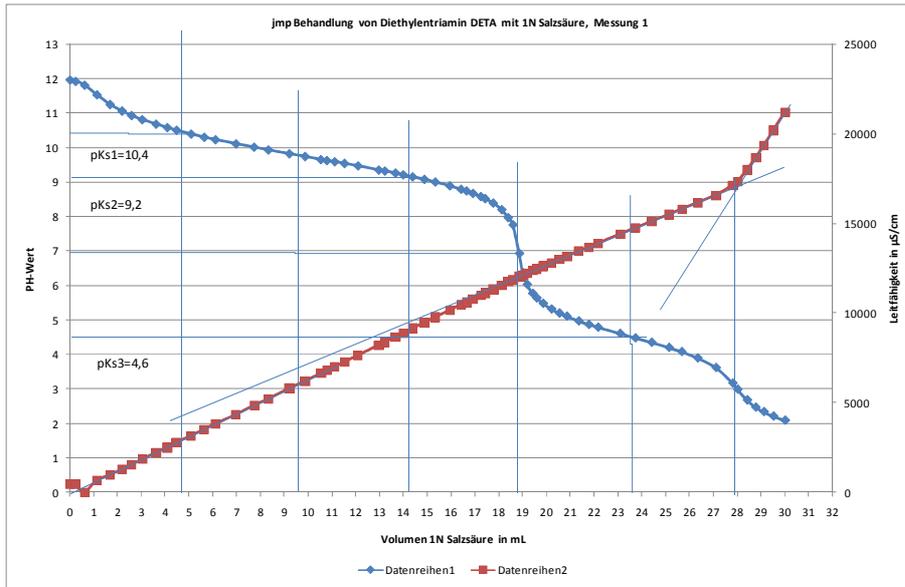


Abbildung 390 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen das Volumen 1N Salzsäure bei der Behandlung einer DETA-Lösung mit 1N Salzsäure

#### 1.14.4 Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 3,94m%ige DETA-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,5 bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,1 behandelt.

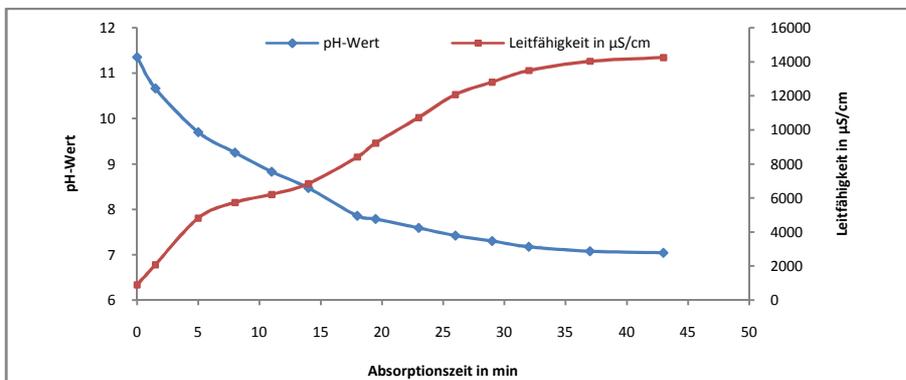


Abbildung 391 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Zeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

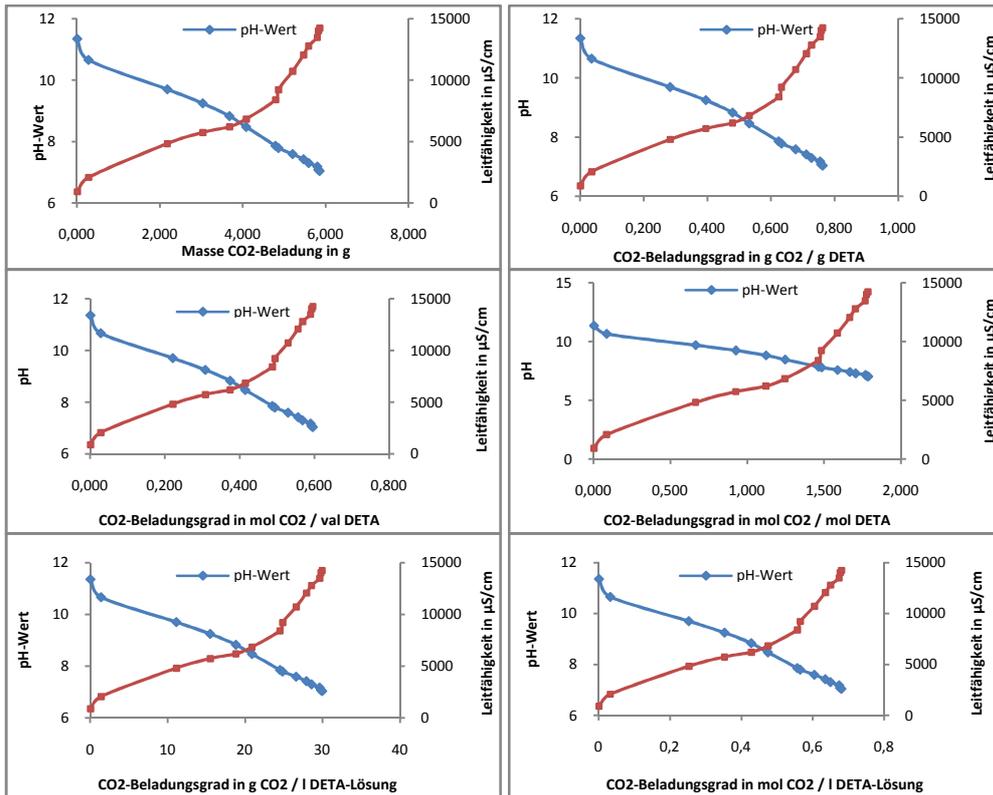


Abbildung 392 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei RT mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

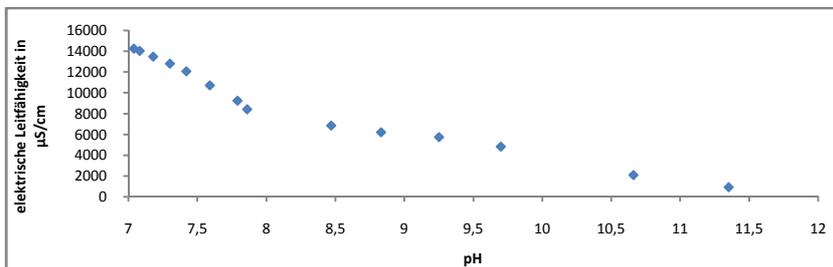


Abbildung 393 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

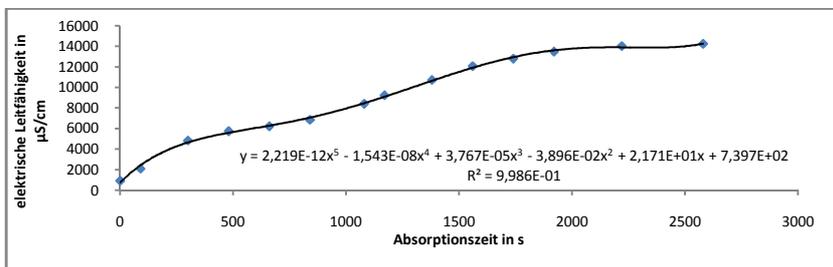


Abbildung 394 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

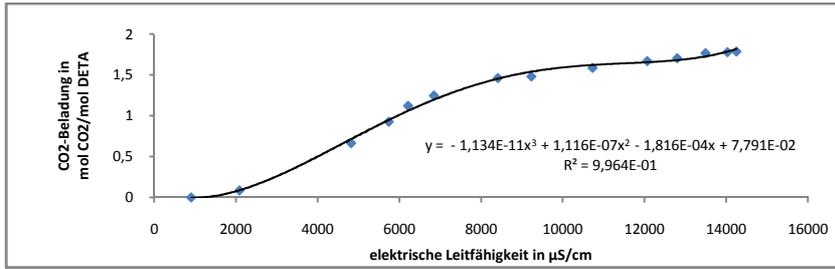


Abbildung 395 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DETA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

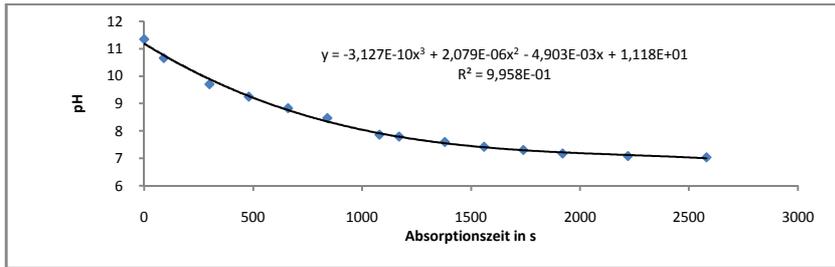


Abbildung 396 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

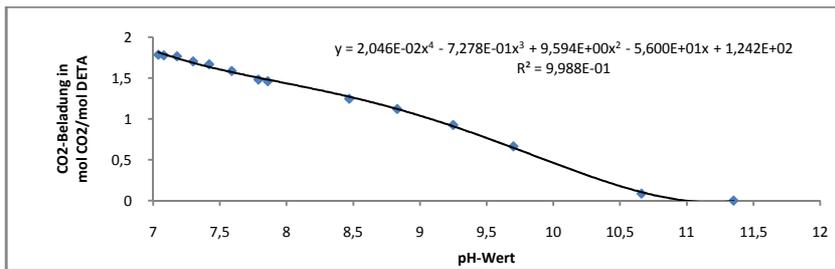


Abbildung 397 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DETA gegen den pH bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

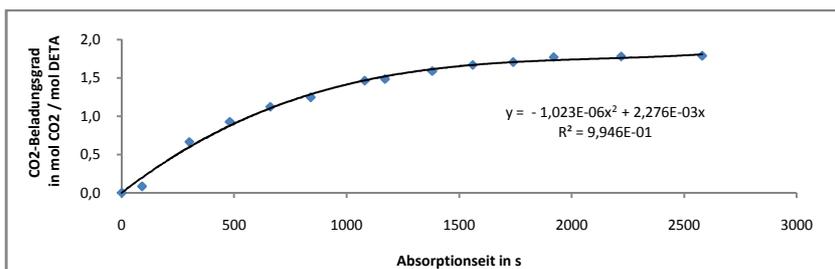


Abbildung 398 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol DETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

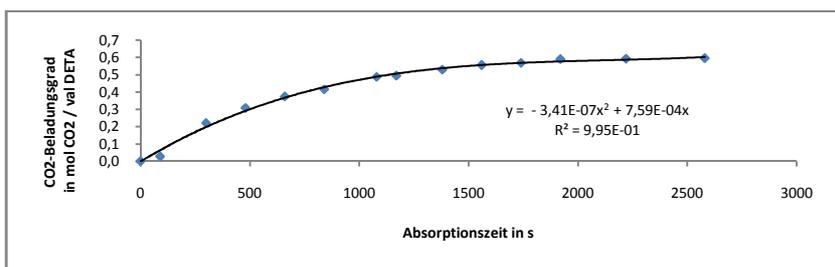


Abbildung 399 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val DETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

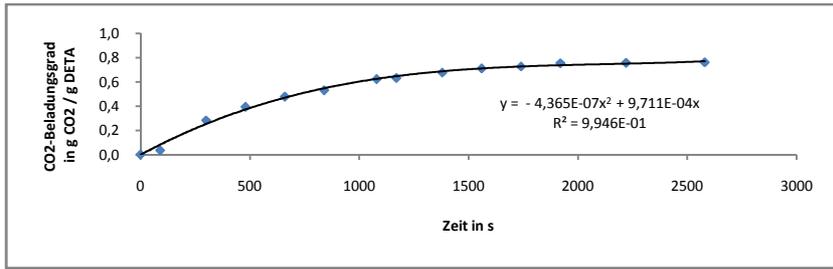


Abbildung 400 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g DETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

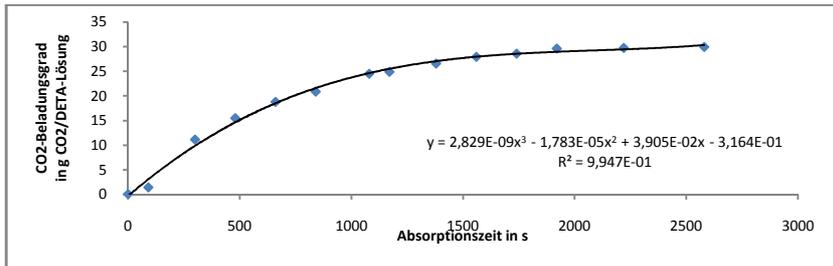


Abbildung 401 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

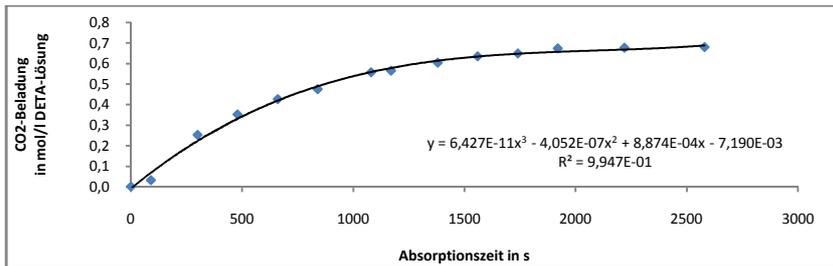


Abbildung 402 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

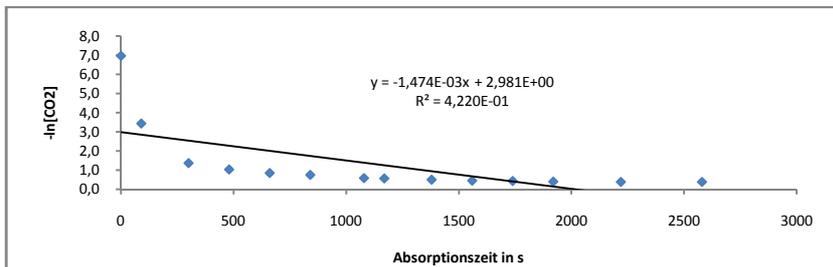


Abbildung 403 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

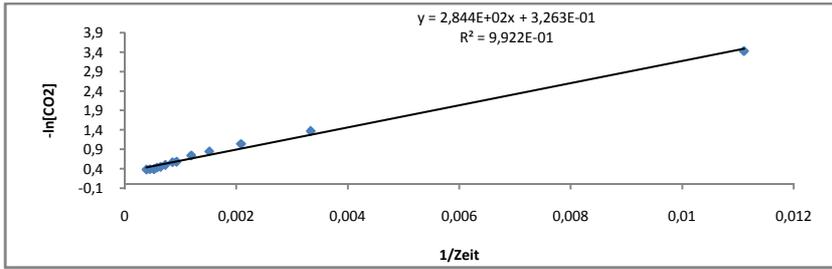


Abbildung 404 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

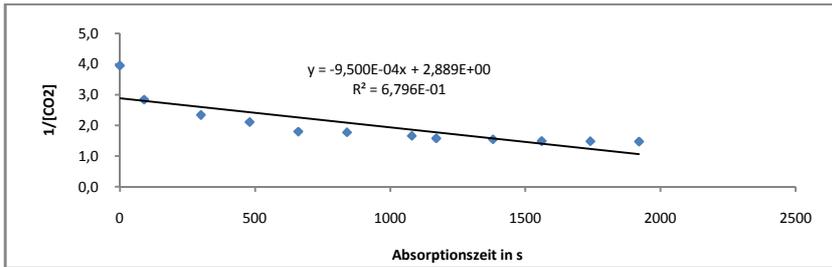


Abbildung 405 Verlauf des Kehrwerts der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

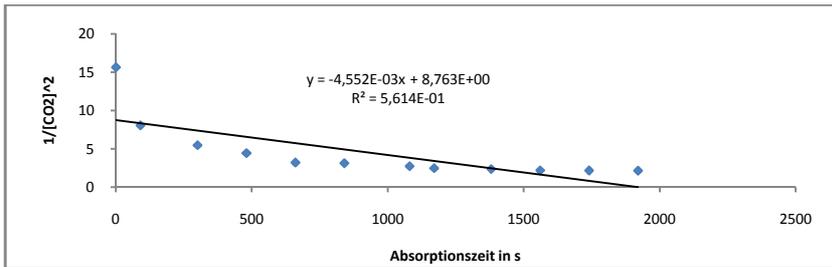


Abbildung 406 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

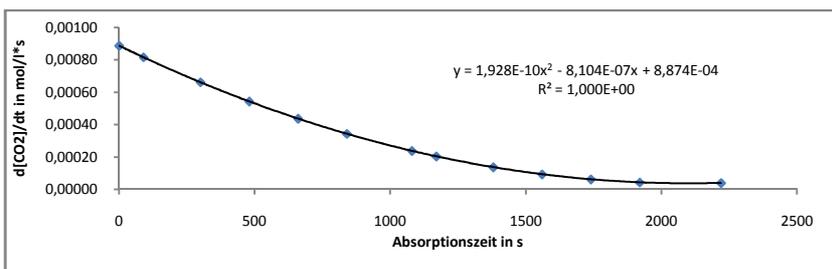


Abbildung 407 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

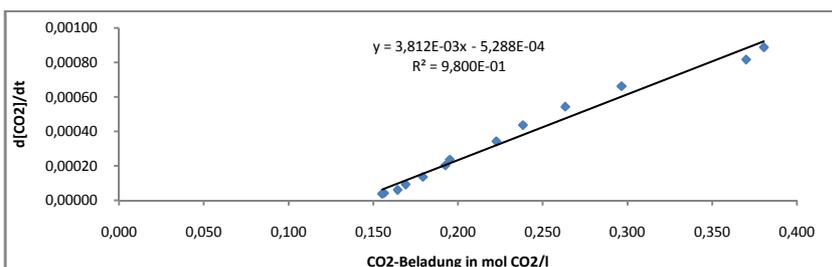


Abbildung 408 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von DETA in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

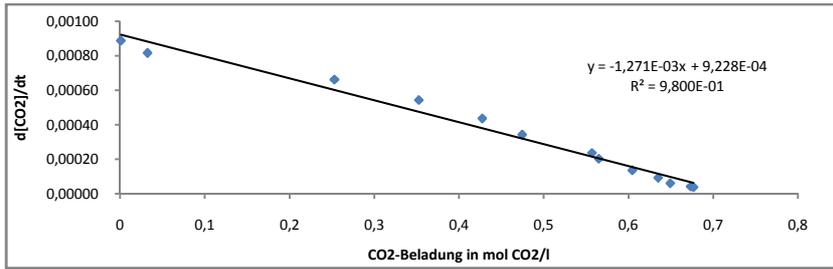


Abbildung 409 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

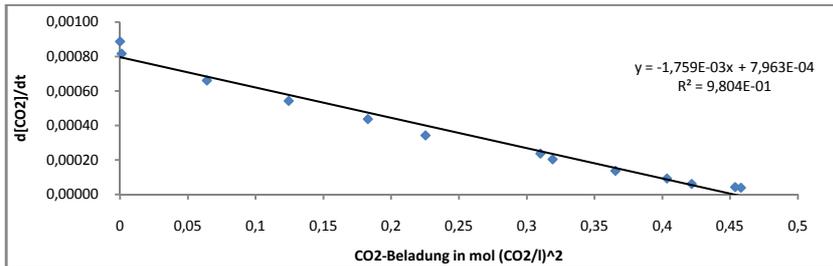


Abbildung 410 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

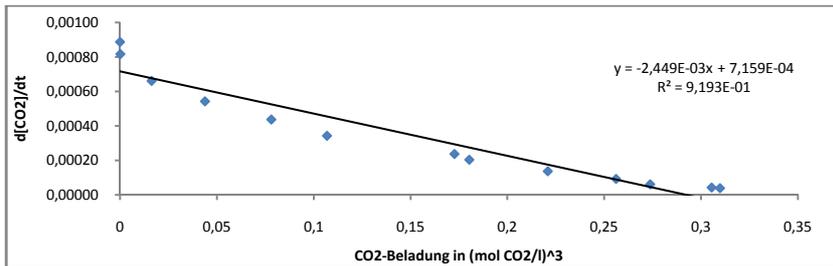


Abbildung 411 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

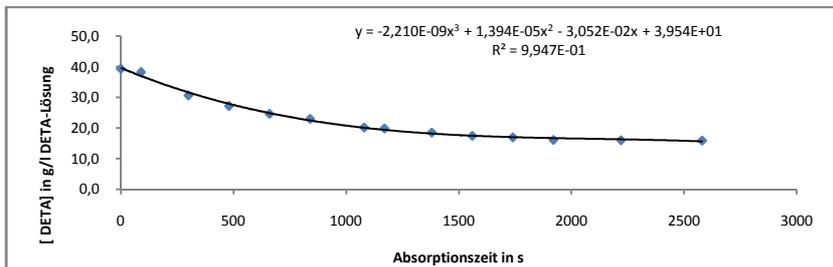


Abbildung 412 Verlauf der Konzentration von DETA in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>



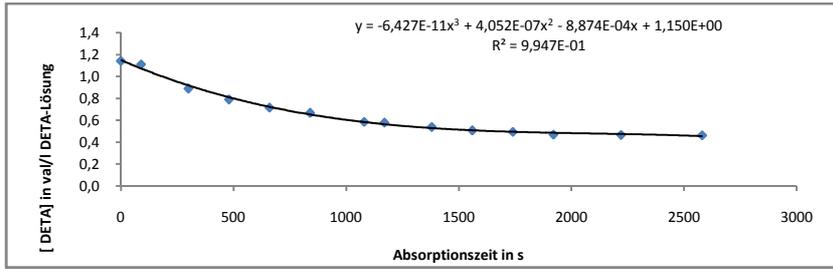


Abbildung 413 Verlauf der Konzentration von DETA in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

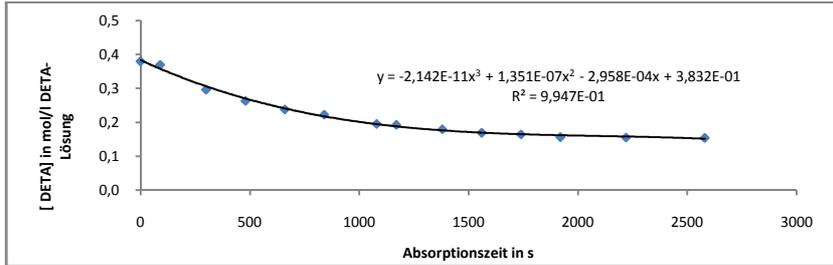


Abbildung 414 Verlauf der Konzentration von DETA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

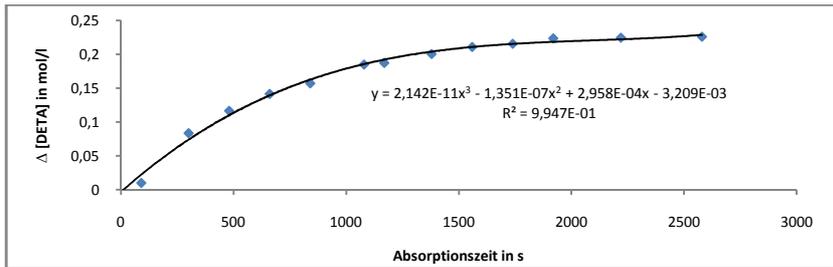


Abbildung 415 Verlauf des Umsatzes von DETA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

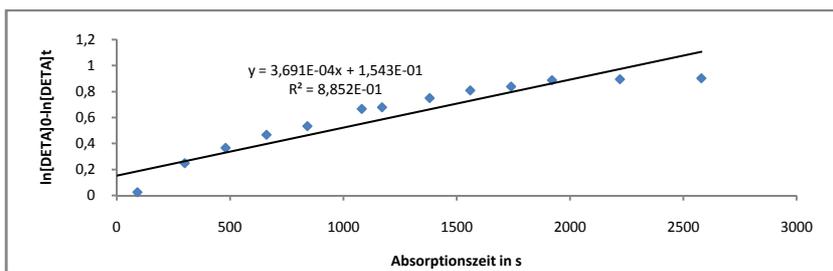


Abbildung 416 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

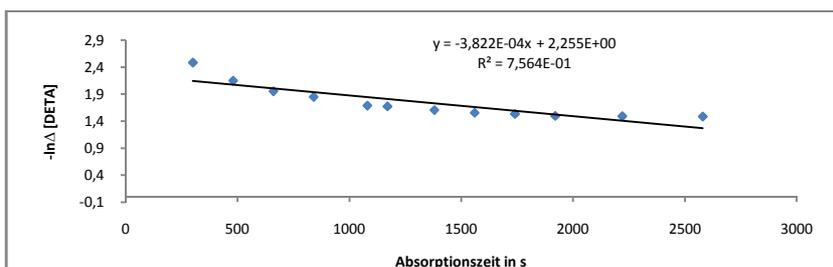


Abbildung 417 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von DETA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

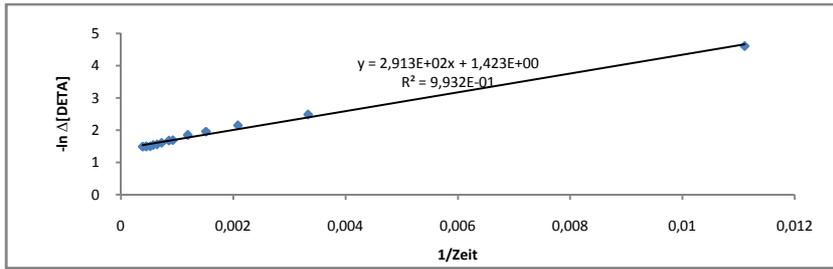


Abbildung 418 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von DETA in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

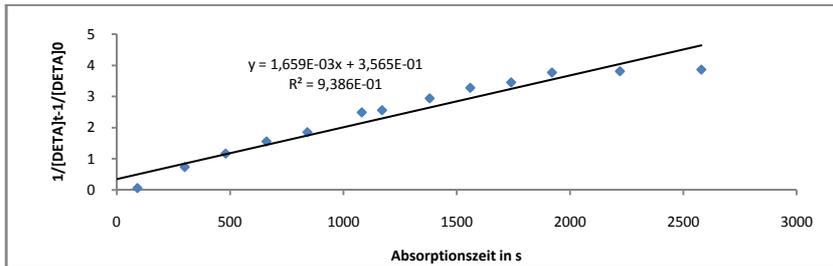


Abbildung 419 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

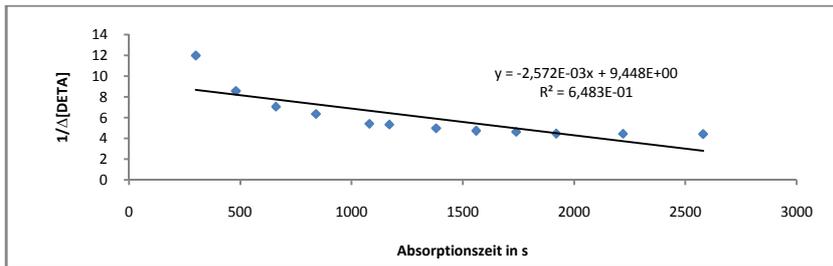


Abbildung 420 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von DETA in mol/l gegen die Reaktionszeit beider Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

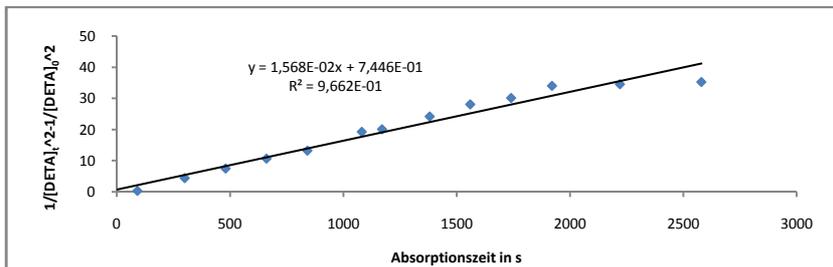


Abbildung 421 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

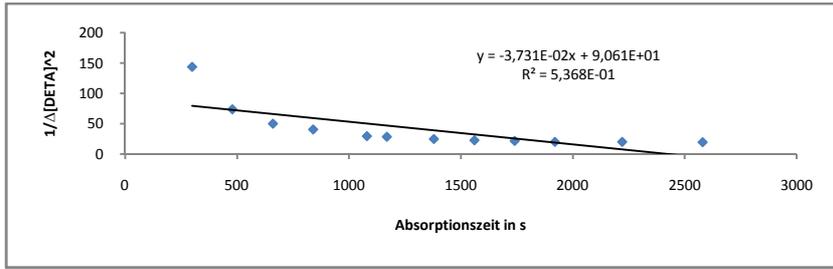


Abbildung 422 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von DETA in mol/l gegen die Reaktionszeit beider Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

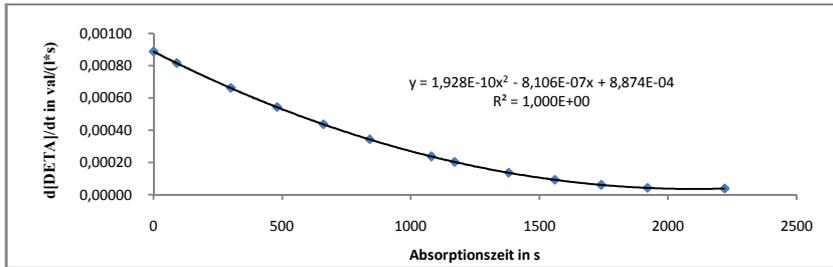


Abbildung 423 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Amin/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

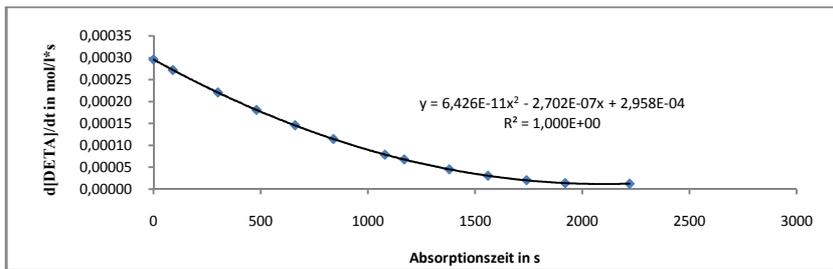


Abbildung 424 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Amin/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

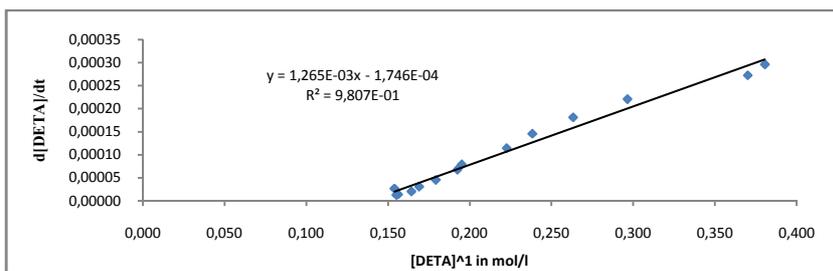
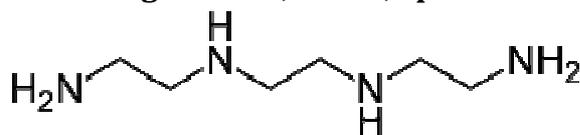


Abbildung 425 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Amin/(l\*s) gegen die Konzentration in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

## 1.15 Das Reaktionssystem Triethylentetramin/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.15.1 Allgemeines, Daten, Spezifikation



C<sub>6</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub> Triethylentetramin TETA

Triethylentetramin TETA ist bei Raumbedingungen eine gelbliche, ölige, hygroskopische Flüssigkeit mit strengem aminartigen-amoniakalischen Geruch, die mit Wasser in allen Verhältnissen mischbar ist. Wässrige Lösungen des Tetramins TETA mit zwei primären und zwei sekundären Amingruppen sind stark basisch und formal 4-fach protonierbar. TETA ist ein starkes Nucleophil (Summenformel C<sub>6</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>, CAS-Nummer 112-24-3, Molare Masse 146,24 g·mol<sup>-1</sup>, Dichte 0,98 g·cm, Schmelzpunkt 12 °C, Siedepunkt 278 °C, Dampfdruck 1,3 Pa (20 °C), Brechungsindex 1,496).

### 1.15.2 Sicherheitshinweise für den Umgang mit TETA

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H: 312, 314, 317, 412 und P: 280, 273, 302+352, 301+330+331, 305+351+338, 309+310

#### EU-Gefahrstoffkennzeichnung



#### R- und S-Sätze

H: 312, 314, 317, 412 und P: 280, 273, 302+352, 301+330+331, 305+351+338, 309+310

### 1.15.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von TETA-

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration einer TETA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C für eine Äquivalentwertigkeit von 3,85 die vier pKa-Werte 10,5 und 9,3 und 6,9 und 3,8

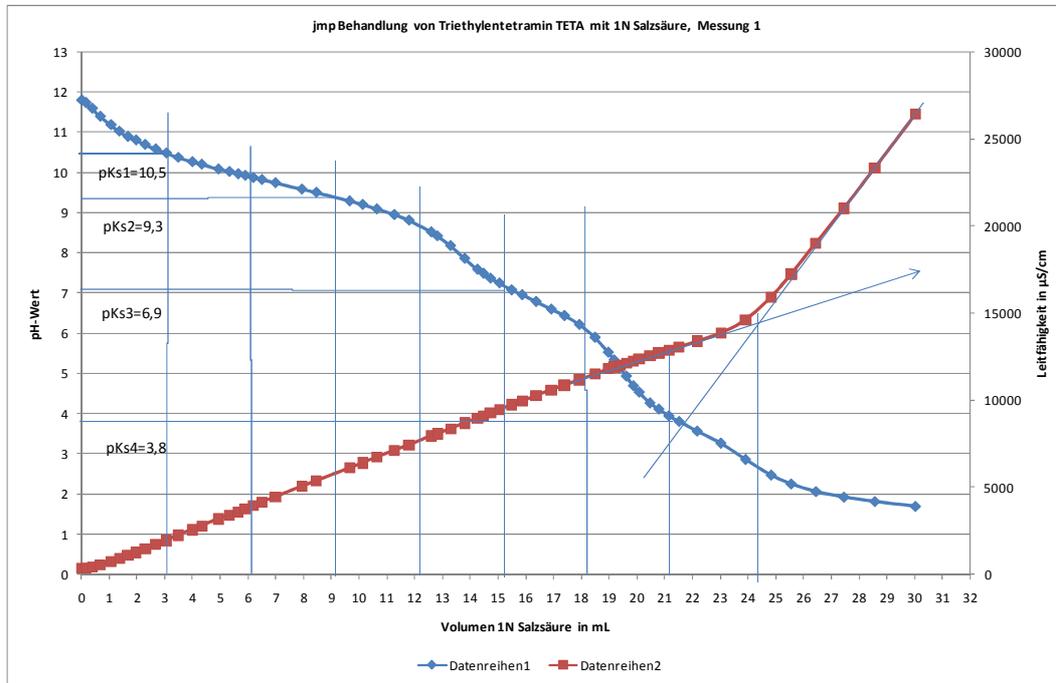


Abbildung 426 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration einer TETA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure

#### 1.15.4 Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser wurde mit CO<sub>2</sub> im Grawimikroblasenwäscher unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,8 mit CO<sub>2</sub> bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,2 behandelt.

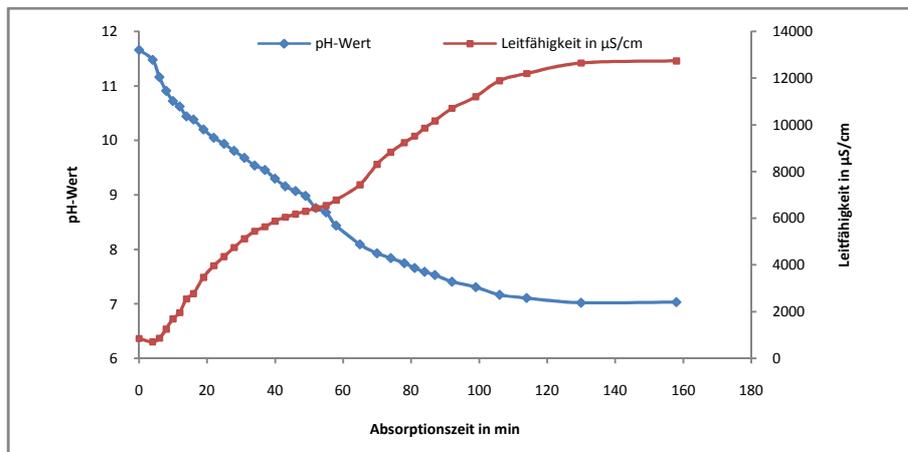


Abbildung 427 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> Raumbedingungen

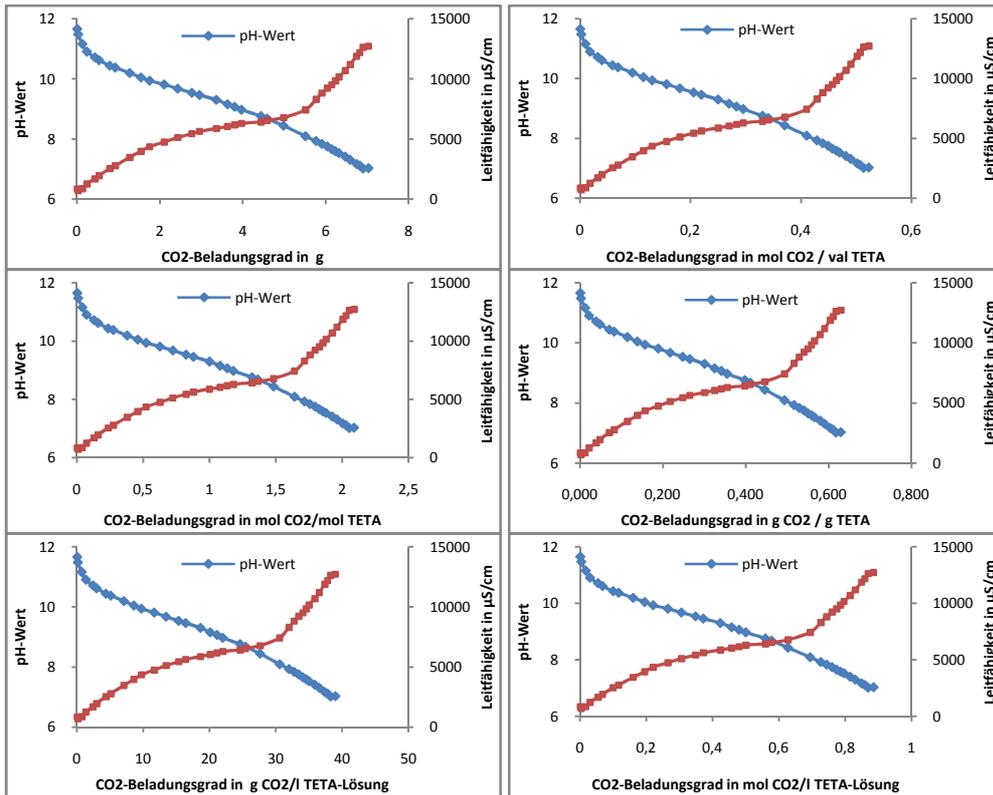


Abbildung 428 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 6,929 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

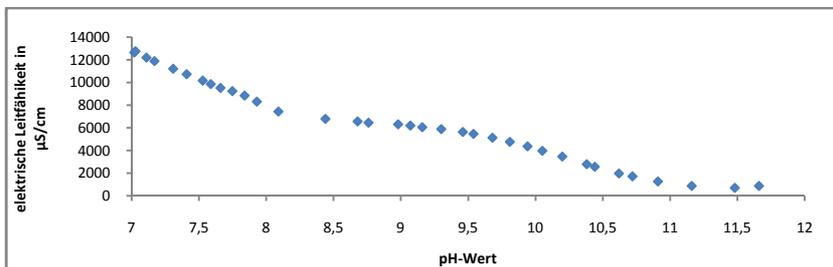


Abbildung 429 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

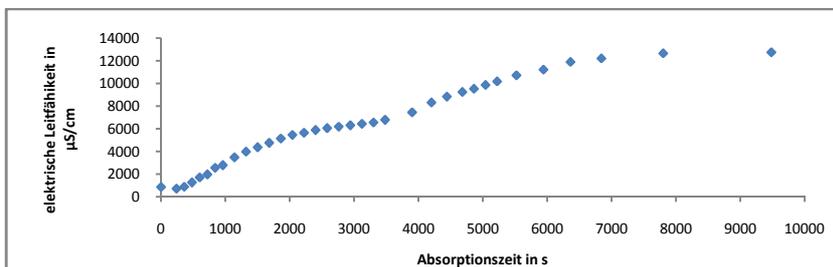


Abbildung 430 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

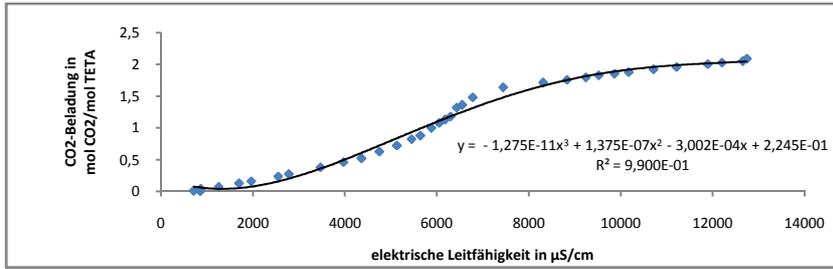


Abbildung 431 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TETA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

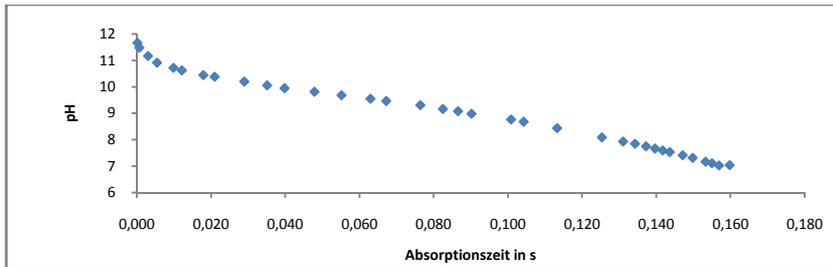


Abbildung 432 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

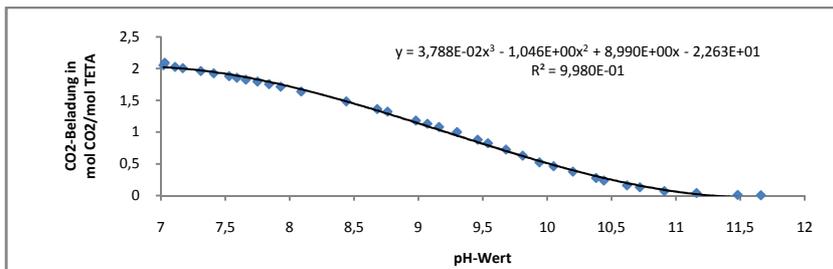


Abbildung 433 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TETA gegen den pH bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

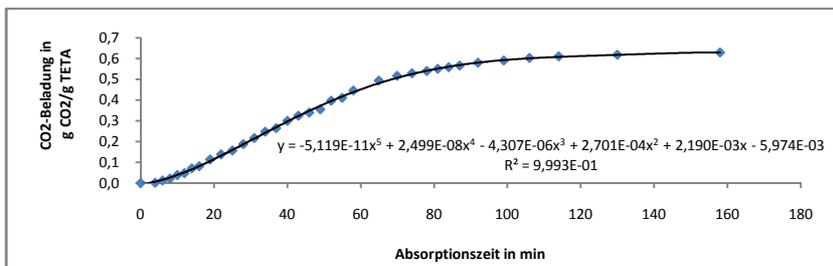


Abbildung 434 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g TETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

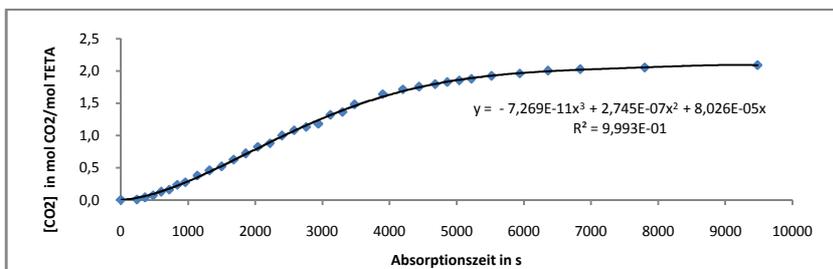


Abbildung 435 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol TETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

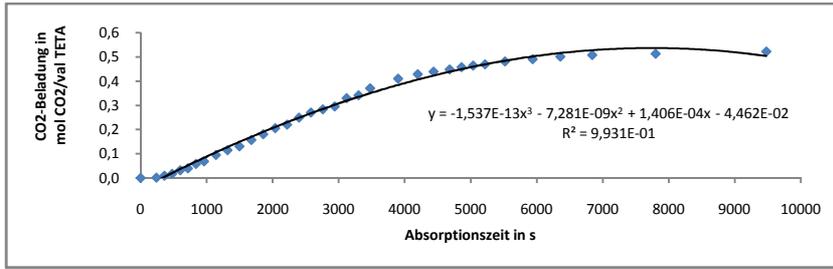


Abbildung 436 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val TETA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

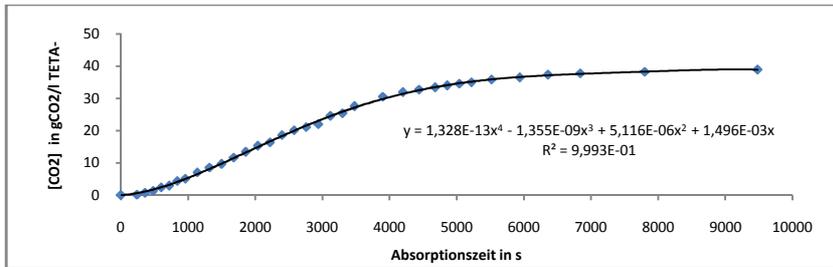


Abbildung 437 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

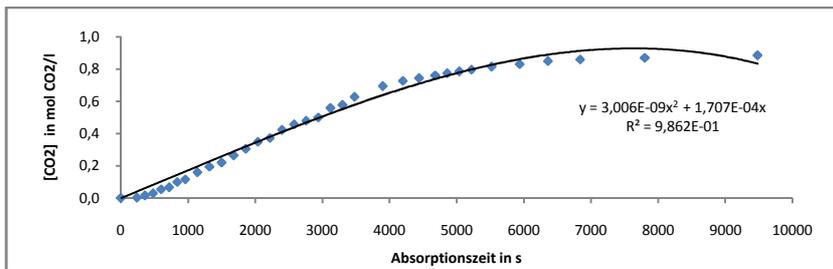


Abbildung 438 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

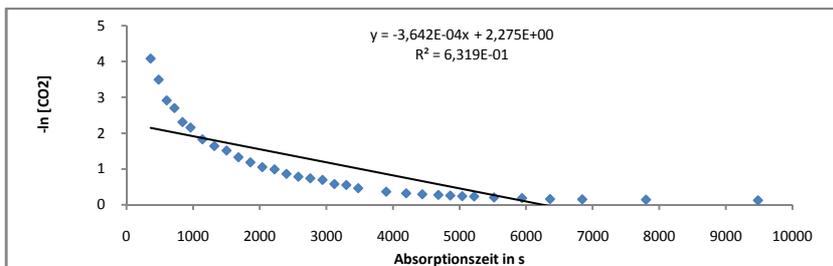


Abbildung 439 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

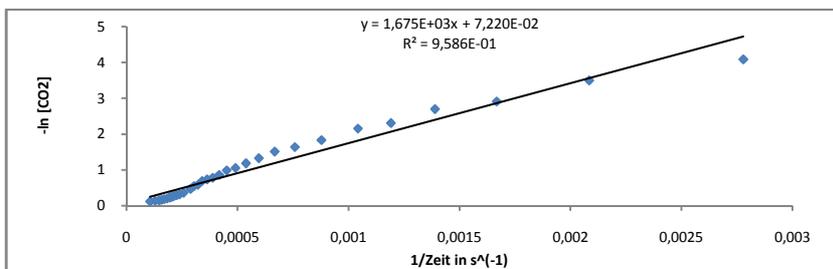


Abbildung 440 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

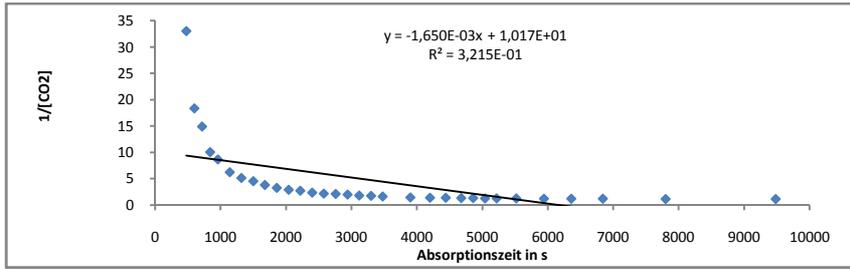


Abbildung 441 Verlauf des Kehrwerts der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

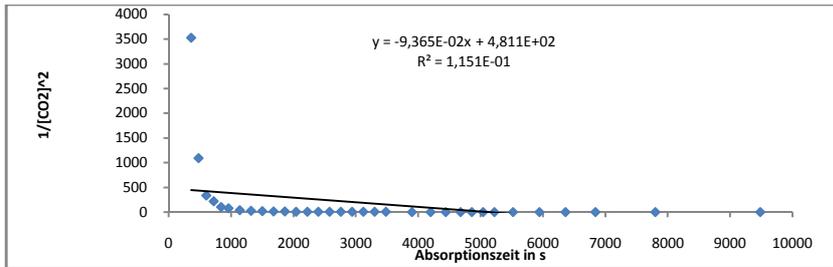


Abbildung 442 Verlauf des Kehrwerts der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

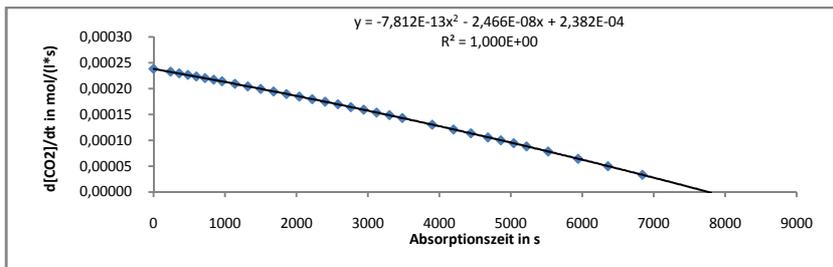


Abbildung 443 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

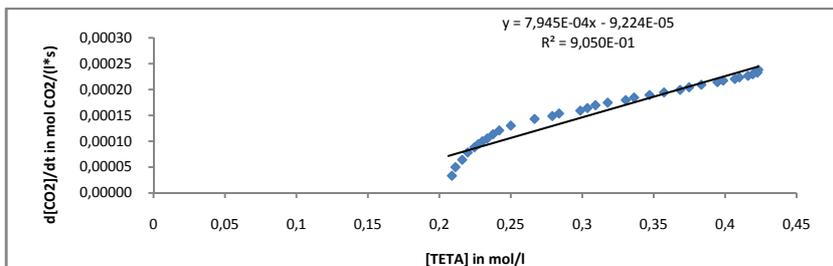


Abbildung 444 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Konzentration von TETA in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

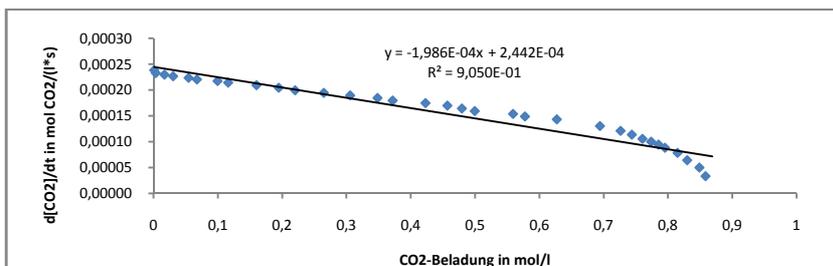


Abbildung 445 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

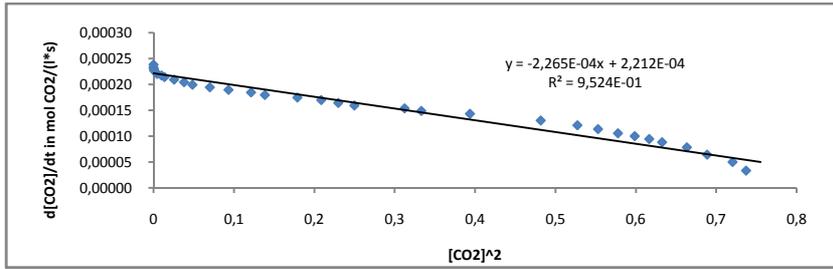


Abbildung 446 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

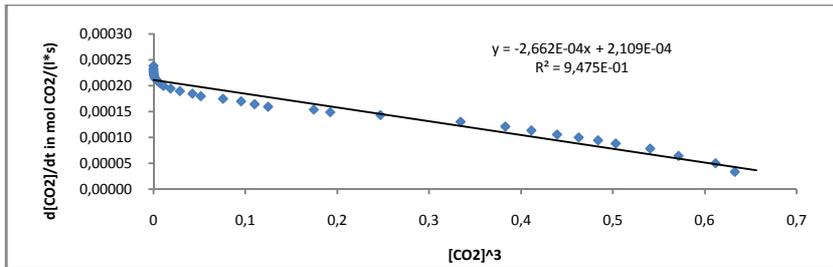


Abbildung 447 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

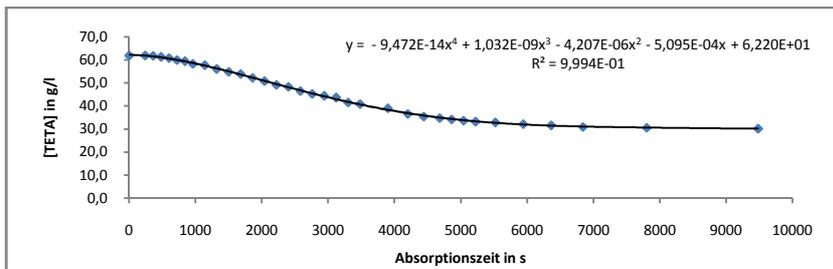


Abbildung 448 Verlauf der Konzentration TETA in g/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

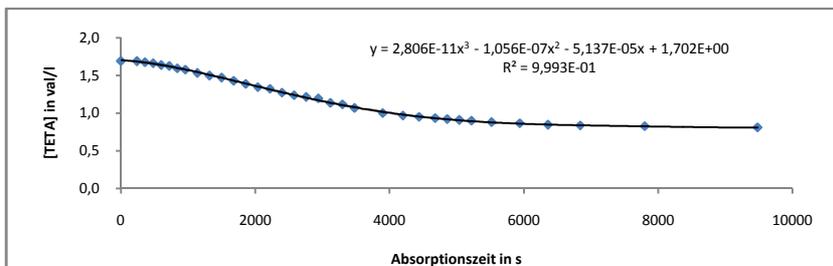


Abbildung 449 Verlauf der Konzentration TETA in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

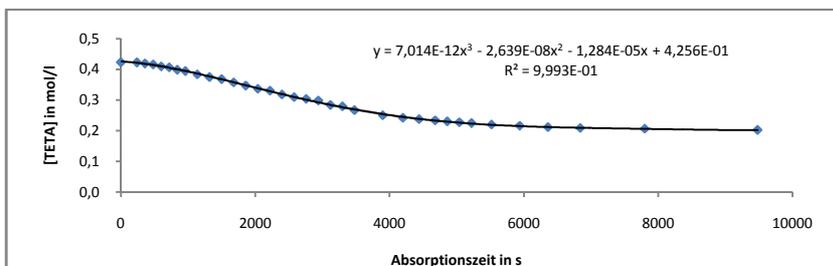


Abbildung 450 Verlauf der Konzentration TETA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

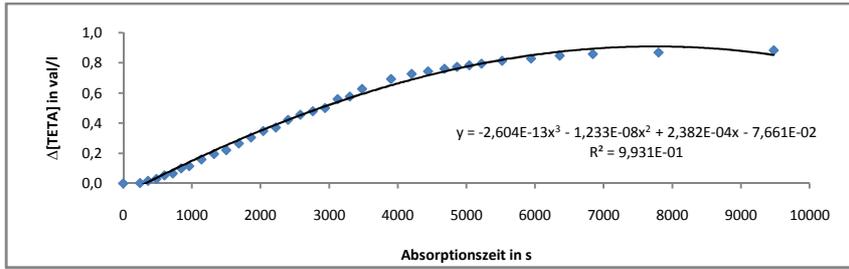


Abbildung 451 Verlauf des Umsatzes von TETA in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

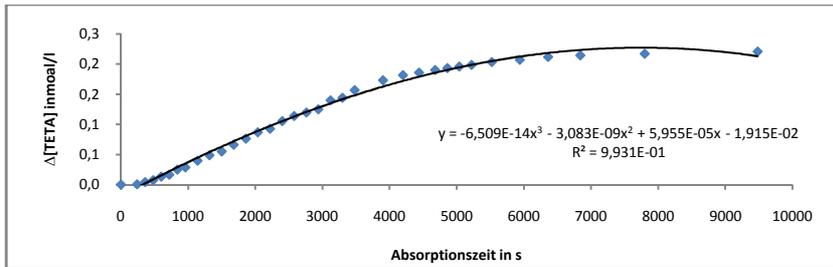


Abbildung 452 Verlauf des Umsatzes von TETA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

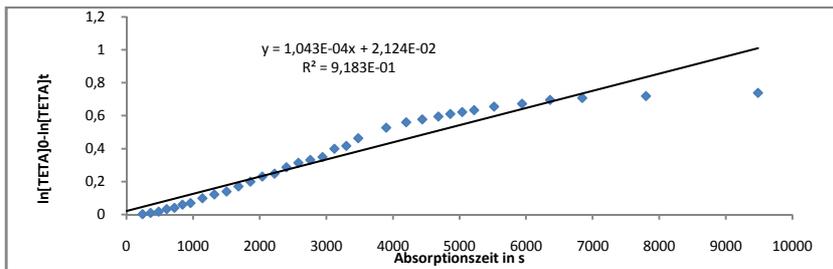


Abbildung 453 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

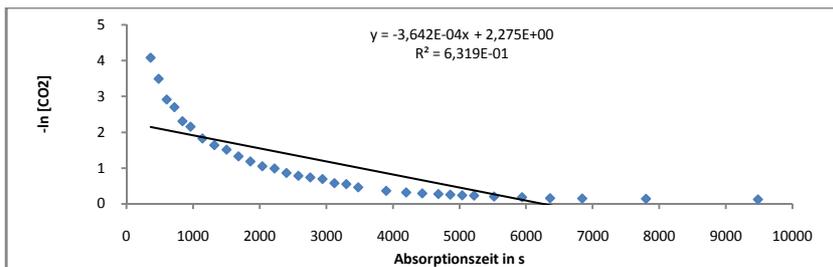


Abbildung 454 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von TETA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

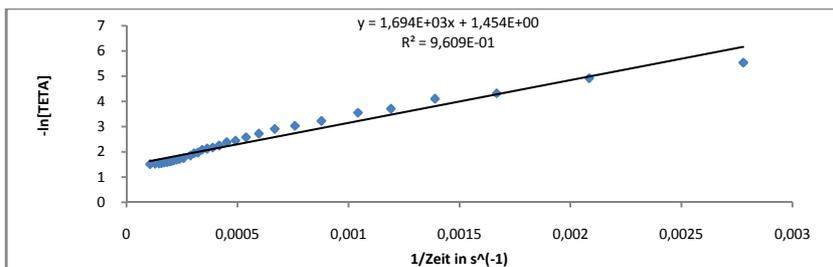


Abbildung 455 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von TETA in mol/l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

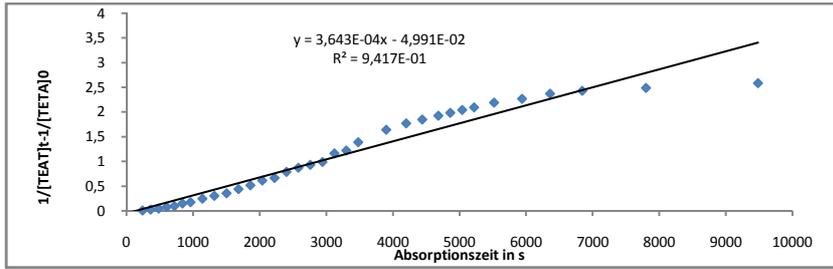


Abbildung 456 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

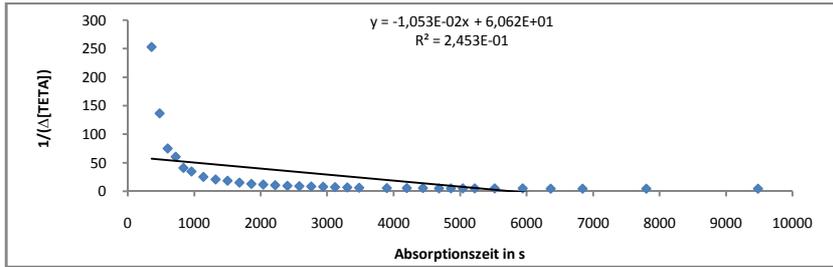


Abbildung 457 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von TETA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

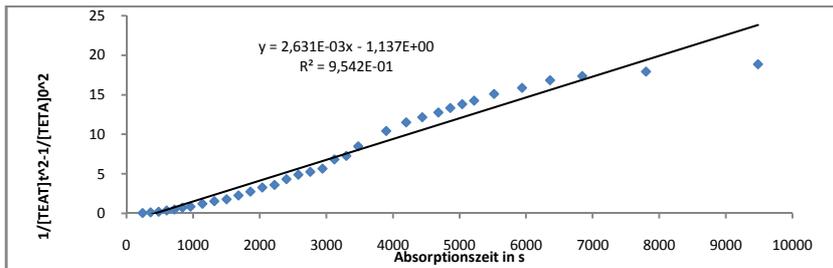


Abbildung 458 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

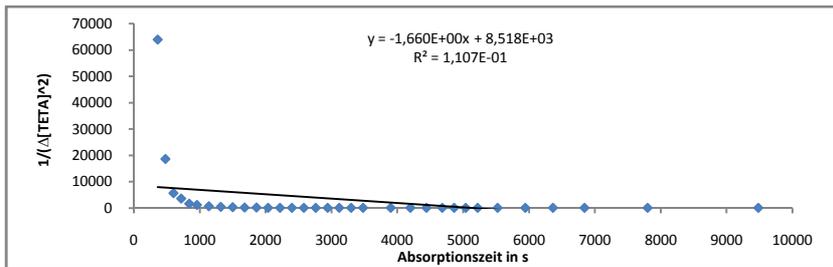


Abbildung 459 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von TETA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

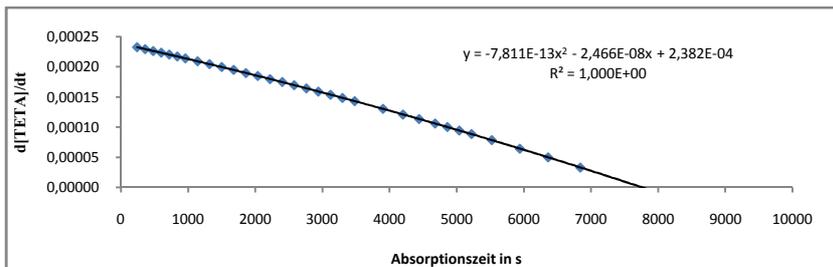


Abbildung 460 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val TETA/(l\*s) Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

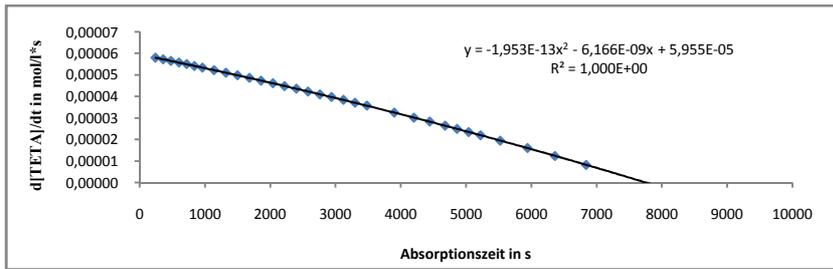


Abbildung 461 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TETA/(l\*s) Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 6,92 m%igen TETA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

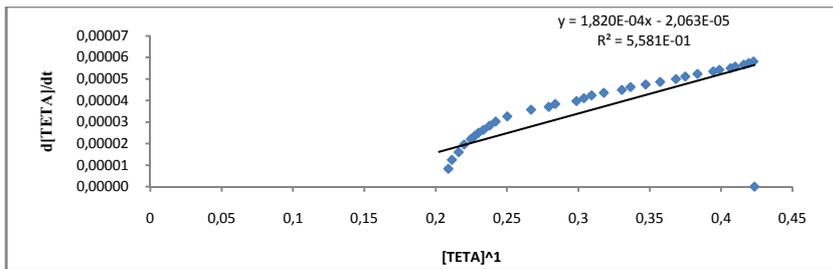


Abbildung 462 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol TETA/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in mol/l bei der Behandlung einer 3,94 m%igen DETA-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit  $\text{CO}_2$

## 1.16 Das Reaktionssystem Pentaethylenhexamin/Wasser/CO<sub>2</sub>

Die Bezeichnung Pentaethylenhexamin, PEHA, ist ein allgemeiner Ausdruck, der Gemische aus strukturisomeren Oligoethylenhexaminen mit der Summenformel C<sub>10</sub>H<sub>28</sub>N<sub>6</sub> beschreibt. Pentaethylenhexamin PEHA ist eine stark ölige, gelbliche, hygroskopische Flüssigkeit mit streng aminartigen-ammoniakalischen Geruch, die vollständig mit Wasser mischbar ist. Wässrige Lösungen des Hexamins PEHA mit primären, sekundären und tertiären Aminogruppen sind stark basisch und formal 6-fach protonierbar. PEHA ist ein starkes Nucleophil (CAS 4067-16-7, Molmasse=232,44g/mol, Dichte= 0,95 g/mL).

### 1.16.1 Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEHA

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung

#### Gefahr

#### H-Sätze (Hazard statements) und P-Sätze (Precautionary statements)

H302 + H312-H314-H317-H410 und P273-P280-P305 + P351 + P338-P310-P501

Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration einer PEHA-Lösung in Wasser mit 1N-Salzsäure

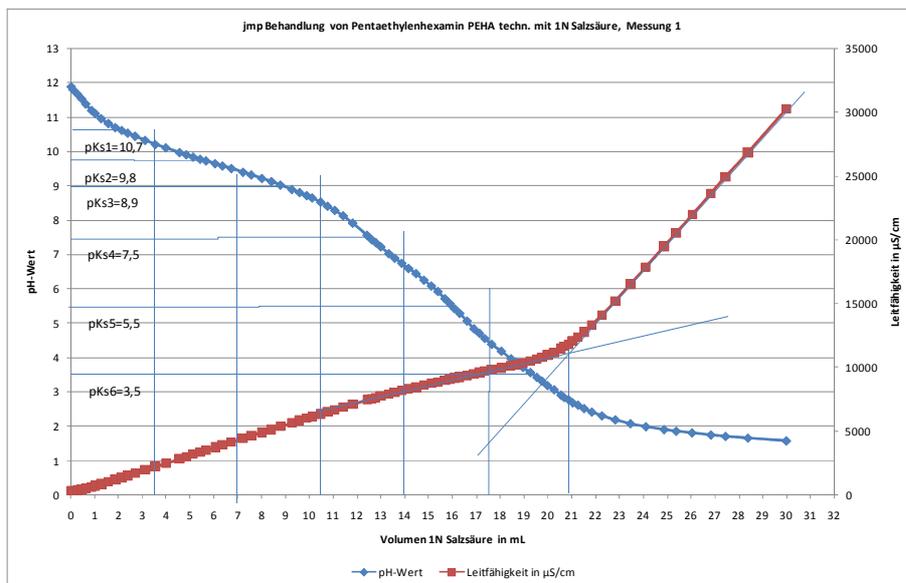


Abbildung 463 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration einer wässrigen PEHA-Lösung mit 1N Salzsäure

### 1.16.2 Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 3,44 m%ige PEHA-Lösung in Wasser wurde mit CO<sub>2</sub> im Grawimikroblasenwäscher unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,2 mit mäßiger Konvektion bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 6,8 behandelt

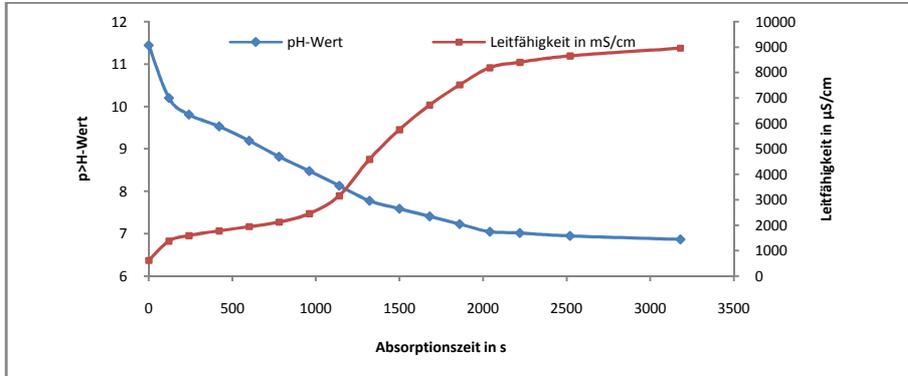


Abbildung 464 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

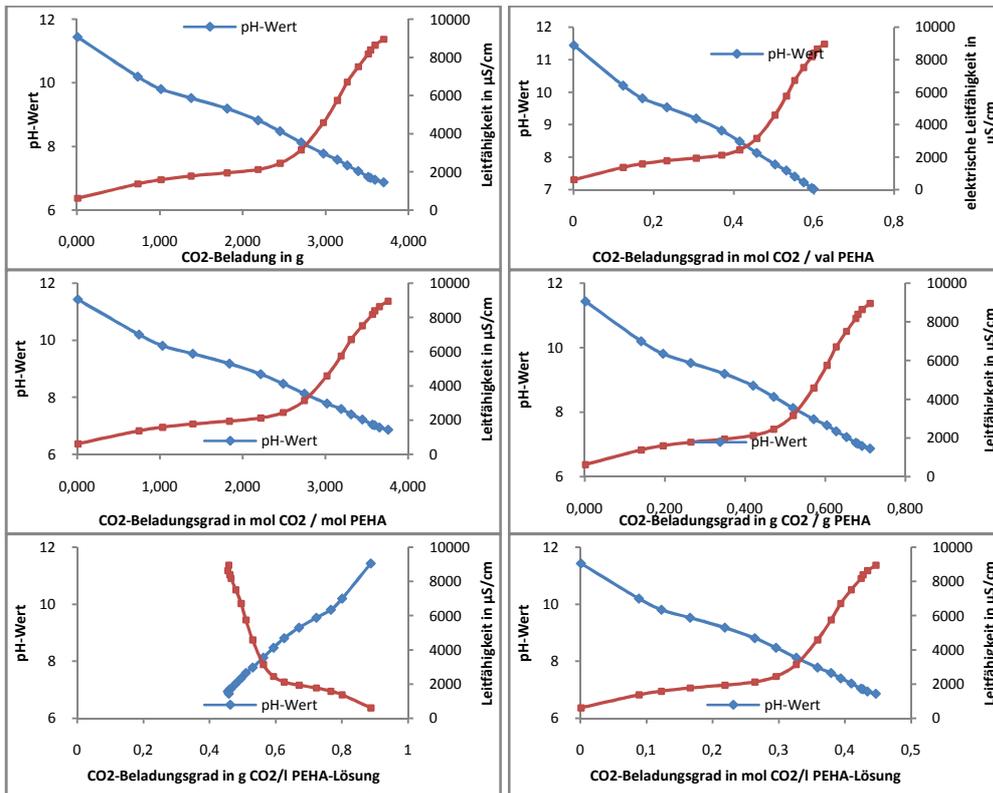


Abbildung 465 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

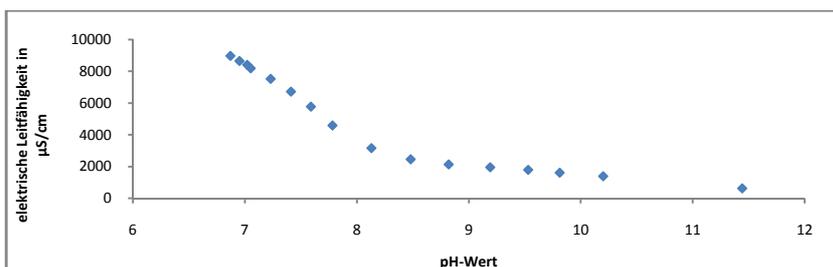


Abbildung 466 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

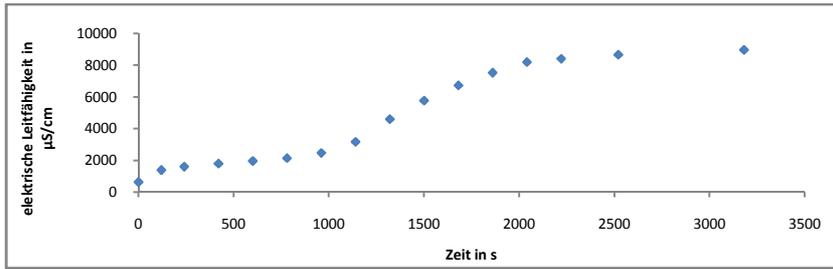


Abbildung 467 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

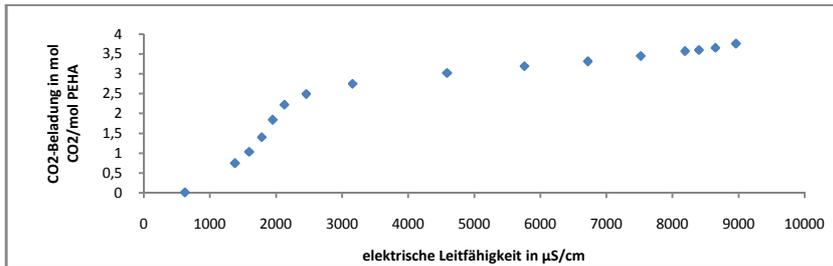


Abbildung 468 Korrelation CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEHA gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

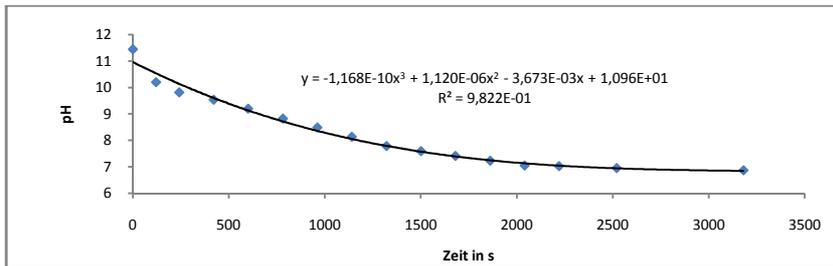


Abbildung 469 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

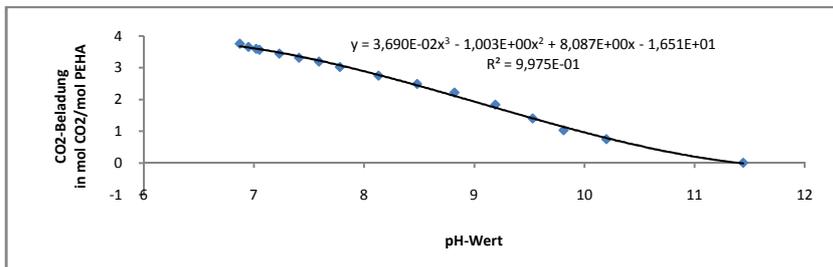


Abbildung 470 korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEHA gegen den pH bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

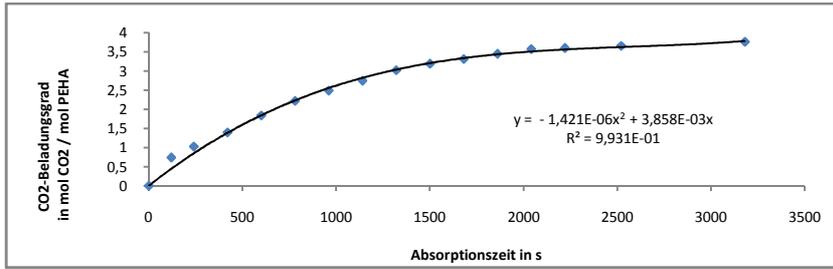


Abbildung 471 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEHA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

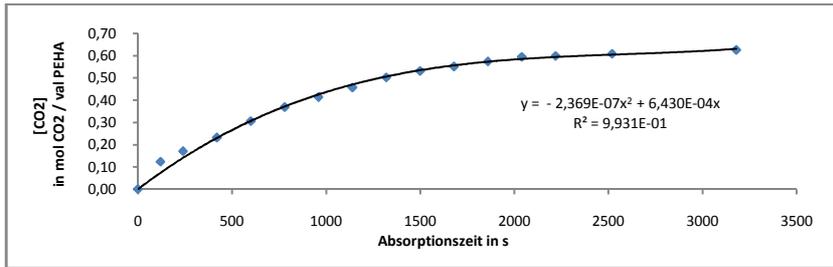


Abbildung 472 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEHA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

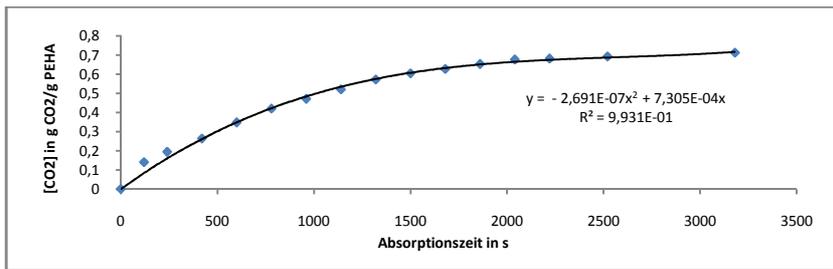


Abbildung 473 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g PEHA gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

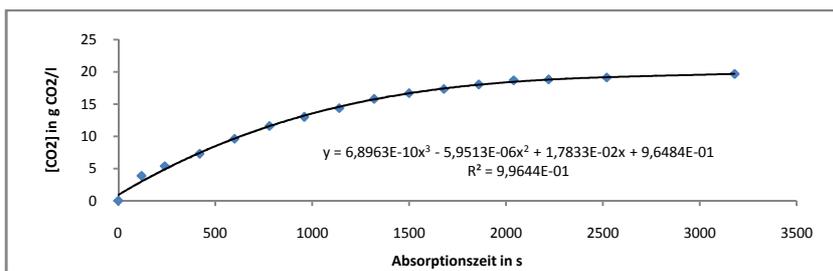


Abbildung 474 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

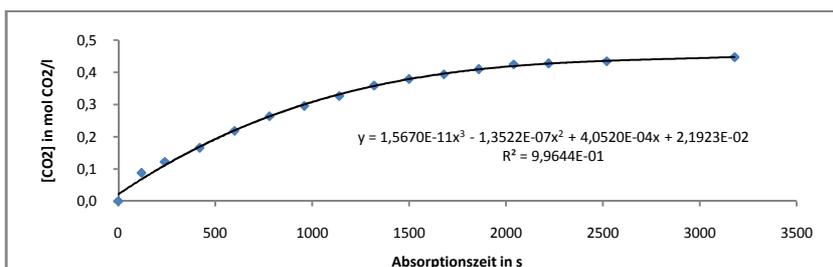


Abbildung 475 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

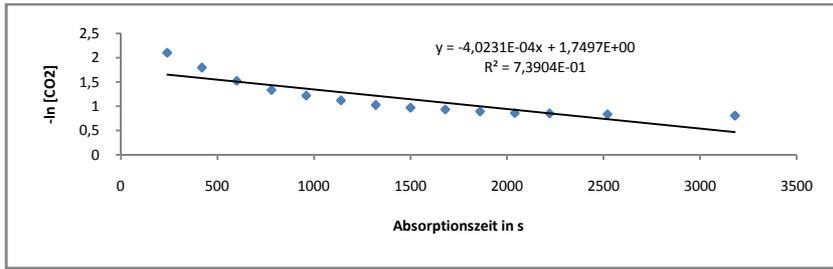


Abbildung 476 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

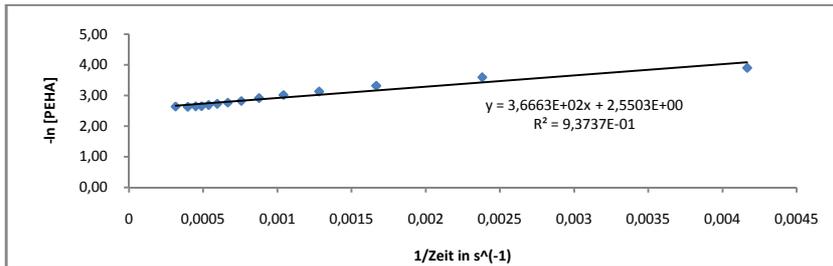


Abbildung 477 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

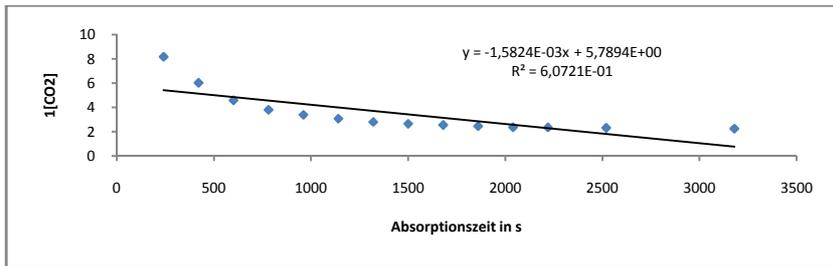


Abbildung 478 Verlauf des Kehrwertes der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

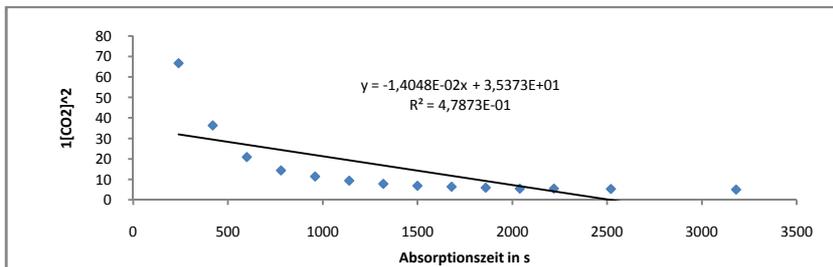


Abbildung 479 Verlauf des Kehrwertes der quadrierten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

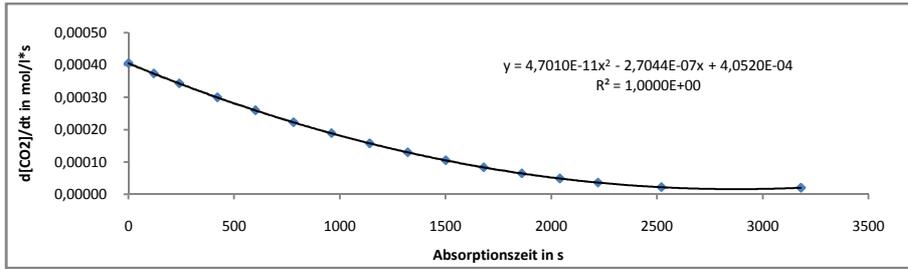


Abbildung 480 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

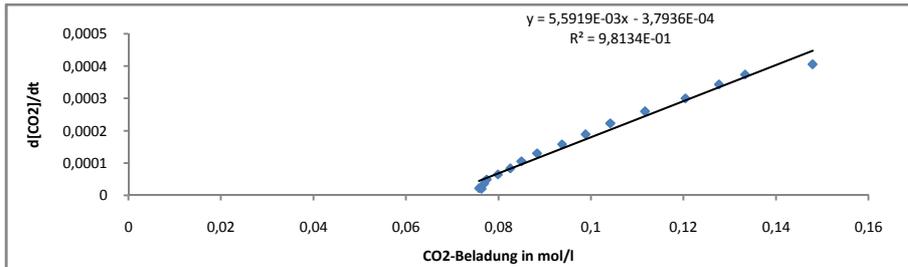


Abbildung 481 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Konzentration von PEHA in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

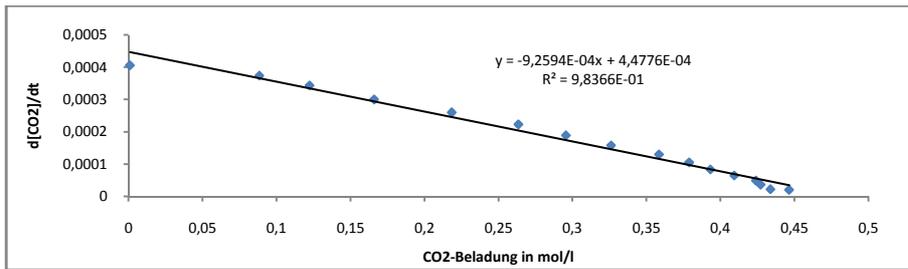


Abbildung 482 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

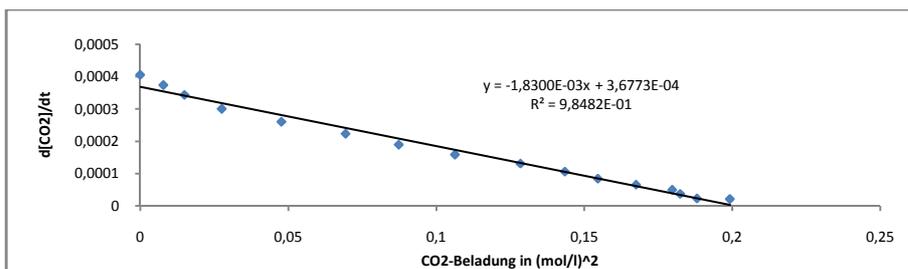


Abbildung 483 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die quadrierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{l}$  bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

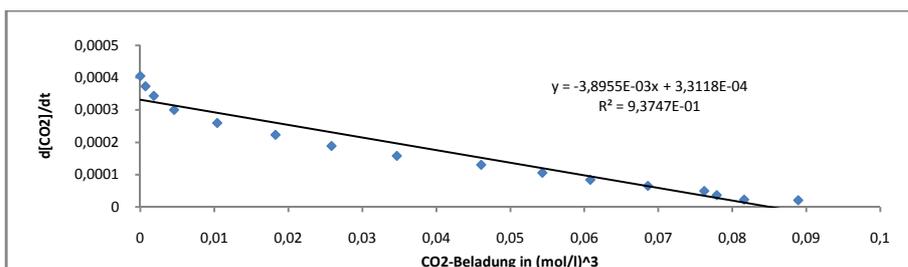


Abbildung 484 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

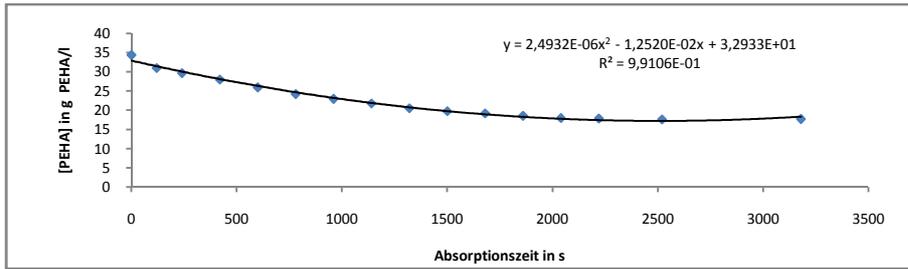


Abbildung 485 Verlauf der Konzentration von PEHA in g/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

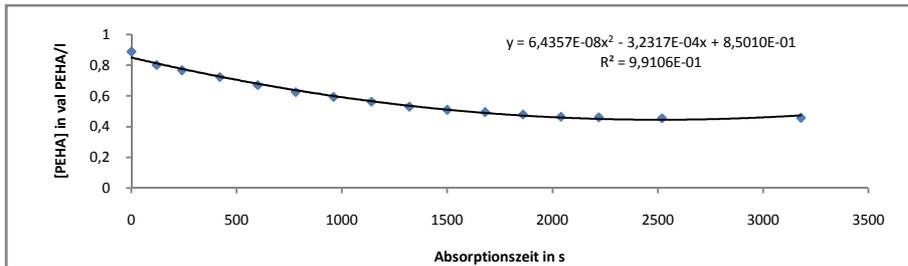


Abbildung 486 Verlauf der Konzentration von PEHA in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

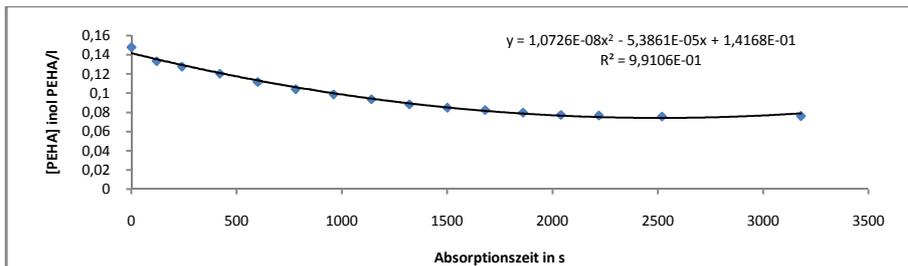


Abbildung 487 Verlauf der Konzentration von PEHA in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

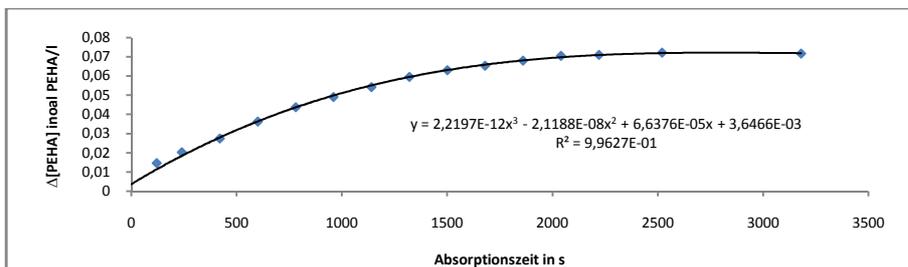


Abbildung 488 Verlauf des Umsatzes von PEHA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

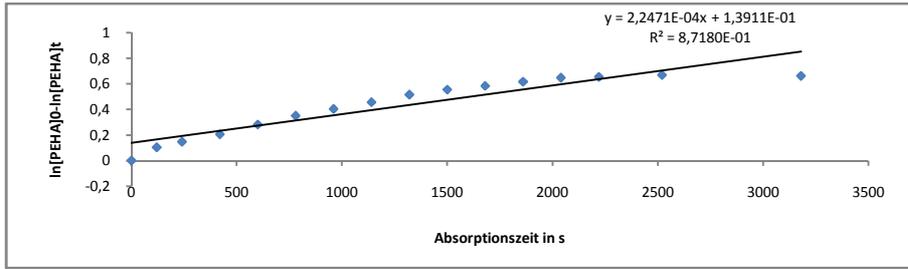


Abbildung 489 Arrhenius-Plot 1.Ordnung für die Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

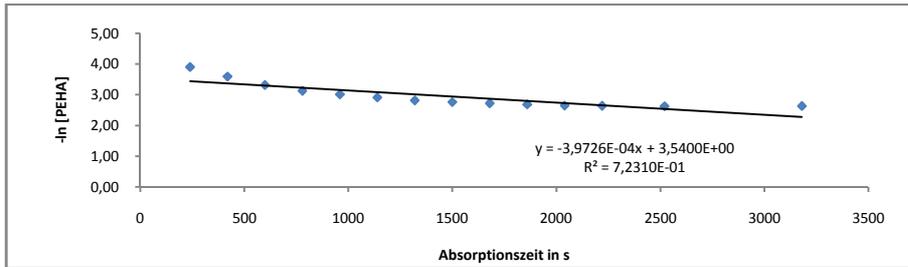


Abbildung 490 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEHA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

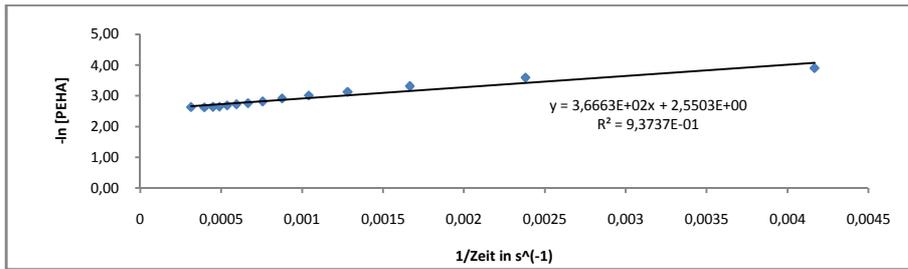


Abbildung 491 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEHA in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

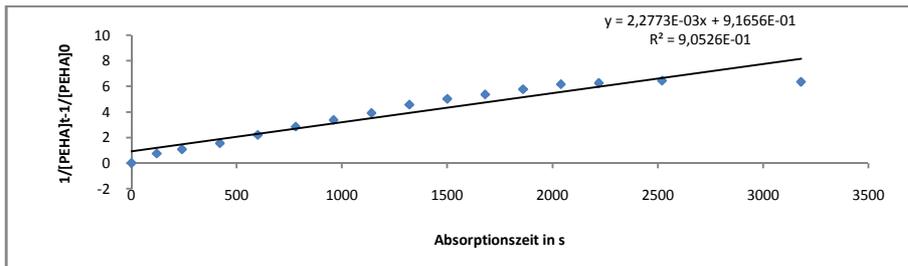


Abbildung 492 Arrhenius-Plot 2.Ordnung für die Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

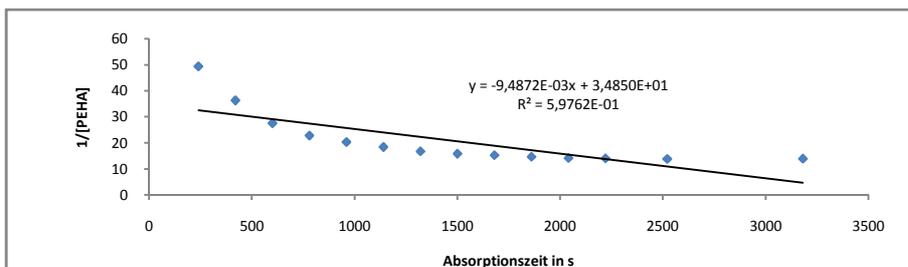


Abbildung 493 Verlauf des Kehrwertes des Umsatzes von PEHA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

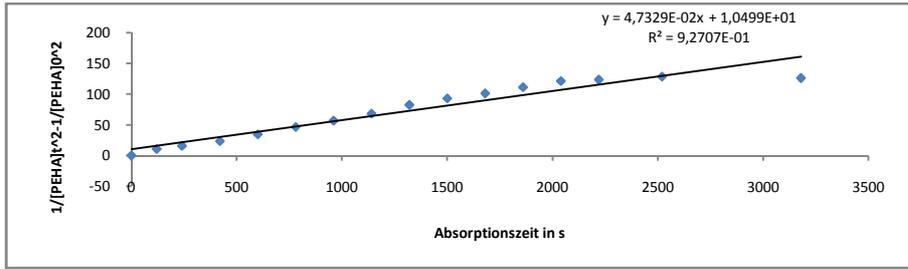


Abbildung 494 Arrhenius-Plot 3.Ordnung für die Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

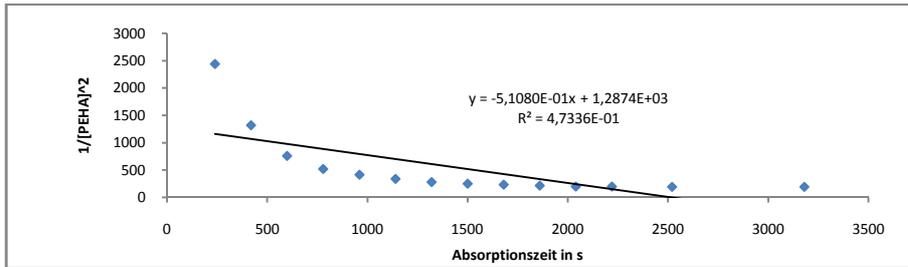


Abbildung 495 Verlauf des Kehrwertes des quadrierten Umsatzes von PEHA in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

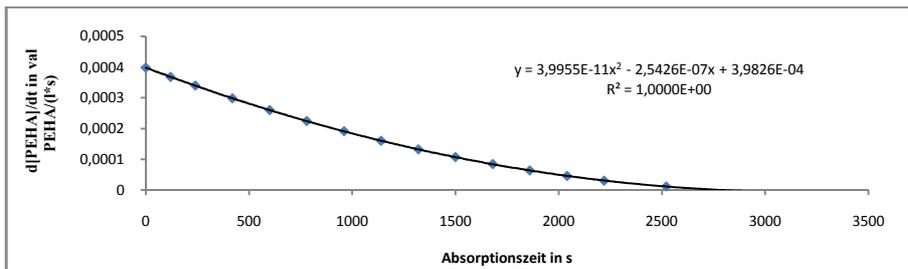


Abbildung 496 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEHA/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

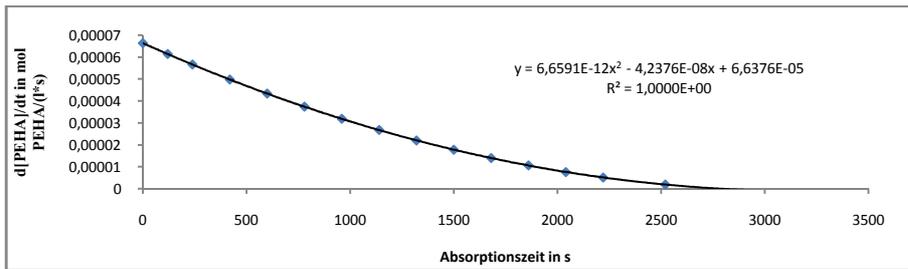
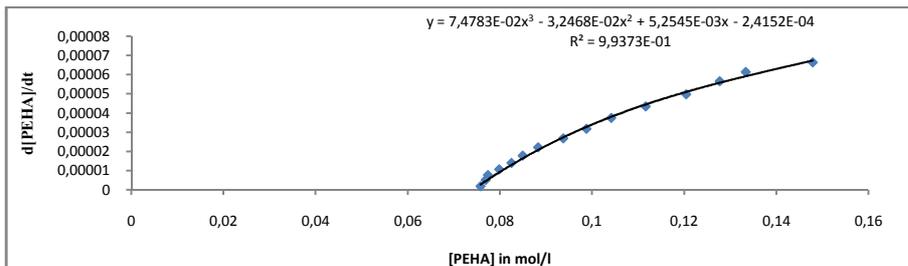


Abbildung 497 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEHA/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in mol PEHA/l bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

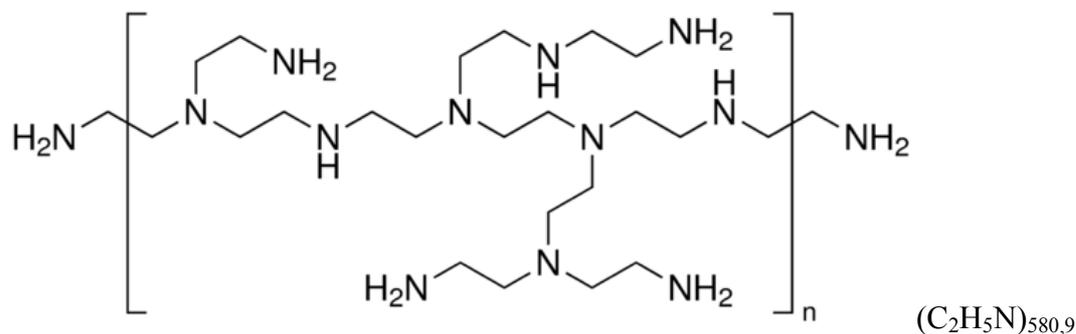


## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

**Abbildung 498** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEHA/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in mol PEHA/l bei der Behandlung einer 3,44 m%igen PEHA-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

## 1.17 Das Reaktionssystem Polyethylenimin PEI25000/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.17.1 Allgemeines, Spezifikation, Eigenschaften Daten von PEI25000



PEI25000 ist bei Raumbedingungen eine gelbliche, hochviskose, hygroskopische Flüssigkeit mit ammoniakalischen Geruch, die mit Wasser begrenzt mischbar ist. Wässrige Lösungen des Polyamins sind stark basisch und ohne Berücksichtigung der Endgruppen formal gewichtsgemittelt 1394-fach protonierbar. PEI25000 ist ein starkes Nucleophil.

CAS Nummer 9002-98-6, Gewichtsgemittelte Molmasse 25000 g/mol, molare Repeatingeinheit 43.04 g/mol

### 1.17.2 Infrarotspektrometrische Untersuchung

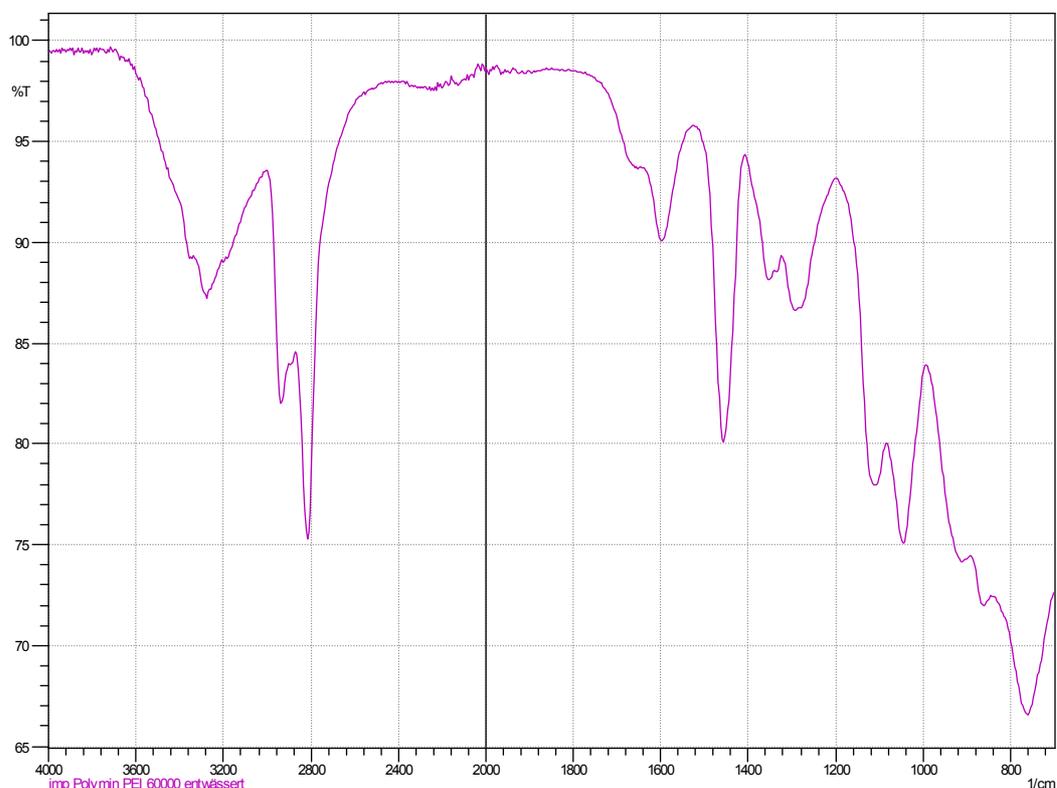


Abbildung 499 FTMIR-ATR Spektrum von PEI250000

### 1.17.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI25000

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration von 2,051g PEI25000 mit einer gewichtsgemittelten formalen Äquivalentwertigkeit von 580,9 Basenäquivalente/mol in 250 mL Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C eine experimentell gemessene Äquivalentwertigkeit von 402,2 Basenäquivalente/mol. Mit 1N-Salzsäure lassen sich somit 69,2 % der formalen Aminogruppen protonieren. Die pKa-Werte lassen sich natürlich einzeln graphisch nicht mehr entwickeln.

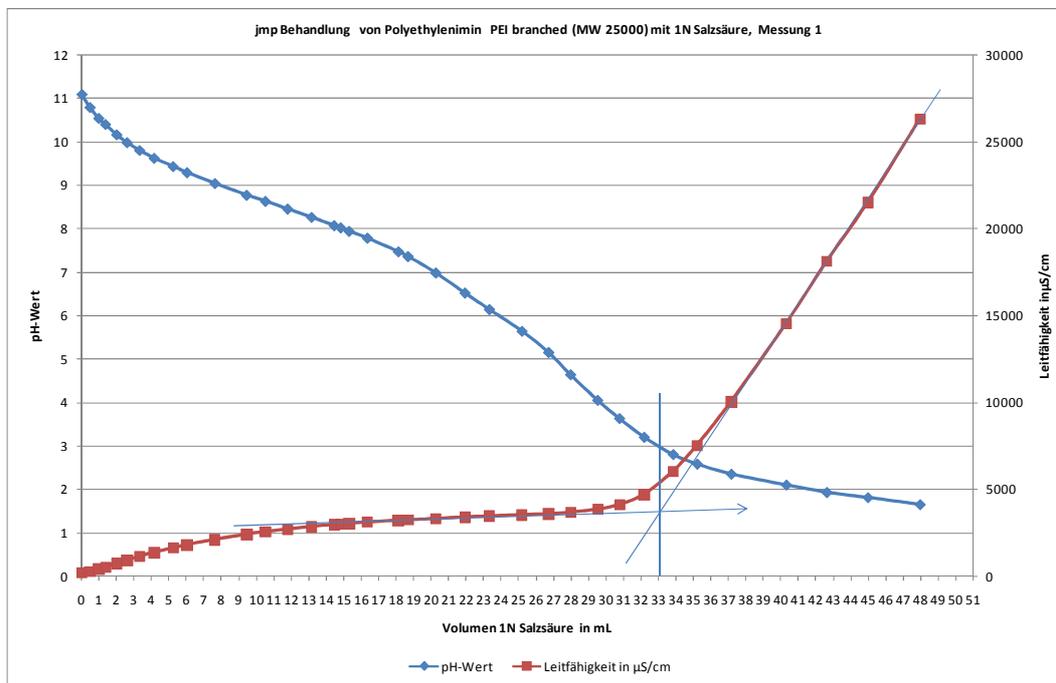


Abbildung 500 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 2,501 g PEI25000 in ) in 250 mL Wasser mit 1N Salzsäure mit 1N Salzsäure bei 25 °C

### 1.17.4 Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEI25000

#### GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



Gefahr

H- und P-Sätze (Hazard statements and Precautionary statements)

H302-H317-H319-H411 und P273-P280-P305 + P351 + P338

EU-Gefahrstoffkennzeichnung



Ätzend(C)

R- und S-Sätze

R 22 und S 36

**1.17.5 Behandlung einer 3,14 m,%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>**

Eine 3,14m%ige PEI25000-Lösung in Wasser wurde mit CO<sub>2</sub> im Grawimikroblasenwäscher unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,2 mit mäßiger Konvektion bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 6,8 behandelt.

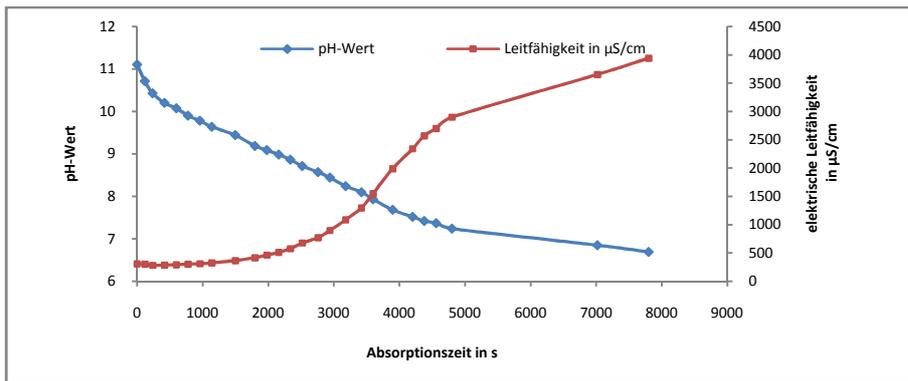
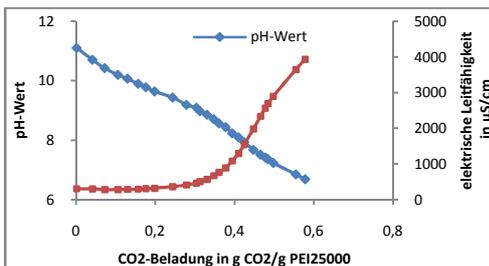
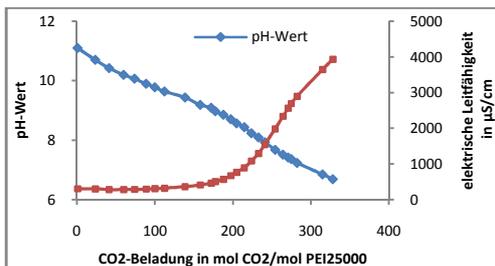
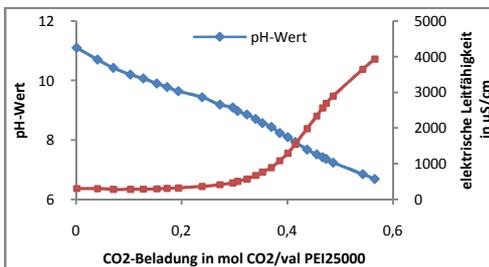
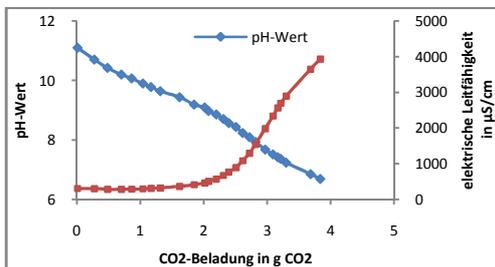


Abbildung 501 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



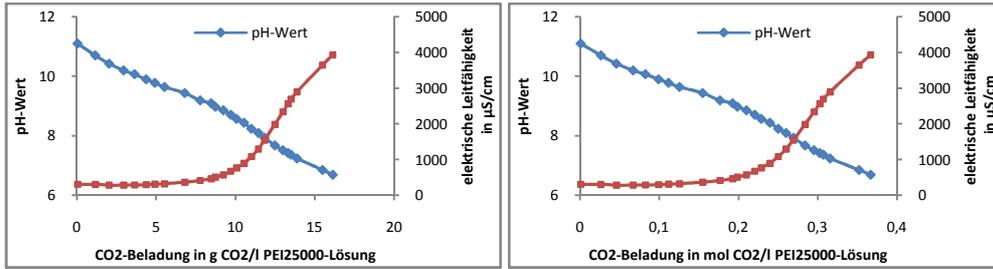


Abbildung 502 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei Raumbedingungen

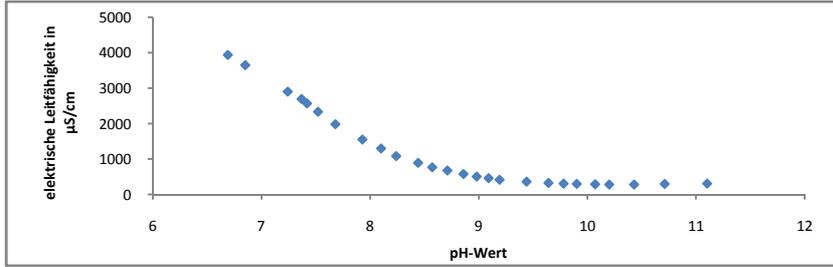


Abbildung 503 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

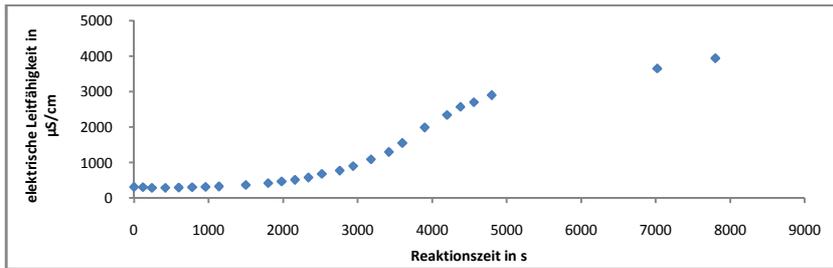


Abbildung 504 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

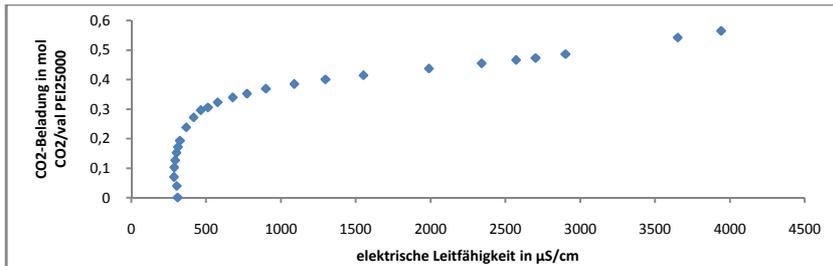


Abbildung 505 Korrelation der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /val PEI25000 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

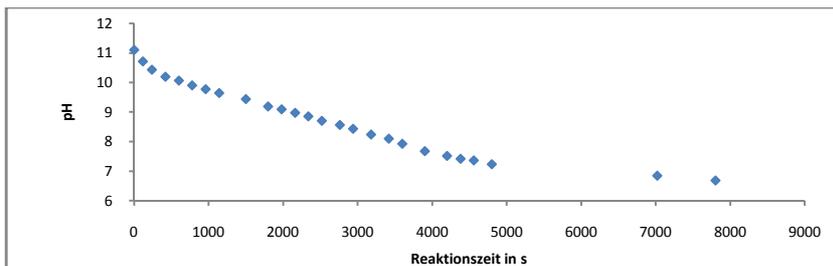


Abbildung 506 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

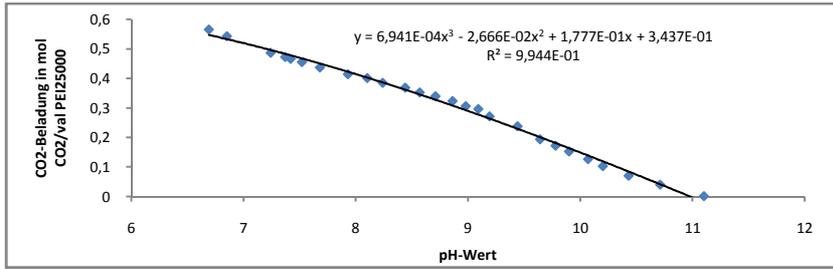


Abbildung 507 Korrelation der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /val PEI25000 gegen den pH bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

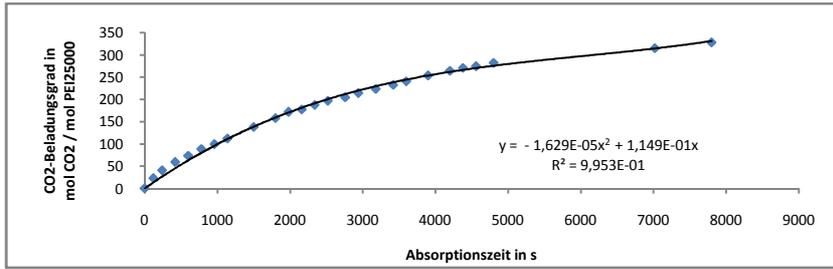


Abbildung 508 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /mol PEI25000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

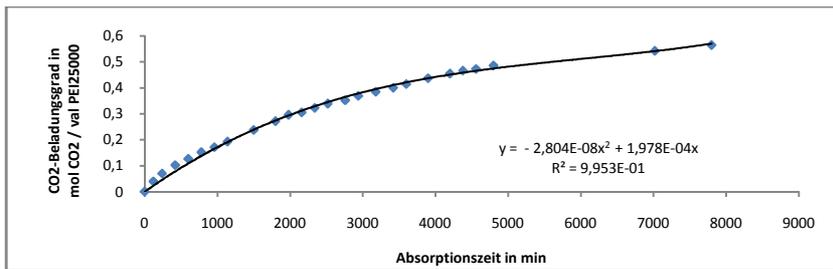


Abbildung 509 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2$ /val PEI25000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

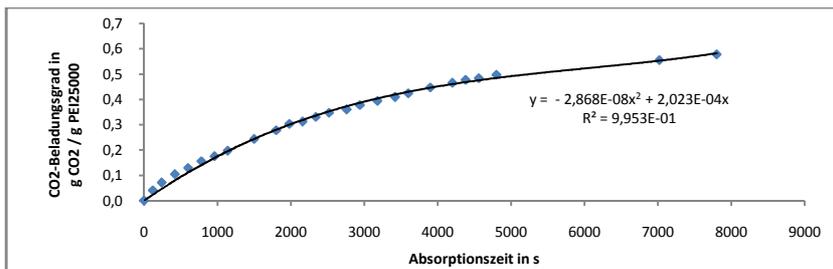


Abbildung 510 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in g  $\text{CO}_2$ /g PEI25000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

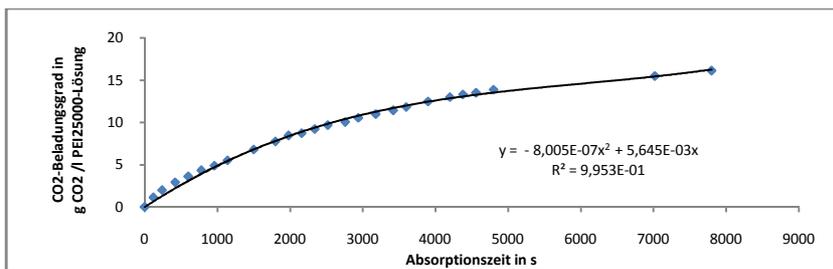


Abbildung 511 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in g  $\text{CO}_2$ /l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

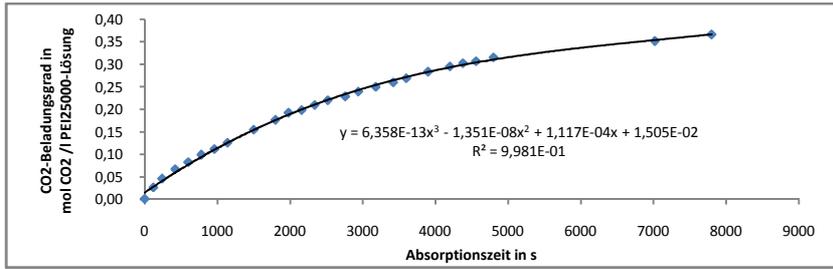


Abbildung 512 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen den pH bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

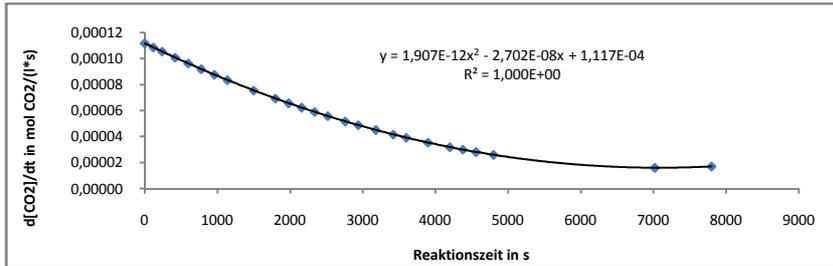


Abbildung 513 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen den pH bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

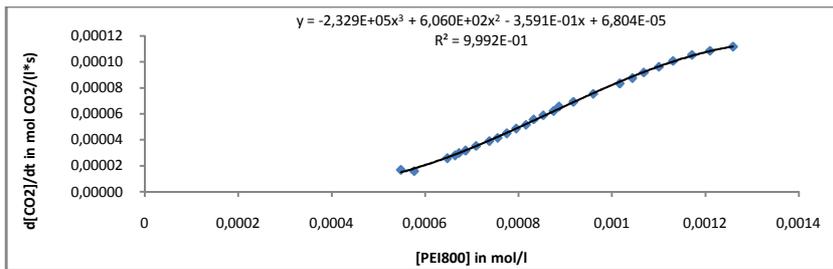


Abbildung 514 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI25000 in mol/l bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

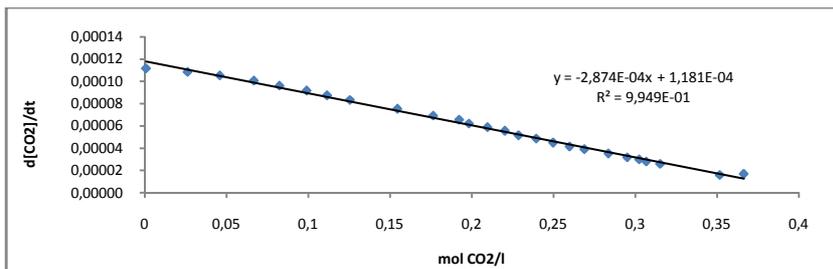


Abbildung 515 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

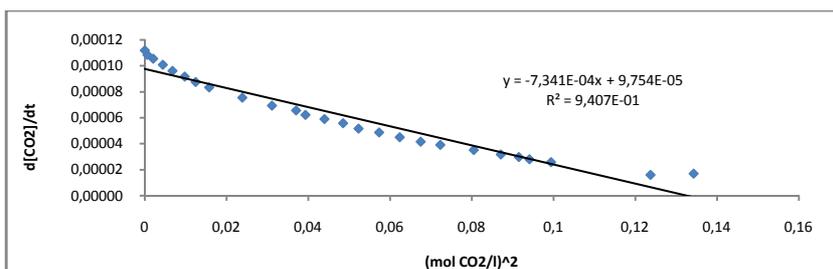


Abbildung 516 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

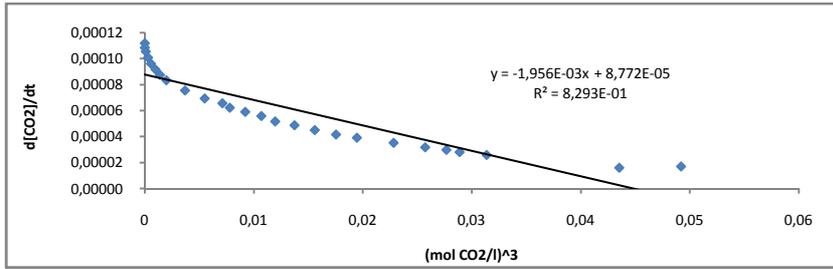


Abbildung 517 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

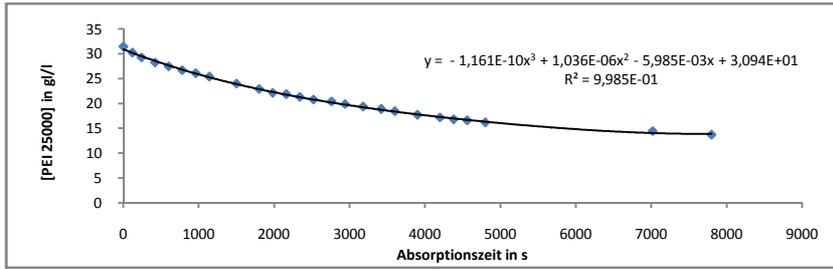


Abbildung 518 Verlauf der Konzentration PEI25000 in g/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

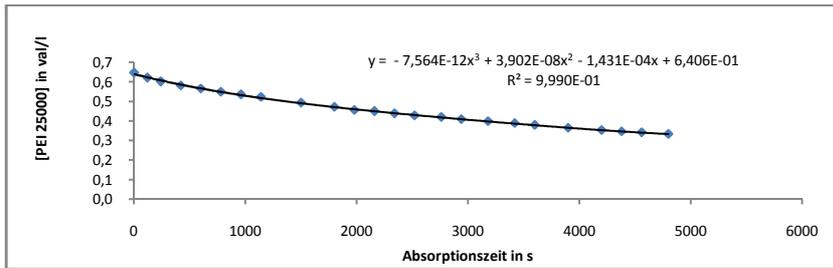


Abbildung 519 Verlauf der Konzentration PEI25000 in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

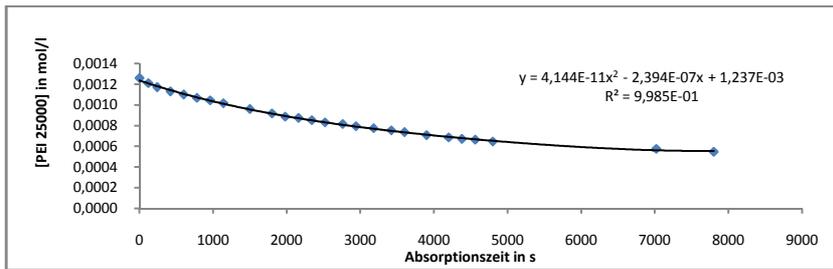


Abbildung 520 Verlauf der Konzentration PEI25000 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

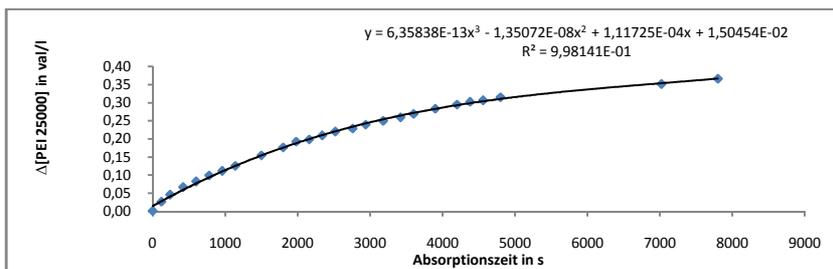


Abbildung 521 Verlauf des Umsatzes von PEI25000 in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

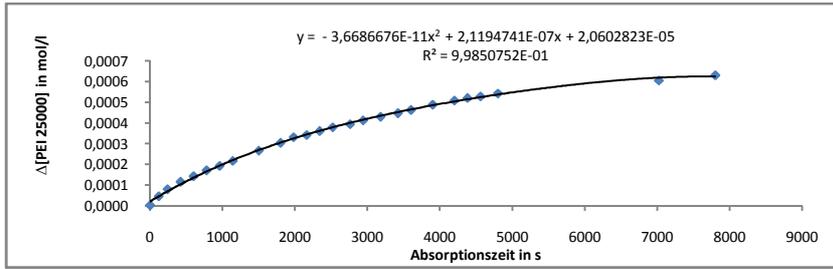


Abbildung 522 Verlauf des Umsatzes von PEI25000 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

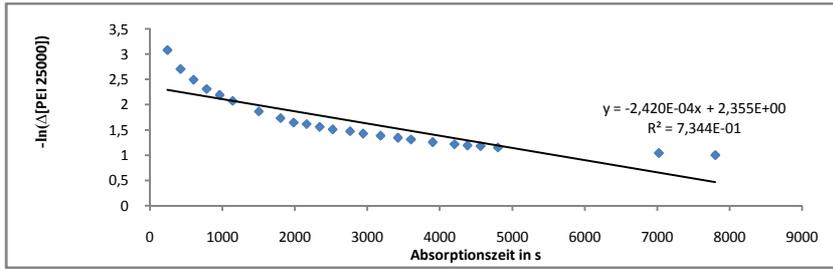


Abbildung 523 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI25000 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

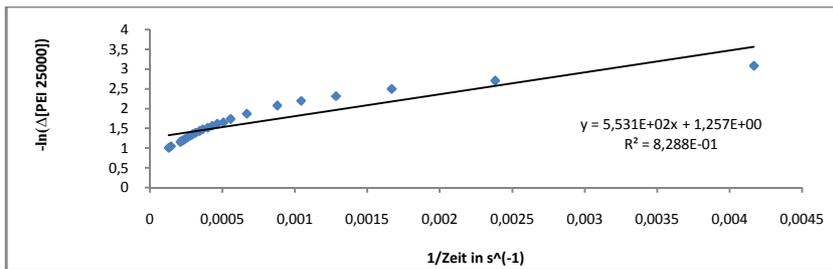


Abbildung 524 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI25000 gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

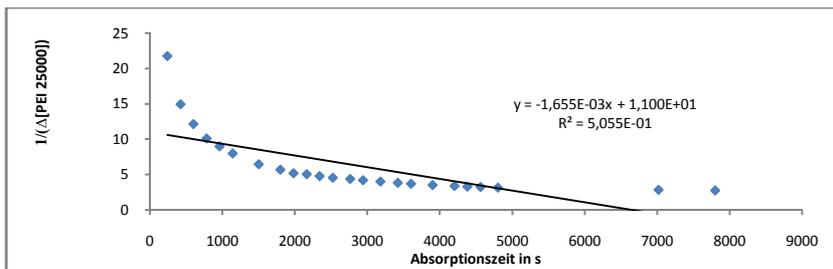


Abbildung 525 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von PEI25000 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

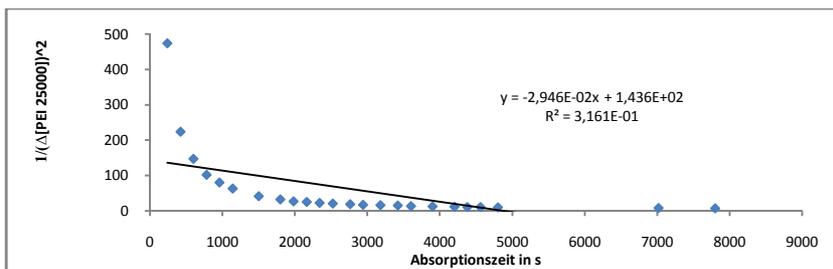


Abbildung 526 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von PEI25000 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

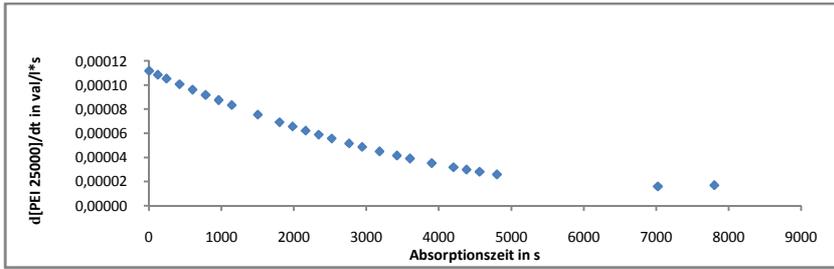


Abbildung 527 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI25000/(l s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

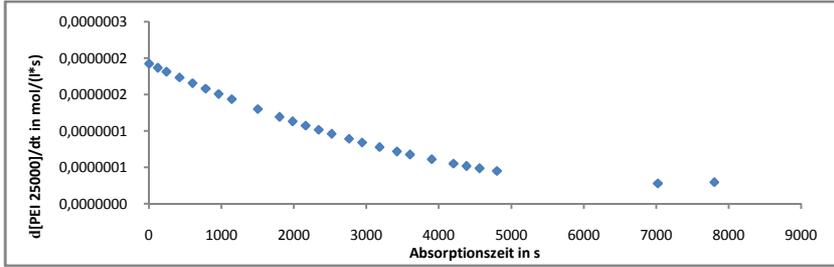


Abbildung 528 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI25000/(l s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

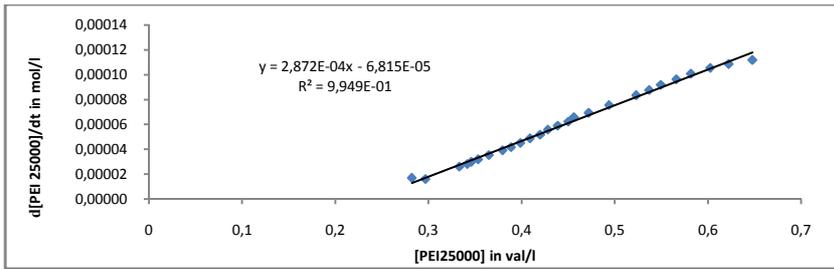
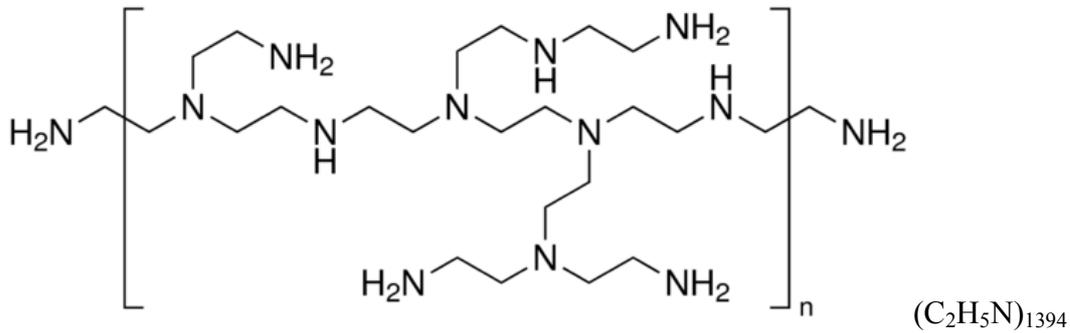


Abbildung 529 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI25000/(l\*s) gegen die Konzentration PEI25000 in val/l bei der Behandlung einer 3,14 m%igen PEI25000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

## 1.18 Das Reaktionssystem Polyethylenimin PEI60000/Wasser/CO<sub>2</sub>

### 1.18.1 Allgemeines, Spezifikation, Eigenschaften Daten von PEI60000



PEI60000 PEI60000 ist bei Raumbedingungen eine gelbliche, hochviskose, hygroskopische Flüssigkeit mit ammoniakalischen Geruch, die mit Wasser begrenzt mischbar ist. Wässrige Lösungen des Polyamins PEI60000 mit primären, sekundären und tertiären Aminogruppen sind stark basisch und ohne Berücksichtigung der Endgruppen formal gewichtsgemittelt 1394-fach protonierbar. PEI60000 ist ein starkes Nucleophil (CAS Nummer 9002-98-6, Gewichtsgemittelte Molmasse 60000 g/mol, molare Repeatingeinheit 43.04 g/mol)

### 1.18.2 Infrarotspektrometrische Untersuchung

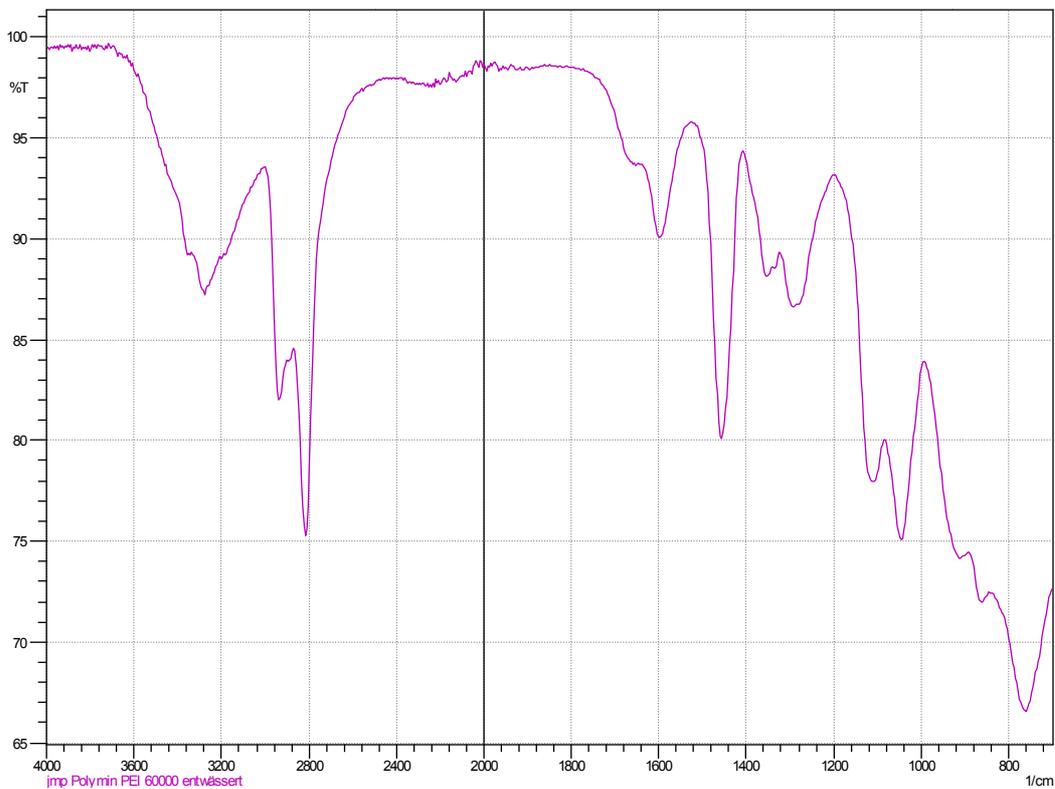


Abbildung 530 FTMIR-ATR Spektrum von PEI60000

### 1.18.3 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI60000

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration von 5,4815 g PEI60000 mit einer gewichtsgemittelten formalen Äquivalentwertigkeit von 1394 Basenäquivalenten/mol in 250 mL Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C eine experimentell gemessene Äquivalentwertigkeit von 1040 Basenäquivalente/mol. Mit 1N-Salzsäure lassen sich somit 74,6 % der formalen Aminogruppen protonieren. Die pKa-Werte lassen sich natürlich einzeln graphisch nicht mehr entwickeln, liegen aber definitiv zwischen 11,1 und 2,2.

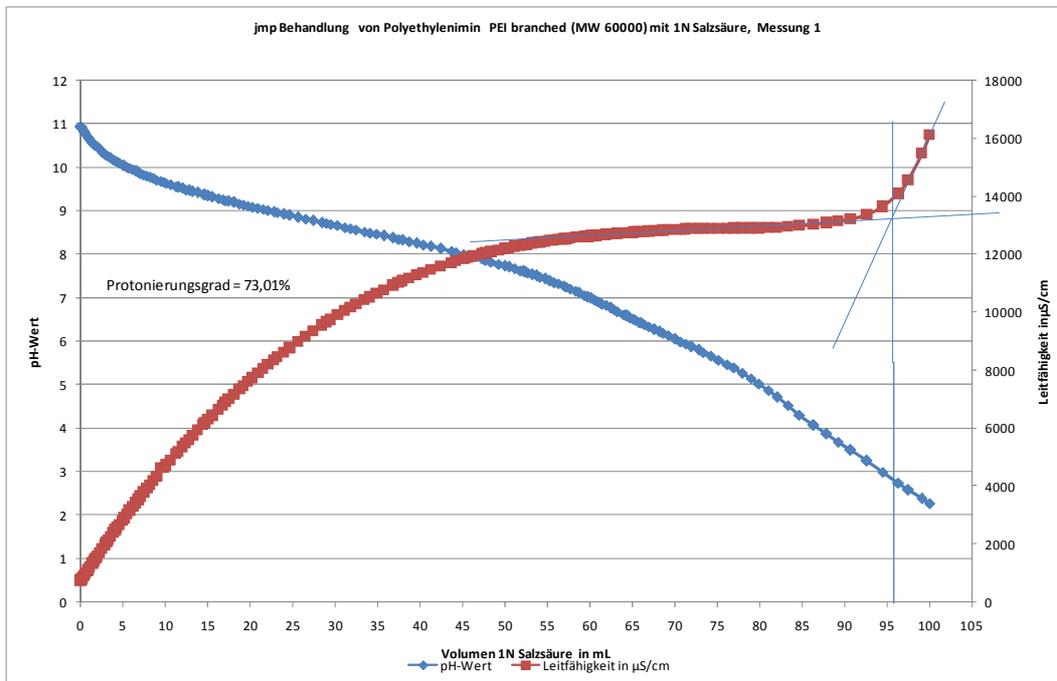


Abbildung 531 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 5,4815 g PEI60000 in 250 mL Wasser mit 1N Salzsäure bei 25 °C

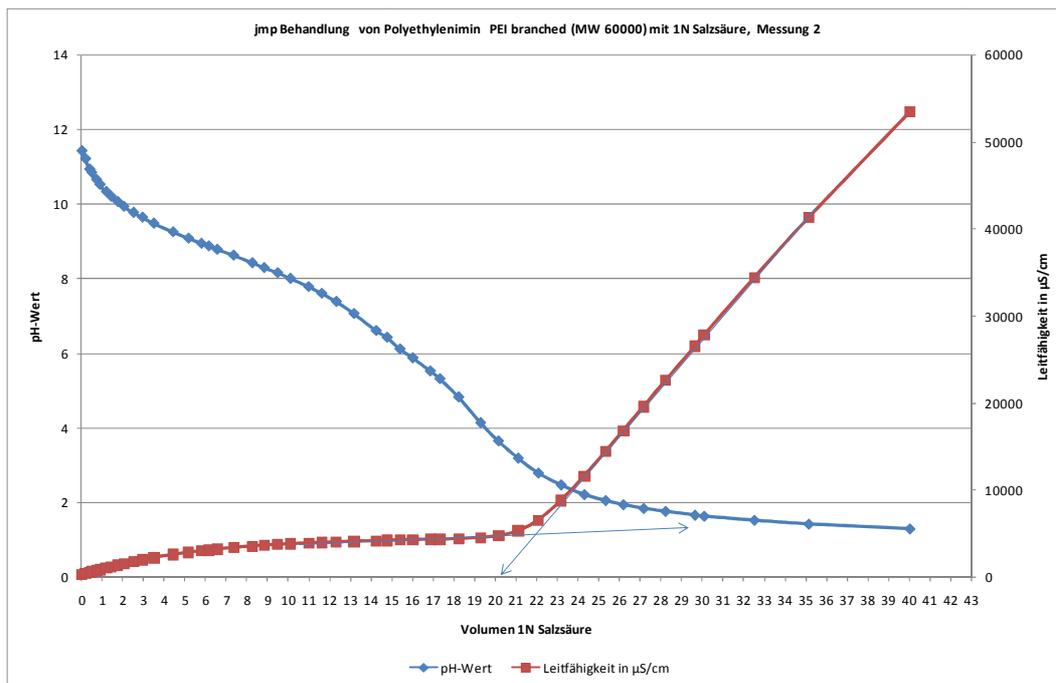


Abbildung 532 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 1,3132 g PEI60000 in 250 mL Wasser mit 1N Salzsäure bei 25 °C

1.18.4 **Sicherheitshinweise für den Umgang mit PEI60000**  
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung



H- und P-Sätze (Hazard statements and Precautionary statements)

H302-H317-H319-H411 und P: P273-P280-P305 + P351 + P338

EU-Gefahrstoffkennzeichnung



R- und S-Sätze

R 22 und S 36

1.18.5 **Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>**

Eine 4,825 m%ige PEI 60000-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Atmosphärendruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei RT von pH 11,3 mit mäßiger Konvektion bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 6,8 behandelt.

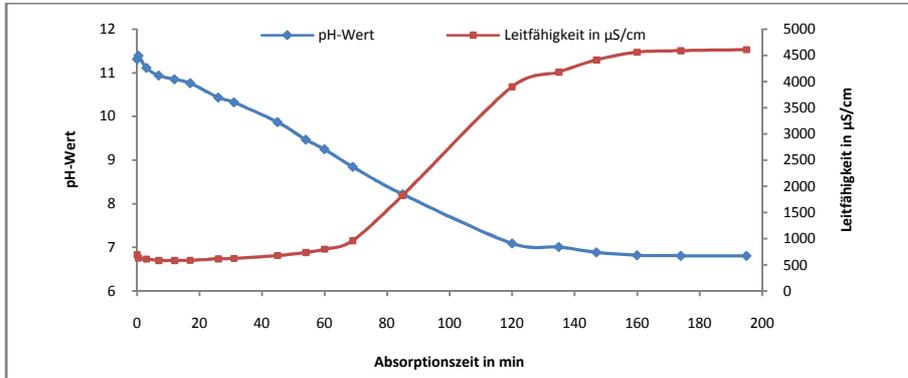


Abbildung 533 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

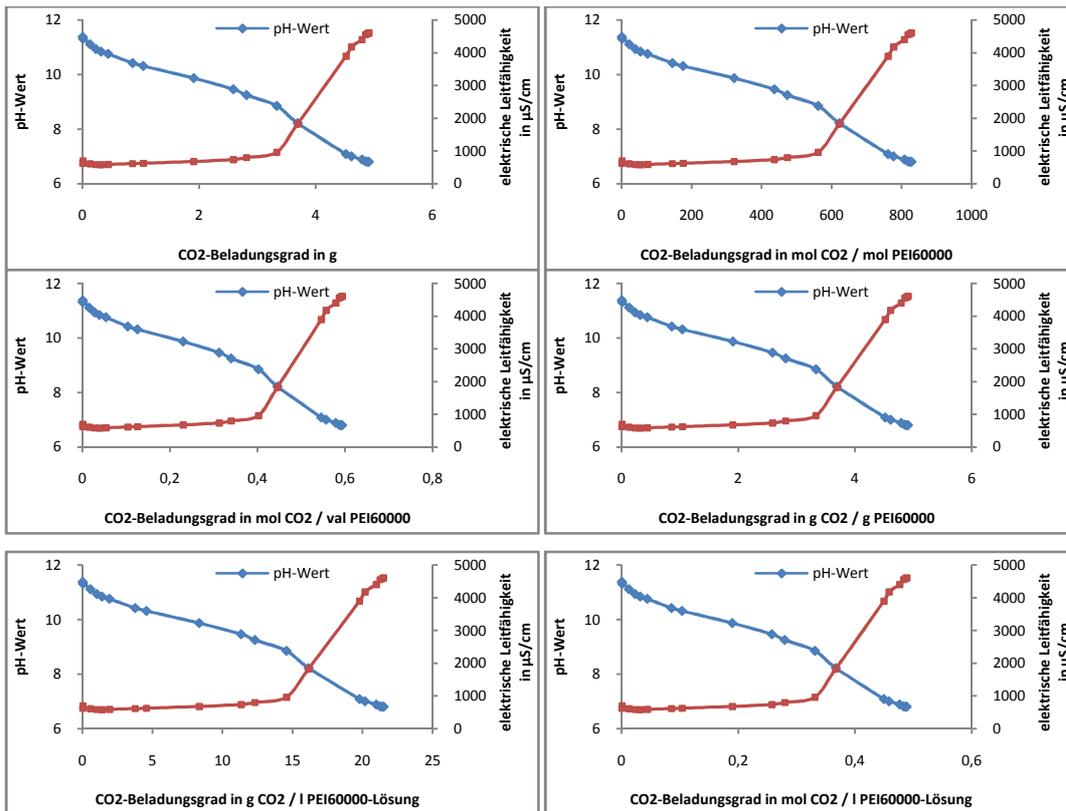


Abbildung 534 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

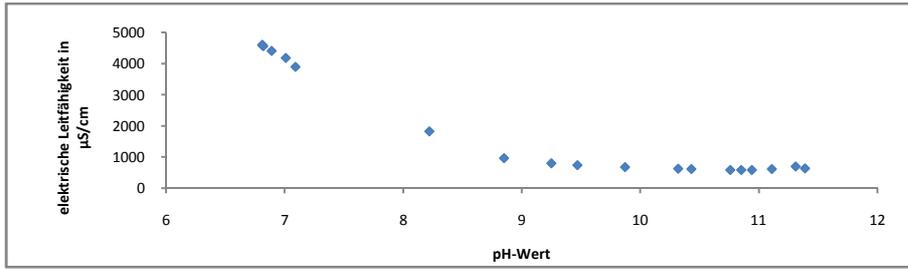
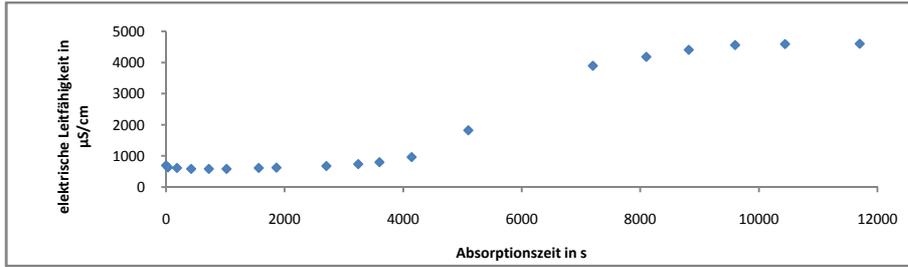


Abbildung 535 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>



Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

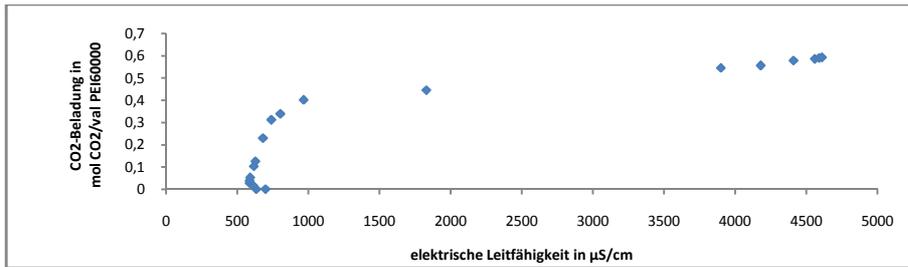


Abbildung 536 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI60000 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

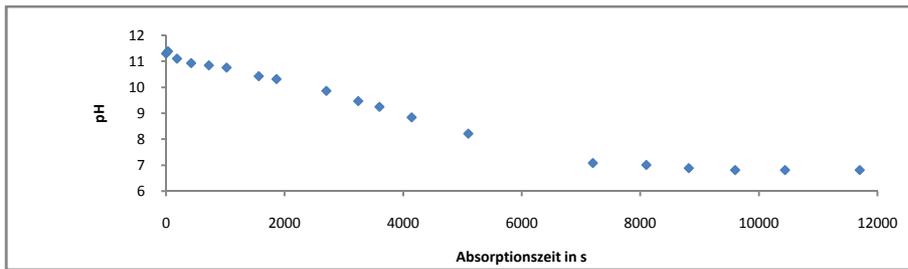


Abbildung 537 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

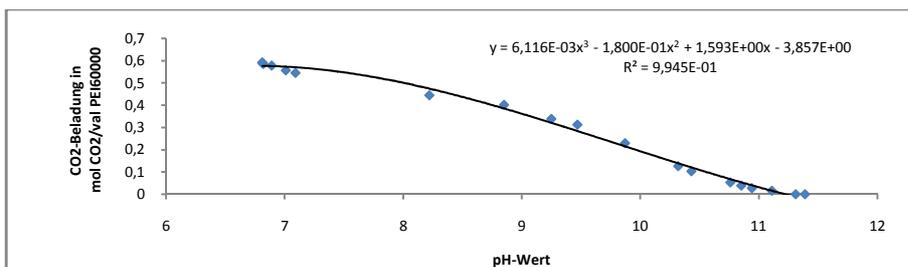


Abbildung 538 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI60000 gegen den pH bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

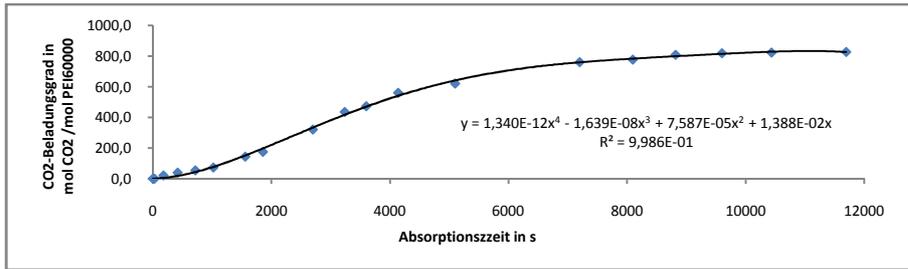


Abbildung 539 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

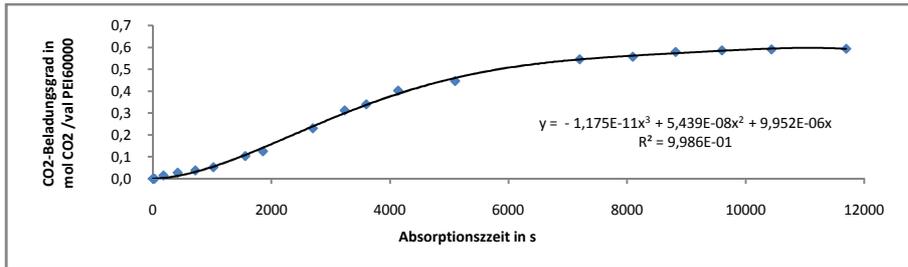


Abbildung 540 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

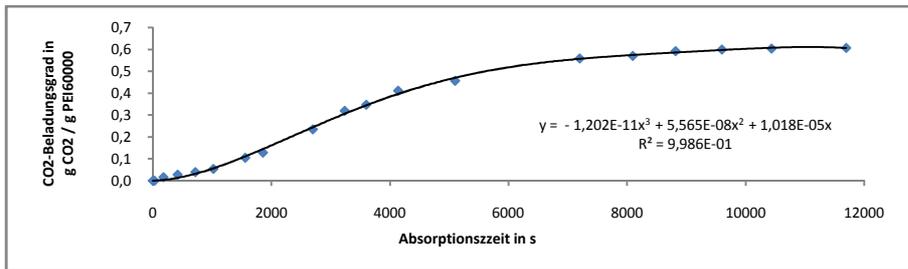


Abbildung 541 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

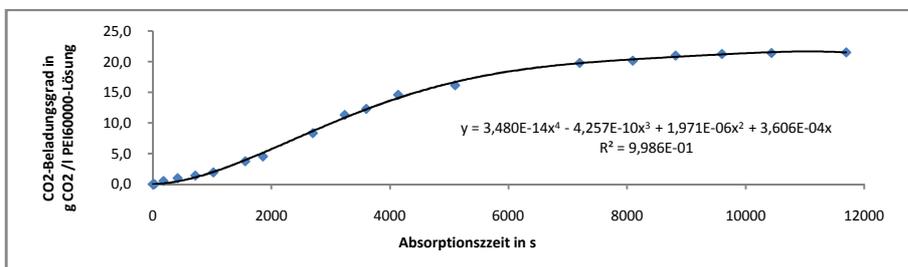


Abbildung 542 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

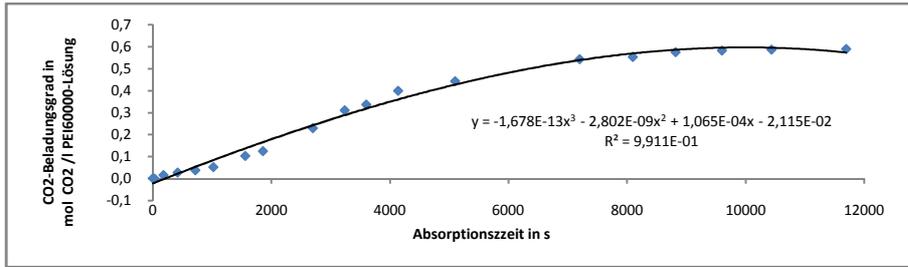


Abbildung 543 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

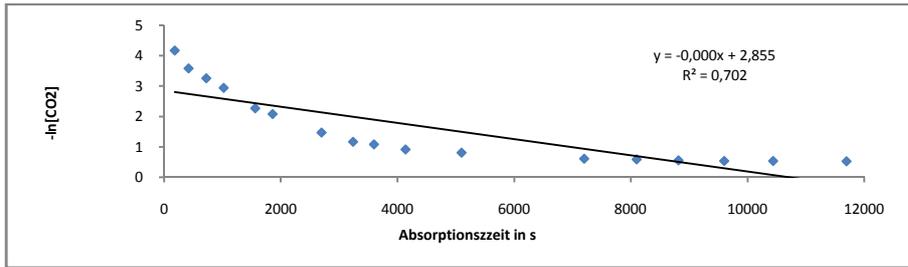


Abbildung 544 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

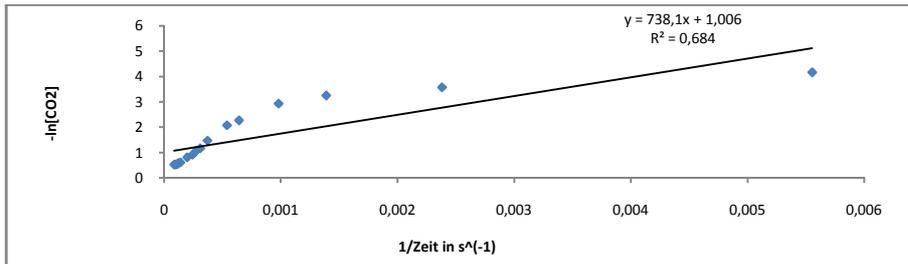


Abbildung 545 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

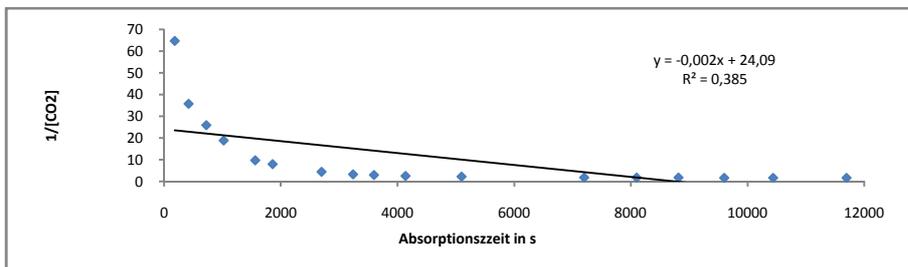


Abbildung 546 Verlauf des Kehrwertes der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

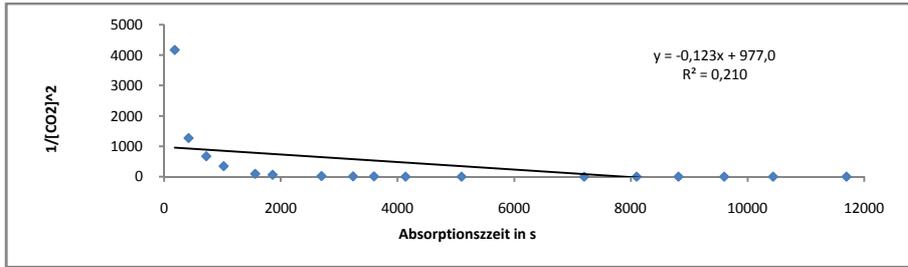


Abbildung 547 Verlauf des Kehrwertes der quadrierten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l gegen die bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

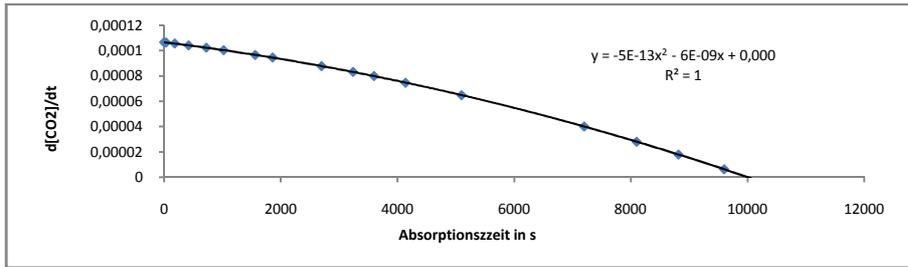


Abbildung 548 Verlauf der der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

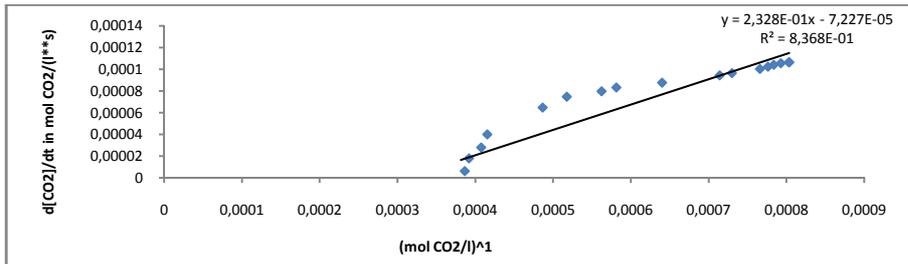


Abbildung 549 Korrelation der der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI60000 in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

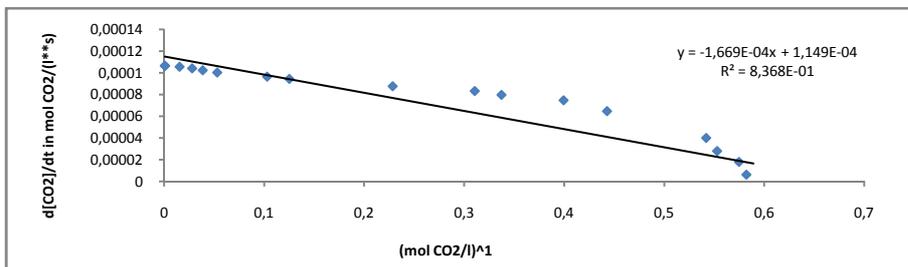


Abbildung 550 Korrelation der der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

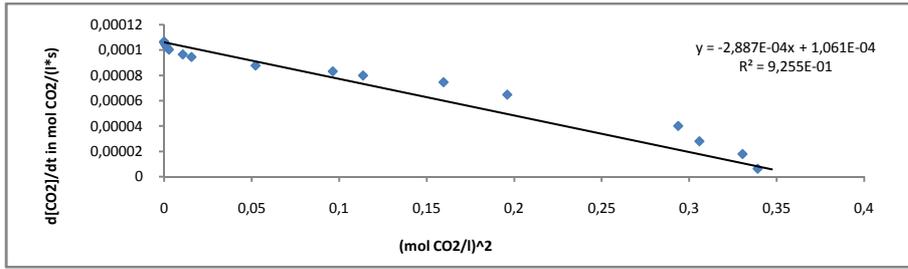


Abbildung 551 Korrelation der der Reaktionsgeschwindigkeit in  $mol\ CO_2/(l \cdot s)$  gegen die quadrierte  $CO_2$ -Aufnahme in  $mol\ CO_2/l$  bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

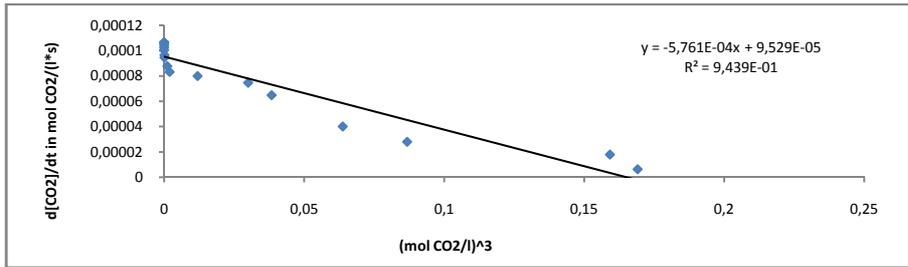


Abbildung 552 Korrelation der der Reaktionsgeschwindigkeit in  $mol\ CO_2/(l \cdot s)$  gegen die kubierte  $CO_2$ -Aufnahme in  $mol\ CO_2/l$  bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

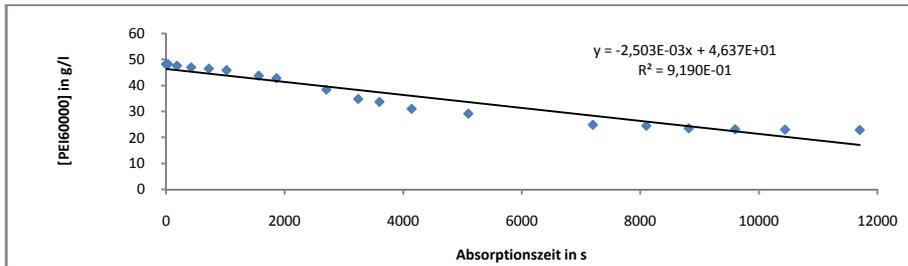


Abbildung 553 Verlauf der Konzentration von PEI60000 in  $g/l$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

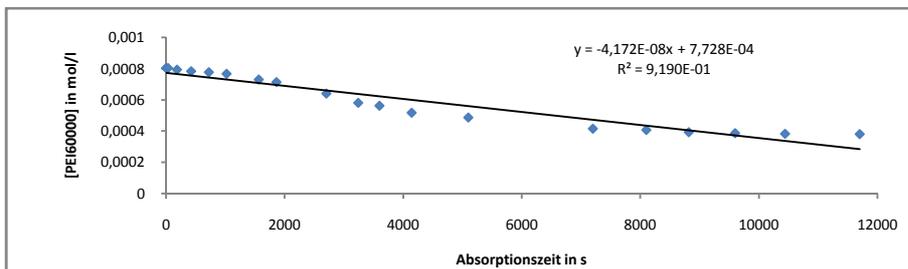


Abbildung 554 Verlauf der Konzentration von PEI60000 in  $mol/l$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

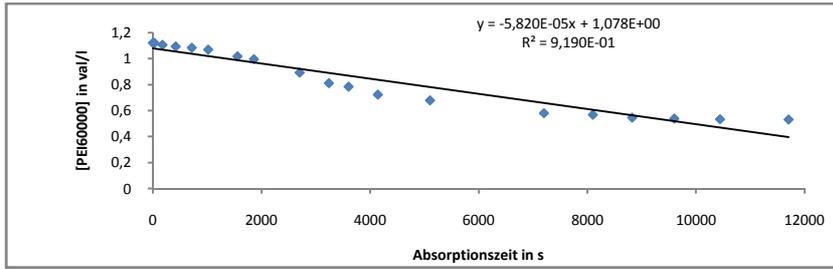


Abbildung 555 Verlauf der Konzentration von PEI60000 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

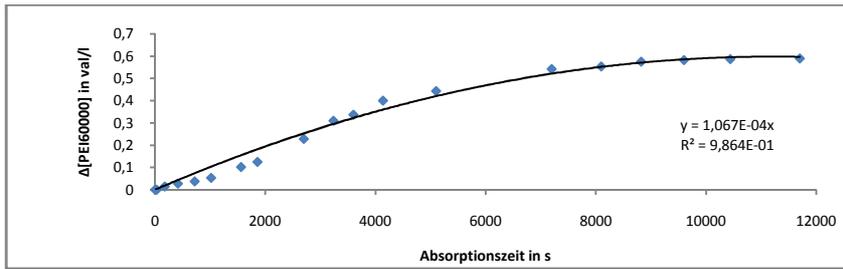


Abbildung 556 Verlauf des Umsatzes von PEI60000 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

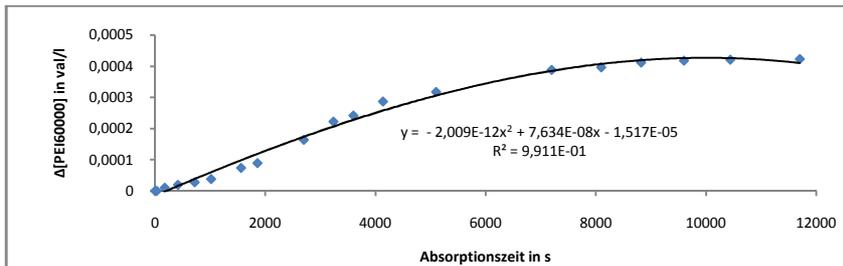


Abbildung 557 Verlauf des Umsatzes von PEI60000 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

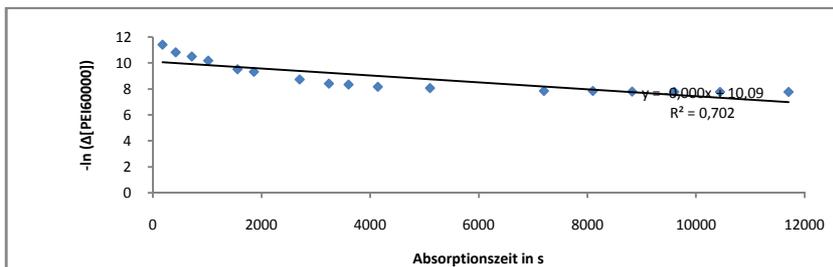


Abbildung 558 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

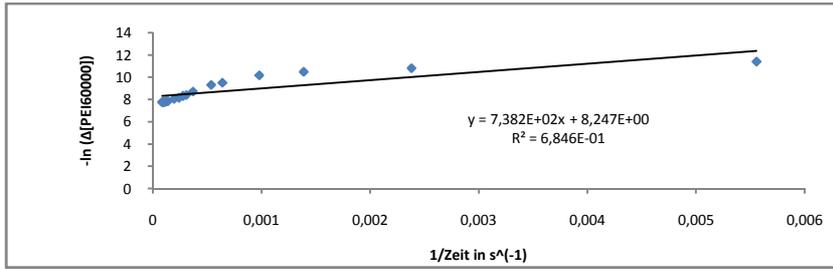


Abbildung 559 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI60000 gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

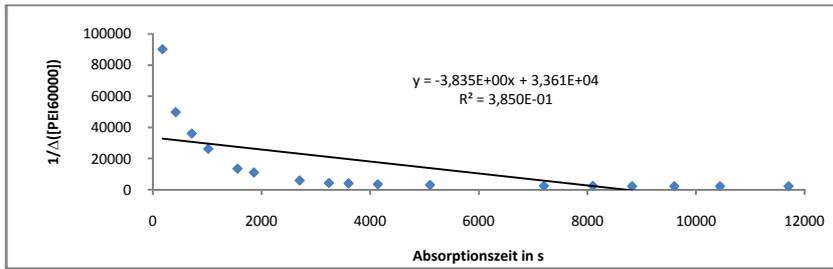


Abbildung 560 Verlauf des Kehrwertes des Umsatzes von PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

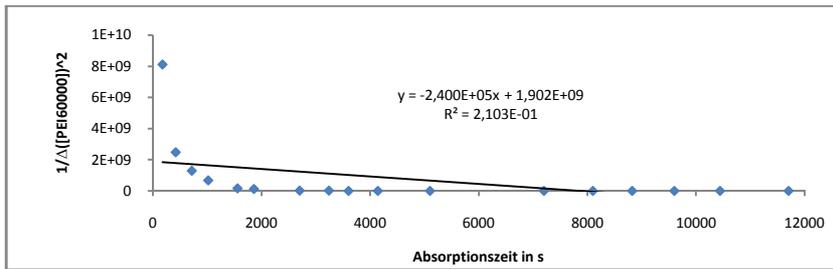


Abbildung 561 Verlauf des Kehrwertes des quadrierten Umsatzes von PEI60000 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

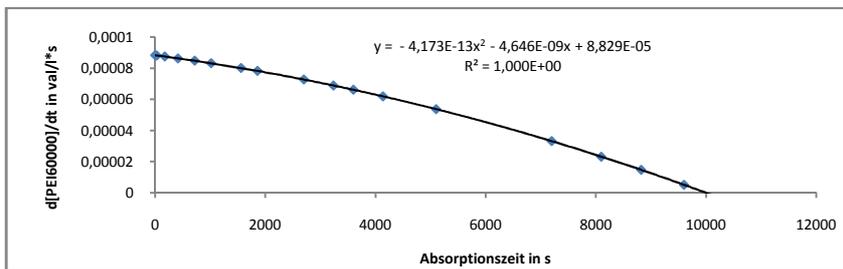


Abbildung 562 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI60000/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen PEI60000-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

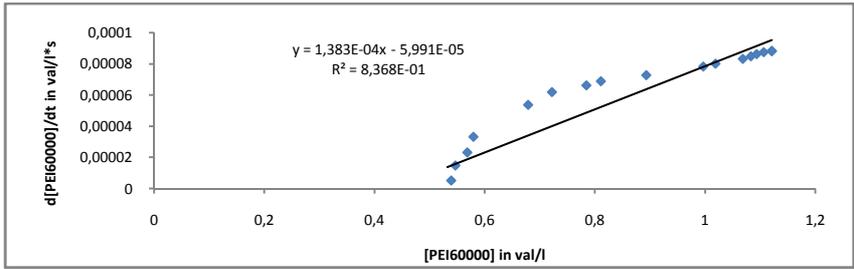


Abbildung 563 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{val PEI60000}/(\text{l} \cdot \text{s})$  gegen die Konzentration  $\text{PEI60000}$  in  $\text{val}/\text{l}$  bei der Behandlung einer 4,825 m%igen  $\text{PEI60000}$ -Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

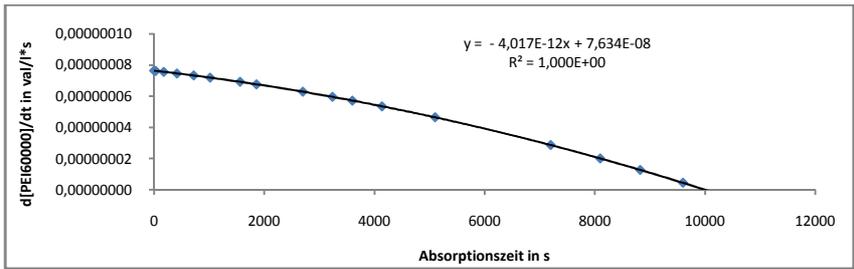


Abbildung 564 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol PEI60000}/(\text{l} \cdot \text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 4,825 m%igen  $\text{PEI60000}$ -Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

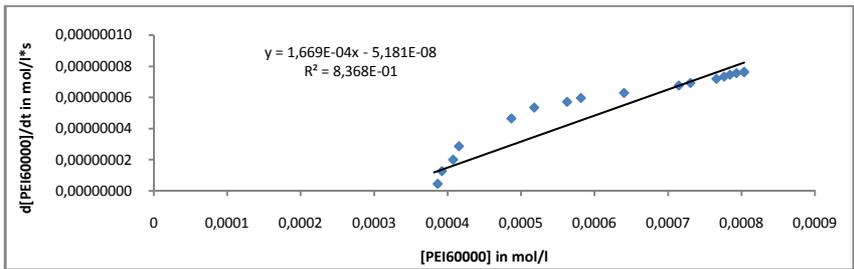


Abbildung 565 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in  $\text{mol PEI60000}/(\text{l} \cdot \text{s})$  gegen die Konzentration  $\text{PEI60000}$  in  $\text{mol}/\text{l}$  bei der Behandlung einer 4,825 m%igen  $\text{PEI60000}$ -Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

### 1.19 Das Reaktionssystem Polyethylenimin branched(MW800)/Wasser/CO<sub>2</sub>

Das Ergebnis des Screenings ist PEI800(branched), ein stark verzweigtes Polyethylenimin mit einer gewichtsgemittelten Molmasse  $M_w$  von 800, einer zahlengemittelten  $M_n$  Molmasse von 600 und mit einem relativen Verhältnis von primären zu sekundären zu tertiären Aminogruppen von 1/0,9/0,5 bzw., in Gew% von 41,67 %/37,5 %/20,83 %.

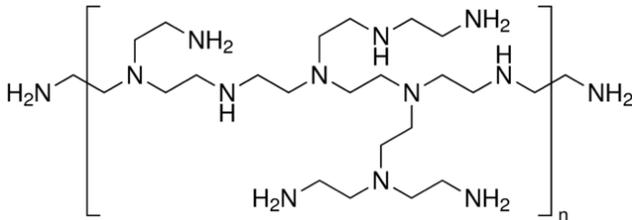


Abbildung 566 Aminendgruppenmodifiziertes Polyethylenimin

Dieses Verhältnis ist massengemittelt, so dass jedes Oligomer PEI<sub>n</sub> für sich in einer Vielzahl möglicher Isomere mit abweichenden Verhältnissen von primären zu sekundären zu tertiären Aminogruppen vorliegen kann. Höhere Oligomere mit  $n > 9$  können dendritische Einheiten aus tertiären Aminogruppen bilden. Dendritische Gruppen führen zu maximaler Verzweigung. PEI800 (CAS Nummer 9002-98-6) ist bei Raumbedingungen eine gelbliche, öligviskose, hygroskopische Flüssigkeit mit flachem aminartigen-amoniakalischen Geruch, die nach Herstellerangaben der BASF im technischen Datenblatt für das Produkt Lupasol FG in allen Verhältnissen mit Wasser und polarprotischen Lösungsmitteln wie Ethylenglykol, Glycerin, 1-Propanol, 2-Propanol, Ethanol und Methanol mischbar, mit aromatischen Kohlenwasserstoffen wie Toluol und Xylole, aliphatischen Estern, und Glykolethern ist Lupasol FG teilweise mischbar und in aliphatischen Kohlenwasserstoffen wie Dekalin, n-Hexan und Isooctan und aliphatischen Ethern nicht mischbar ist.

Technische Daten für PEI800 lt. Herstellerangaben: Erstarrungstemperatur: ca. -25 °C, Pour point (ISO 3016): -18 °C, Flammpunkt (nach DIN ISO 2592): ca. 220 °C, Flammpunkt (nach DIN EN 22719; ISO 2719): ca. 180 °C, Zündtemperatur (nach DIN 51794): > 200 °C, Dampfdruck: < 0,35 mmHg (20 °C), Dichte (nach ISO 2811-3, 25 °C): 1,0251 g/cm<sup>3</sup>, Dichte (nach DIN 51757, 20 °C): 1,03, Brechungsindex (nach DIN 51423): 1,523, Ladungsdichte (kationisch): 16 meq/g TS, Viskosität (nach ISO 2555, Brookfield) 800 -5000 mPa\*s.

PEI800 ist kompatibel mit kationischen und nichtionischen Systemen. Beim Mischen mit anionischen Systemen kann es konzentrationsabhängig zu Inkompatibilitäten kommen, z.B. Gelatinierung und Ausflockung, Effekte, die man zur Isolierung von Proteinen und DNA aus biologischen Matrices nutzen kann. PEI800 sollte gut verschlossen in trockener Umgebung

aufbewahrt werden. Luftkontakt, direkte Einwirkung von Sonnenlicht und hohe Temperaturen führen zu Verfärbung. Die BASF empfiehlt die Lagerung ihres PEI800 Produkts Lupasol FG bei Raumtemperatur in Behältnissen aus Edelstahl oder Kunststoffen wie z.B. PP, PE und PVC unter Stickstoff-Inertgasatmosphäre. Die Komplexierungseigenschaften von Lupasol FG sind mit denen von EDTA vergleichbar, so bildet Lupasol FG in alkalischem Medium Komplexe mit Schwermetallen wie Eisen, Zink, Quecksilber, Kupfer, Blei, Nickel und Cadmium. Aus diesem Grund sind Behältnisse aus gering legierten Stählen, Kupfer und kupferhaltigen Legierungen als Anlagenwerkstoffe nicht geeignet. Komplexbildung zeigt sich in vielen Fällen durch intensive Verfärbungen an, so bildet Lupasol FG z.B. mit Kupfer intensiv blau gefärbte Komplexe. Die Komplexbildung mit Schwermetallen ist reversibel. Die BASF garantiert bei entsprechender Lagerung eine Mindesthaltbarkeit von 12 Monaten ab Versanddatum. Unter Temperaturen von 0 °C beginnt die Erstarrung des Materials, die sich durch kurzes Erhitzen wieder rückgängig machen läßt. Wegen der hohen kationischen Ladungsdichte interagiert Lupasol FG sehr stark mit Stoffen mit hoher anionischer Ladungsdichte. Hier speziell benannt ist die Interaktion sowohl mit Oberflächen aus Cellulose, Polyestern, Polyolefinen, Polyamiden, Metallen, keramischen Werkstoffen (Zeolithe und Silikate) als auch mit biologischen Matrices wie Proteinen und DNA. So wird Lupasol FG zur Immobilisation von Proteinen auf keramischen Trägern verwendet. Dabei werden die Proteine mit Glutaraldehyd an das Lupasol FG gebunden. Somit ist Lupasol FG sowohl ein guter Haftgrund für die Beschichtung von Oberflächen als auch ein ausgezeichneter Haftvermittler für Materialien in Sandwichprodukten, hier speziell benannt sowohl die Fixierung von Reaktivfarbstoffen auf Textilfasern, Textilgeweben, Papier und Karton, als auch die Herstellung von Mehrschichtfolien und anderen Kompositwerkstoffen durch Verpressen, Verkleben, Überzug, Laminierung, Extrusionsbeschichtung oder Coextrusion unterschiedlicher Materialien, z.B. Cellulose, Cellophan, Viscose, Polyolefine (PE, LDPE, HDPE, PP) Polyester (PBT, PET), Polyamide (Pa 6.6, PA6, PA 6.10, PA 12.12, PA12), halogenierten Polyolefinen (PVC, PVDC) und Metallen (Aluminium, Silber, Gold). Die Wirksamkeit von Haftvermittlern für transparente Kompositfolien auf Basis von niedermolekularen Polyolefinwachsen (PE, LDPE, HDPE), Polyacrylat, Polyvinylacetat (PVA) und Polyvinylidenchlorid (PVDC) läßt sich durch Compoundieren mit Lupasol FG signifikant verbessern, was u.a. zur Verbesserung der mechanischen und optischen Eigenschaften der Mehrschichtfolien führt. Hinsichtlich der größtmöglichen Aminogruppendichte aller bekannten kommerziellen Polyamine ist Lupasol FG ein ausgezeichnetes, sowohl chemisch als auch physikalisch wirksames Netzmittel, hier speziell

benannt zur Verbesserung der Benetzbarkeit von Feststoffen durch Farben, Lacke, Kleber und anderer Beschichtungen vorwiegend auf Basis wässriger Lösungen. In Klebstoffen auf Basis von Epoxid- und Urethanharzen wirkt Lupasol FG als Netzmittel und chemischer Aminhärter, was die erzielbare Adhäsionskraft zwischen den in Kontakt tretenden Oberflächen signifikant erhöht und damit die mechanischen Eigenschaften der Verklebung verbessert.

### 1.19.1 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von PEI800

Die kombinierte potentiometrische und konduktometrische Titration von 15,516 g PEI60000 mit einer gewichtsgemittelten formalen Äquivalentwertigkeit von 19,2 Basenäquivalenten/mol in 250 mL Wasser mit 1N-Salzsäure ergibt bei 25 °C eine experimentell gemessene Äquivalentwertigkeit von ca. 17 Basenäquivalente/mol. Mit 1N-Salzsäure lassen sich somit 88,5 % der formalen Aminogruppen protonieren. Die pKa-Werte lassen sich natürlich einzeln graphisch nicht mehr entwickeln, liegen aber definitiv zwischen 11,1 und 2,2.

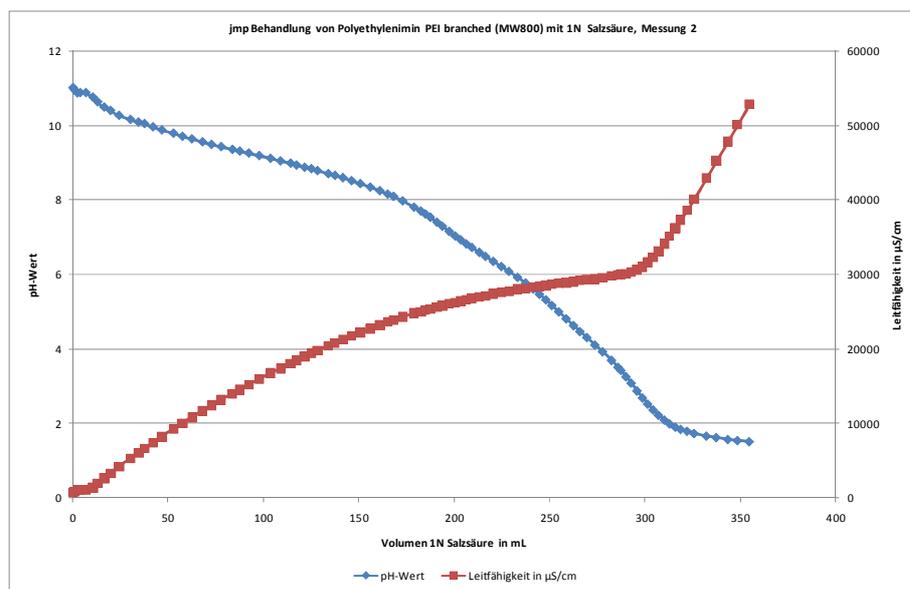


Abbildung 567 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 15,516 g PEI800 in 250 mL Wasser mit 1N-Salzsäure bei 25 °C

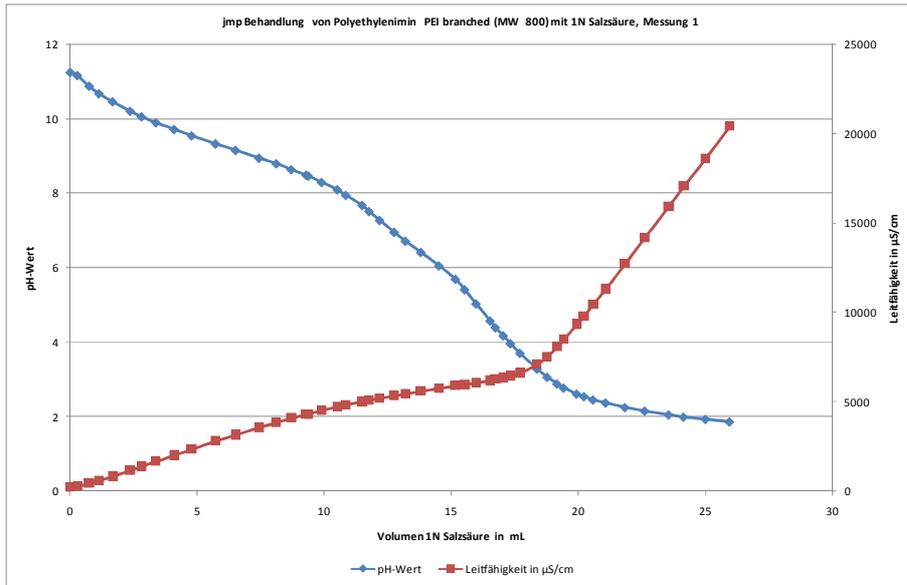


Abbildung 568 Potentiometrische und konduktometrische Äquivalenttitration von 0,98 g PEI800 in verdünnter wässriger Lösung mit 1N-Salzsäure bei 25 °C

### 1.19.2 Viskosimetrische Untersuchung von PEI800

Die kinematische Viskosität von PEI800 nimmt von 5 bis 90 °C mit zunehmender Temperatur degressiv ab.

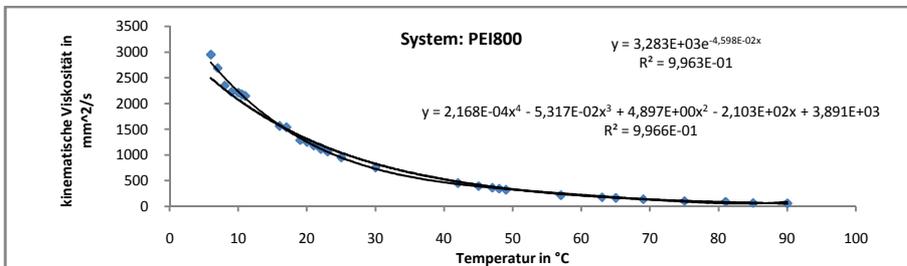


Abbildung 569 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität von PEI800

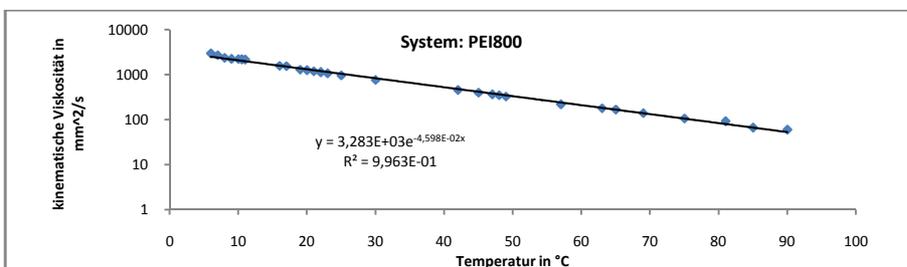


Abbildung 570 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität von PEI800 (logarithmische Auftragung der kinematischen Viskosität)

Mathematisch lässt sich der Verlauf der kinematischen Viskosität mit zunehmender Temperatur PEI800 für Temperaturen zwischen 10 °C und 80 °C durch

Polynomapproximation mindestens 3.ten Grades mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,996$  gut korrelieren. Interessant auch die ausgezeichnete Korrelation nach Andrade mit Bestimmtheitsmaßen  $R > 0,996$  für die lineare Regression der graphischen Auftragung des Logarithmus der kinematischen Viskosität gegen den Kehrwert der Temperatur.

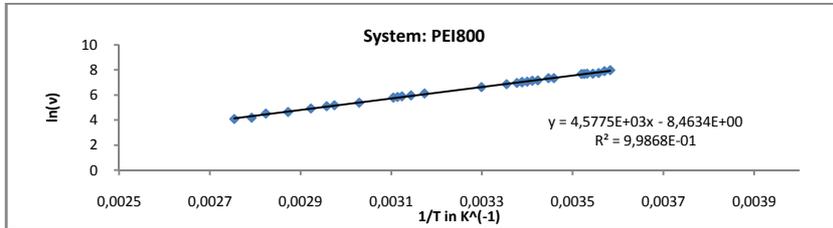


Abbildung 571 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität von PEI800 (Abbildung nach Andrade mit den Koeffizienten  $B(\text{Steigung}) = 4577,5$  und  $A(=\text{Achsenabschnitt}) = -8,4634$ )

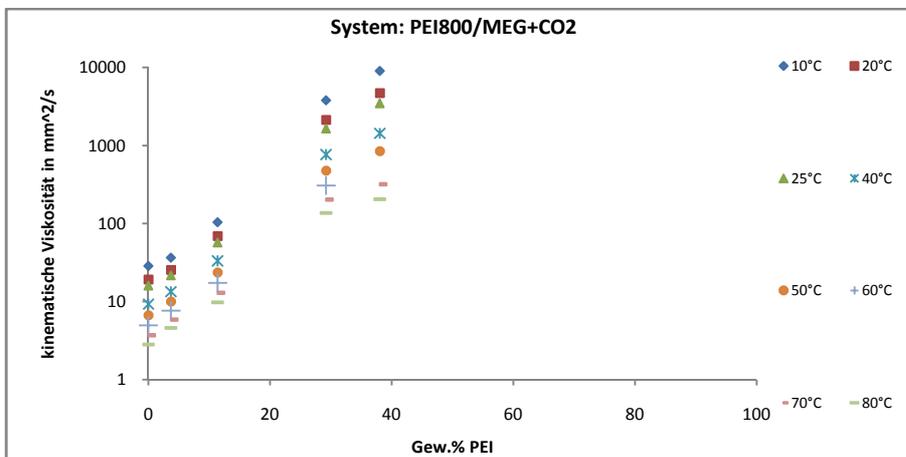


Abbildung 572 Einfluss der Konzentration auf die kinematische Viskosität  $\text{CO}_2$ -gesättigter PEI800-Lösungen in MEG für Temperaturen zwischen 10 und 80 °C

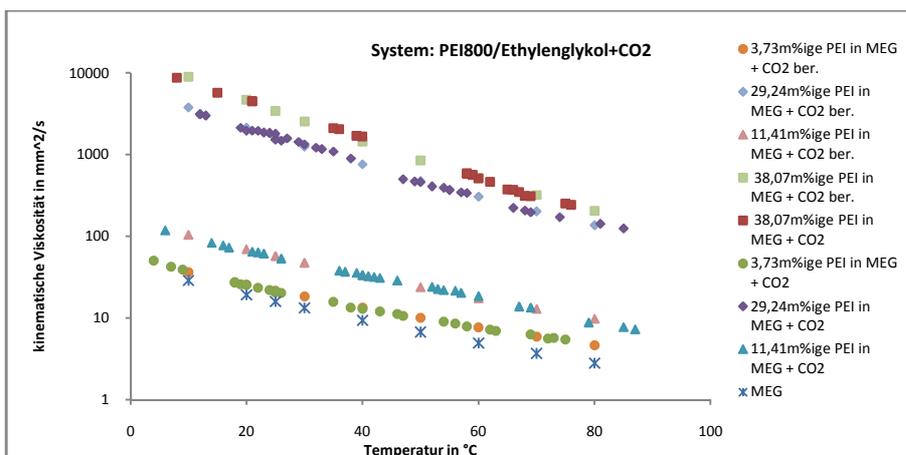


Abbildung 573 Einfluss der Temperatur auf die kinematische Viskosität definierter  $\text{CO}_2$ -gesättigter PEI800-Lösungen in MEG für PEI800-Konzentrationen zwischen 0 und 38 Gew. %

### 1.19.3 Wärmekapazität von PE800

Daten für die spezifische Wärmekapazität von PEI800 sind in der offenen Literatur nicht benannt. Eigene kalorimetrische Untersuchungen ergeben für Lupasol FG bei 20 °C und 101,325 kPa Atmosphärendruck einen aus 6 Experimenten arithmetrisch gemittelten Wert für die spezifische Wärmekapazität  $C_{p(\text{Lupasol FG})}$  von 2,54 J/(g\*K) bzw. 2032 kJ/(mol\*K). Aus den TGA und DSC läßt sich für PEI800 eine gemittelte Wärmekapazität von 2,51 J/(K\*g) bzw. 2008 kJ/(mol\*K) für den Temperaturbereich von RT bis 130 °C abschätzen.

### 1.19.4 Thermoanalytische Untersuchung von PEI800

Die thermogravimetrische Analyse einer neu aufgebrochenen Lupasol-FG-Charge unter Luft-Atmosphäre zeigt, dass PEI800 bis 160 °C praktisch thermisch völlig indifferent und stofflich stabil ist. Die DSC-Messung zeigt, dass der bis 160 °C gemessene Stoffverlust von <1m% auf die Freisetzung von Ammoniak (RT-70 °C), Wasser (70 °C-130 °C) und Kohlendioxid (110 °C-160 °C) zurückzuführen ist, was auch mit den Herstellerangaben übereinstimmt und Folge der Hygroskopizität und Reaktivität der Polybase schon beim Stehen an der Luft ist. Ab 160 °C muß zunehmend die Verdampfung relativ flüchtiger niedermolekularen PEI-Oligomere zunehmend berücksichtigt werden. Der gemessene Stoffverlust zwischen 160 °C bis 300 °C von gemittelt 15m% bzw. zwischen 160 °C bis zur Zündtemperatur bei ca. 370 °C von gemittelt 35m% ist auf die Verdampfung flüchtiger PEI-Oligomere zurückzuführen. Die Verbrennung nach Selbstzündung bei 370 °C ist bis 500 °C unvollständig. Bis 410 °C sind gemittelt 92m% der Probe verflüchtigt, bei 500 °C gemittelt 96m%. Der gemessene absolute Wärmebedarf bei der TG bis 130 °C beträgt gemittelt 251,1 J/g Probe. Daraus läßt sich für PEI800 eine gemittelte Wärmekapazität von 2,51 J/(K\*g) für den Temperaturbereich von RT bis 130 °C kalkulieren. Das Ergebnis harmoniert mit den Ergebnissen der kalorimetrischen Bestimmung der Wärmekapazität von PEI800 von gemittelt 2,54 J/(K\*g).

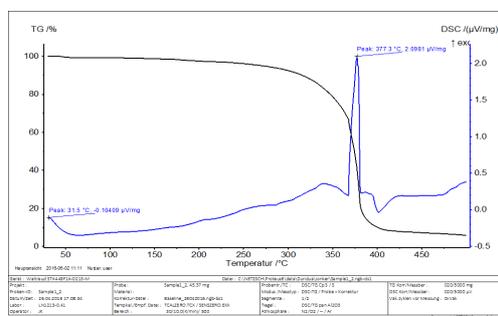


Abbildung 574 TGA von PEI800

- Wärmebedarf bis 230 °C: 432,44 J/g Probe exp./520.04 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 230 °C: 2%
- Wärmebedarf bis 160 °C: 326,3 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 160 °C: <1%

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

- Wärmebedarf bis 151 °C: 303,71 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 151 °C: 0%
- Wärmebedarf bis 130 °C: 251,1 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 130 °C: 0%
- Wärmebedarf bis 100 °C: 175,7 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 100 °C: 0%
- Wärmekapazität (RT bis 151 °C, gemittelt): 2,51 J/(g\*K)

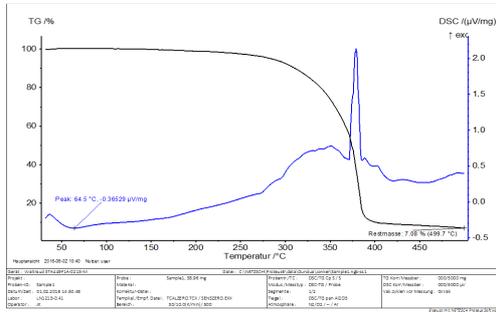


Abbildung 575 TGA von Lupasol FG

- Wärmebedarf bis 230 °C: 432,44 J/g Probe exp./520.04 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 230 °C: 2%
- Wärmebedarf bis 160 °C: 326,3 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 160 °C: <1%
- Wärmebedarf bis 151 °C: 303,71 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 151 °C: 0%
- Wärmebedarf bis 130 °C: 251,1 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 130 °C: 0%
- Wärmebedarf bis 100 °C: 175,7 J/g Probe ber.
- Massenverlust bis 100 °C: 0%
- Wärmekapazität (RT bis 151 °C, gemittelt): 2,51 J/(g\*K)

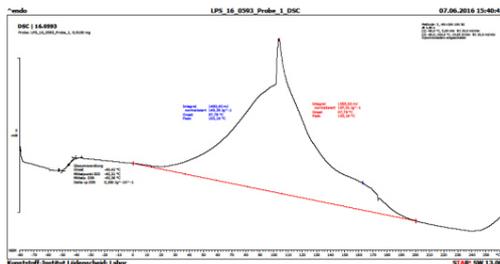


Abbildung 576 DSC von PEI800

- DSC-Wärmebedarf: RT bis 130 °C: 114 J/g Probe
- DSC-Wärmebedarf: RT bis 160 °C: 149 J/g Probe
- DSC-Wärmebedarf: RT bis 200 °C: 157 J/g Probe

### 1.19.5 Desorptionsenthalpie $\Delta H_d$

Der thermoanalytisch gemessene energetische Aufwand für die vollständige Eliminierung von  $\text{CO}_2$  und Wasser aus PEI-Hydrogencarbonaten beträgt  $98 \pm 4$  kJ/mol  $\text{CO}_2$  bzw. 2226 kJ/kg $\text{CO}_2$ . Dieser Wert wird sowohl durch die Berechnung nach Hess mit kJ/mol als auch die Abschätzung nach Joback mit 86,58 kJ/mol  $\text{CO}_2$  bzw. 1967 kJ/kg  $\text{CO}_2$  bestätigt. Die für die Eliminierung von  $\text{CO}_2$  aus PEI-Hydrogencarbonaten experimentell gemessenen, berechneten

als auch abgeschätzten Enthalpien liegen in der gleichen Größenordnung wie die für die Eliminierung von CO<sub>2</sub> aus MEA-Hydrogencarbonat in der Literatur genannten, experimentell bestimmten, nach Hess berechneten, als auch nach Joback abgeschätzten Enthalpien (93,17 kJ/mol bzw. 2117 kJ/kg CO<sub>2</sub>). Diese Ergebnisse harmonieren mit den in der Literatur beschriebenen Reaktionsenthalpien für die Umsetzung der niedermolekularen Polyamine MEDA, DETA, TETA und PEHA mit CO<sub>2</sub>, Stoffe die sich als niedermolekulare lineare Polyethyleniminoligomere mit Aminendgruppen mit den Polymerisationsgraden 1,2,3 und 5 auffassen lassen.

### 1.19.6 Behandlung einer 2,10 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

Eine 2,1 m%ige PEI 800-Lösung in Wasser wurde im Grawimikroblasenwäscher mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck von pH 10,7 bei RT bis zur Gleichgewichtseinstellung bei pH 7,2 mit mäßiger Konvektion behandelt. Das System wurde permanent gerührt.

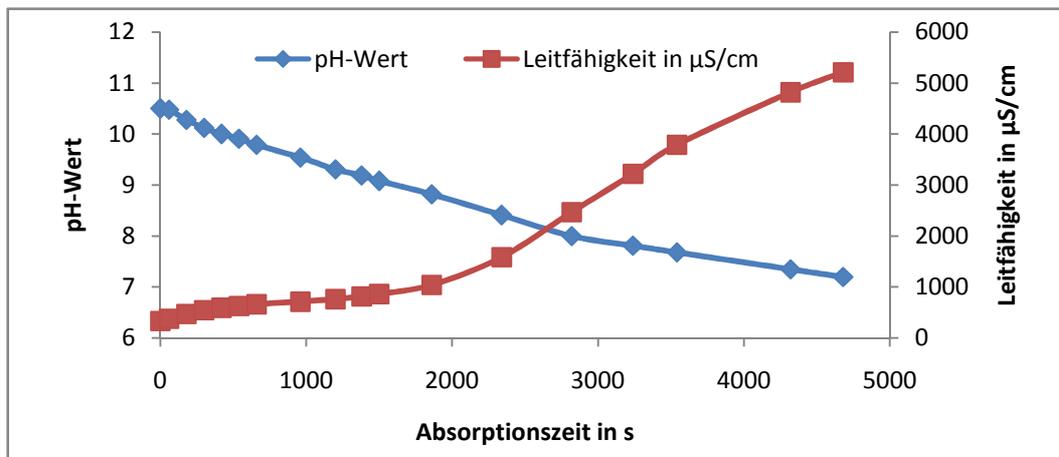


Abbildung 577 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

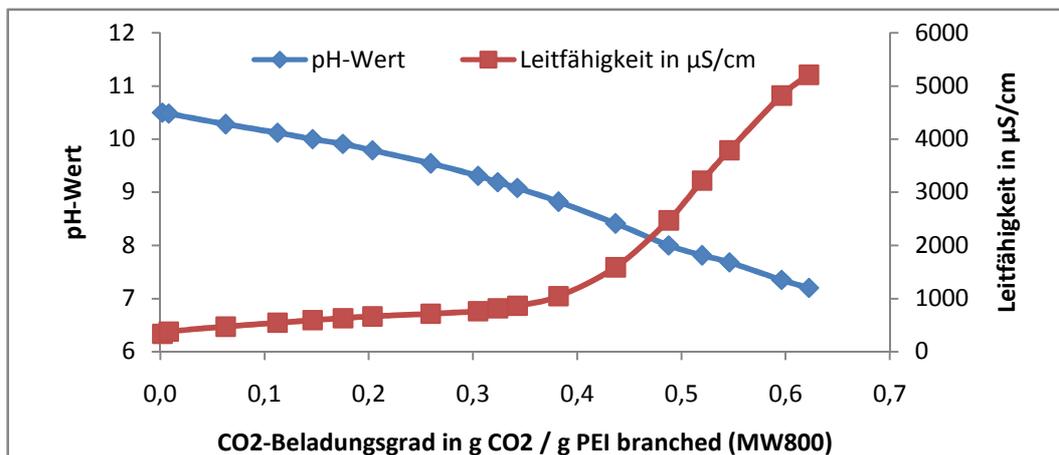


Abbildung 578 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen den CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

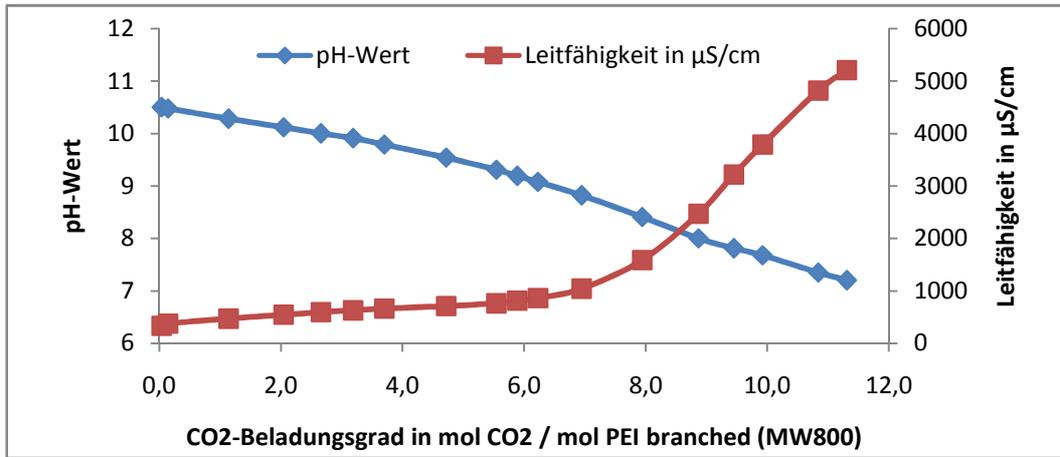


Abbildung 579 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen den CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

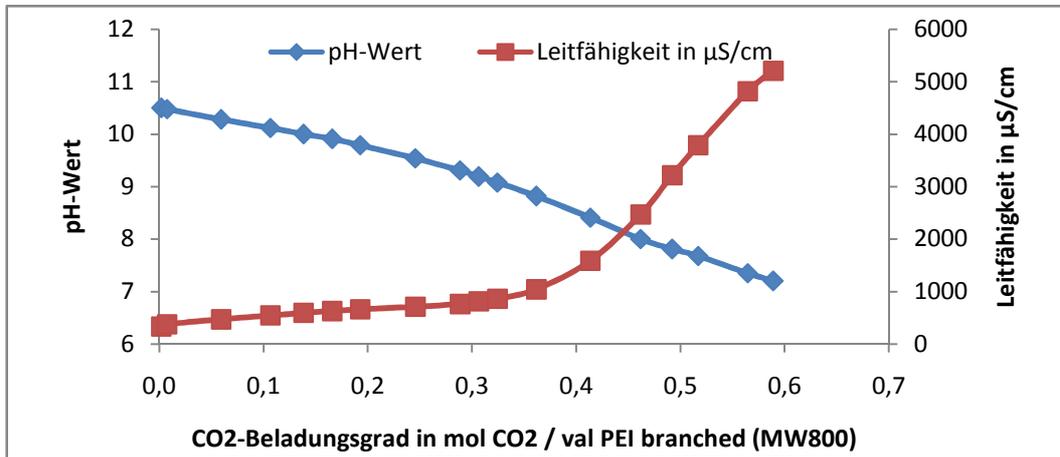


Abbildung 580 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen den CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

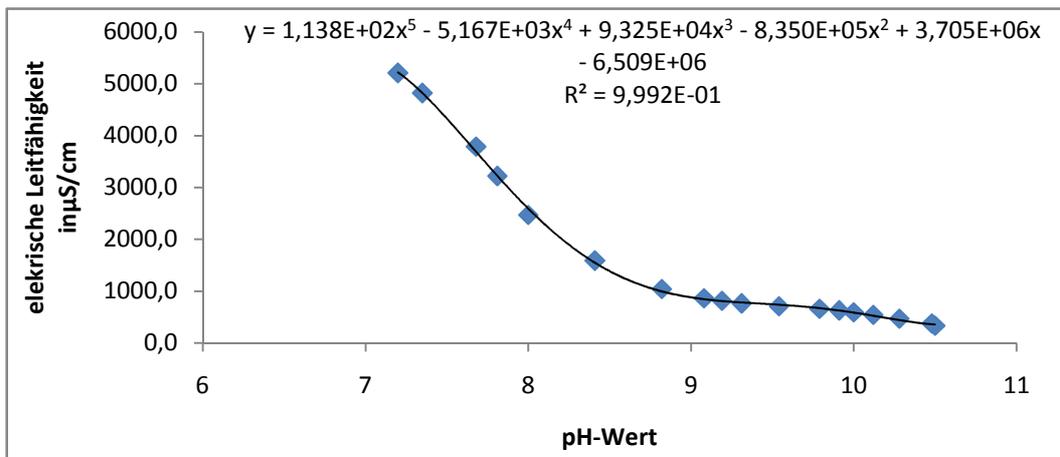


Abbildung 581 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

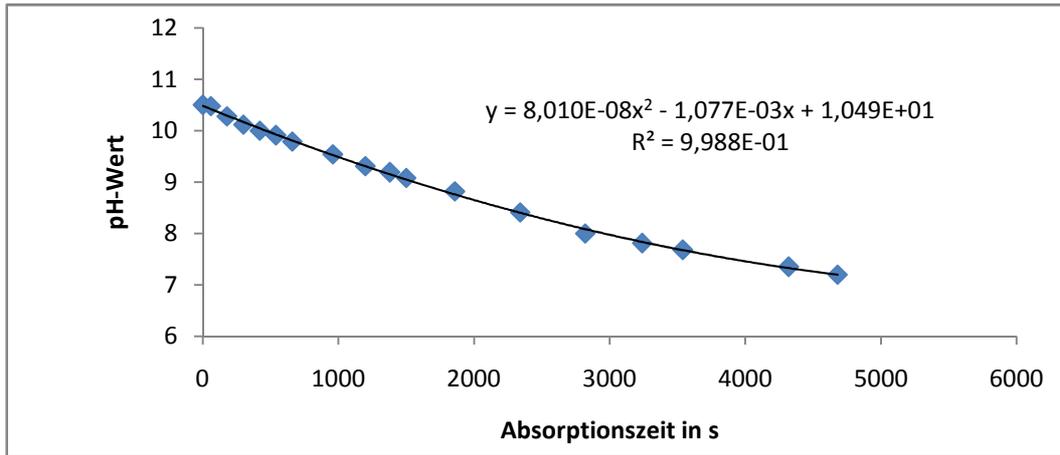


Abbildung 582 Verlauf des pH gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

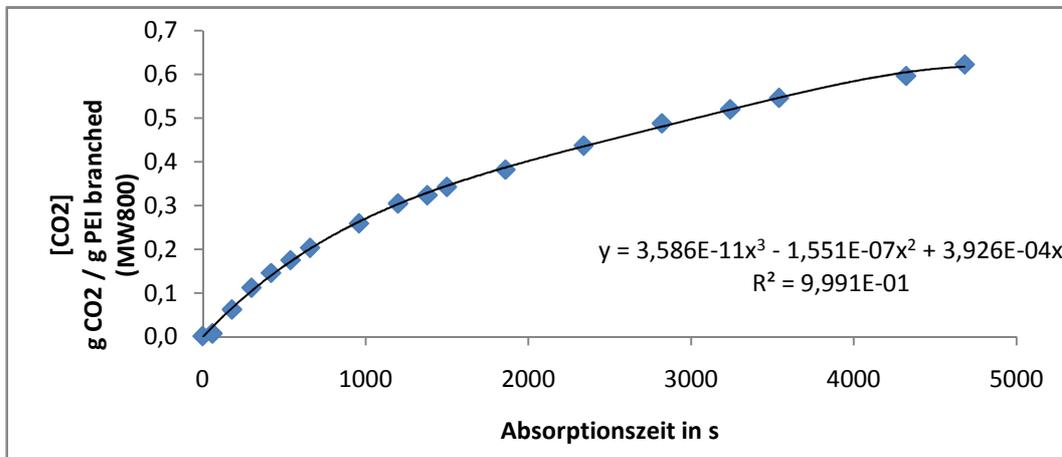


Abbildung 583 Verlauf des CO<sub>2</sub>-Beladungsgrads in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 l gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

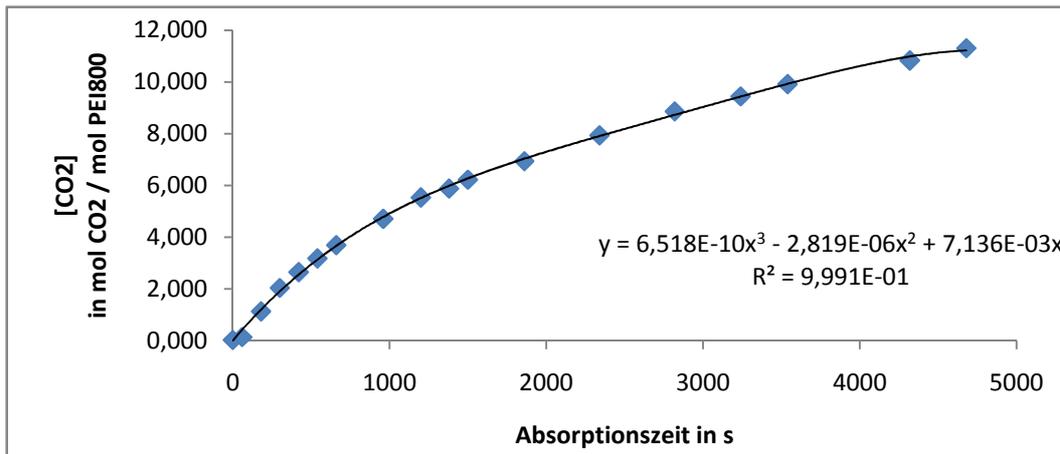


Abbildung 584 Verlauf des CO<sub>2</sub>-Beladungsgrads in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 l gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

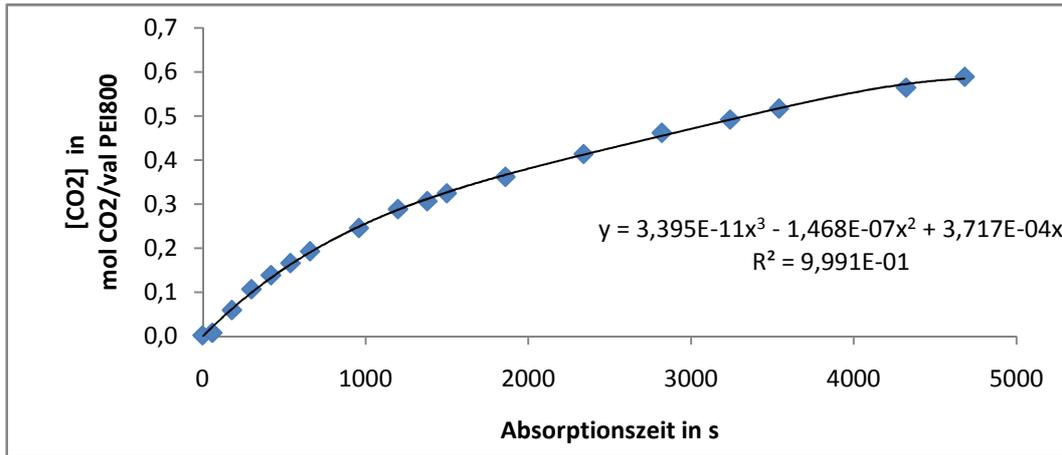


Abbildung 585 Verlauf des CO<sub>2</sub>-Beladungsgrads in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

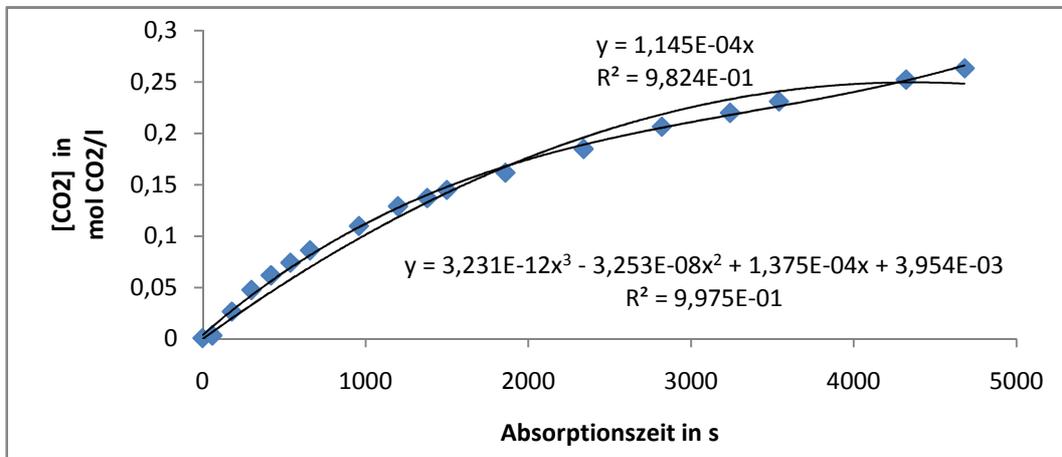


Abbildung 586 Verlauf des CO<sub>2</sub>-Beladungsgrads in mol CO<sub>2</sub>/l Washlösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

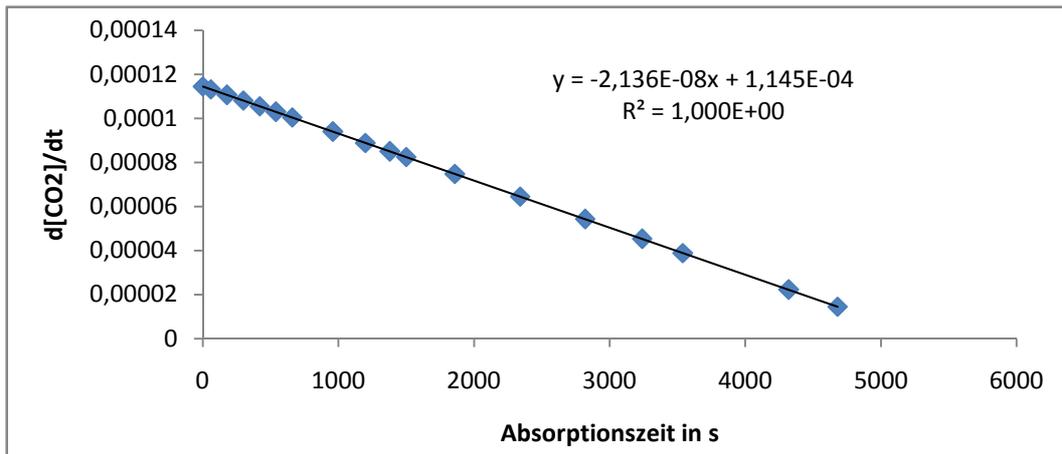


Abbildung 587 Auftragung Reaktionsgeschwindigkeit  $d[CO_2]/dt$  in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

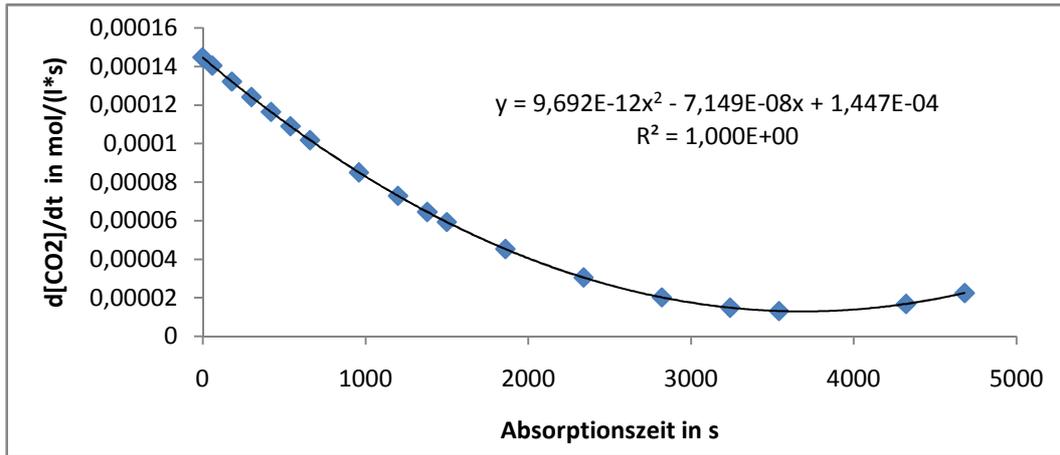


Abbildung 588 Auftragung Reaktionsgeschwindigkeit  $d[\text{CO}_2]/dt$  in  $\text{mol CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  von pH 10,7 bis pH 7,2 bei RT

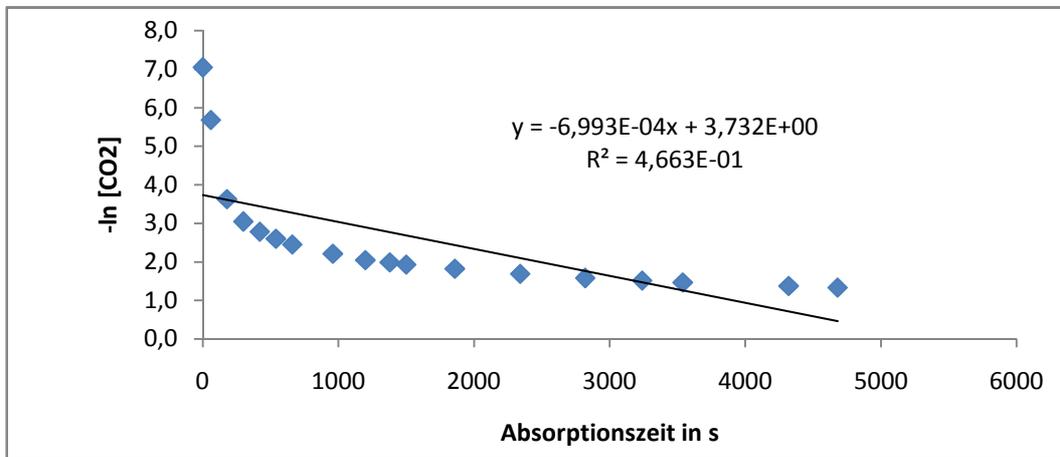


Abbildung 589 Auftragung  $-\ln[\text{CO}_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei RT

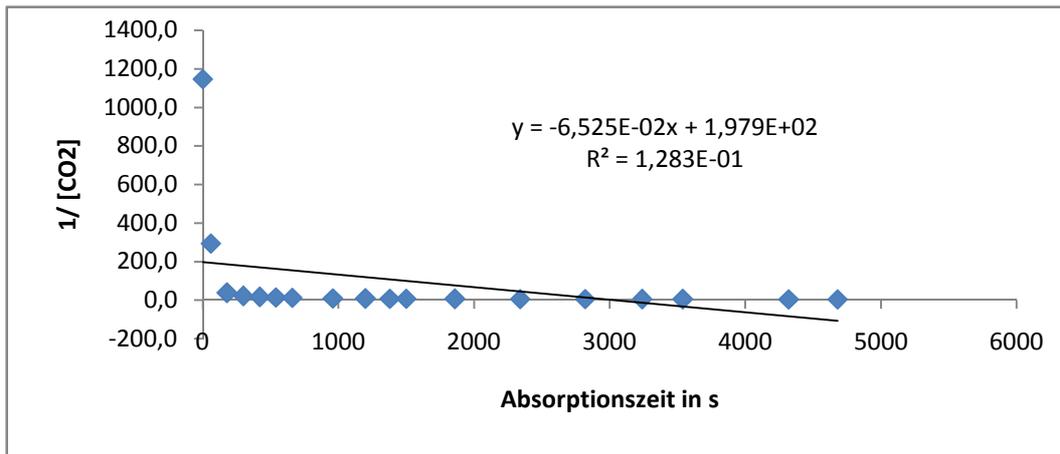


Abbildung 590 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei RT

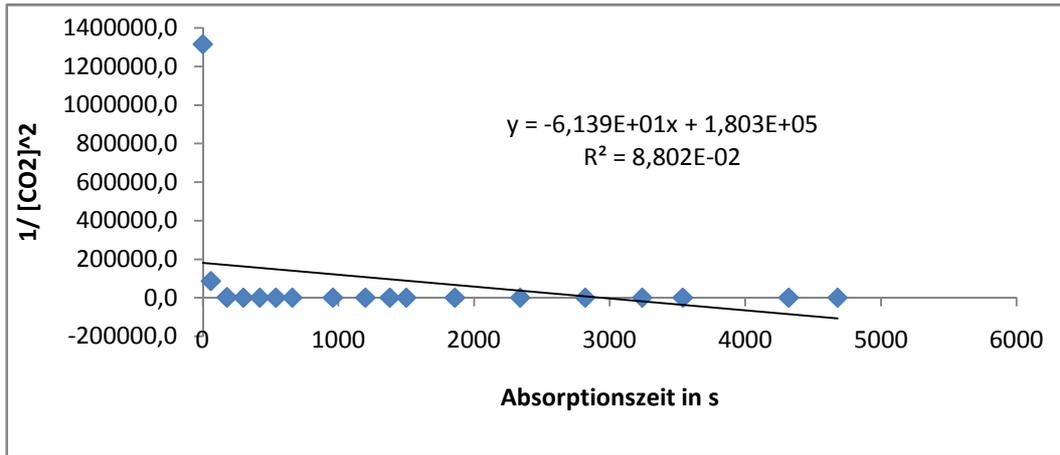


Abbildung 591 Auftragung  $1/[CO_2]^2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 3.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

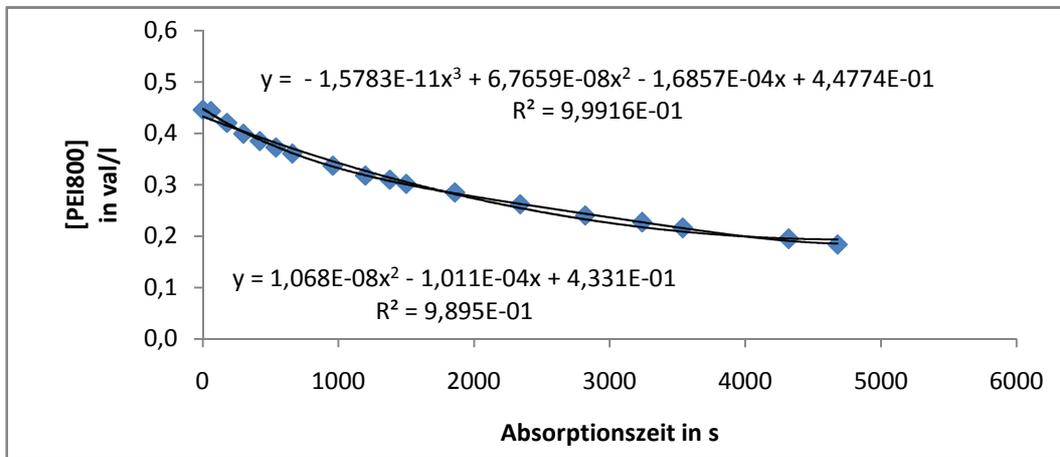


Abbildung 592 Auftragung Konzentration PEI800 in val PEI800/l Waschlösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

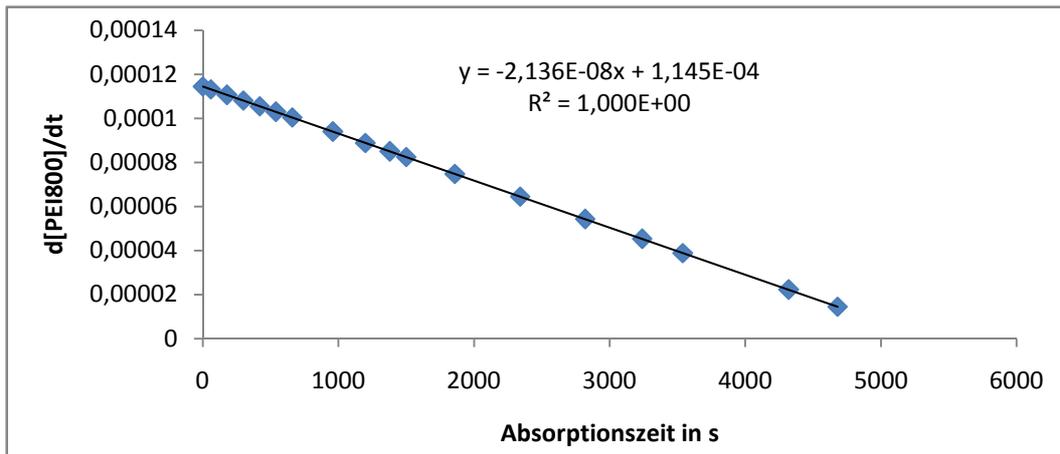


Abbildung 593 Auftragung  $d[PEI]/dt$  gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei RT

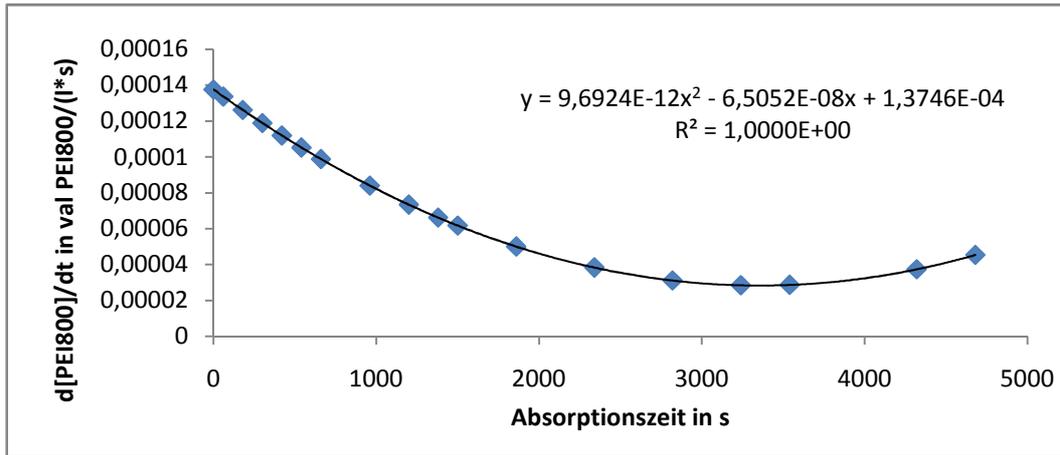


Abbildung 594 Auftragung  $\frac{d[\text{PEI}]}{dt}$  gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit bei RT

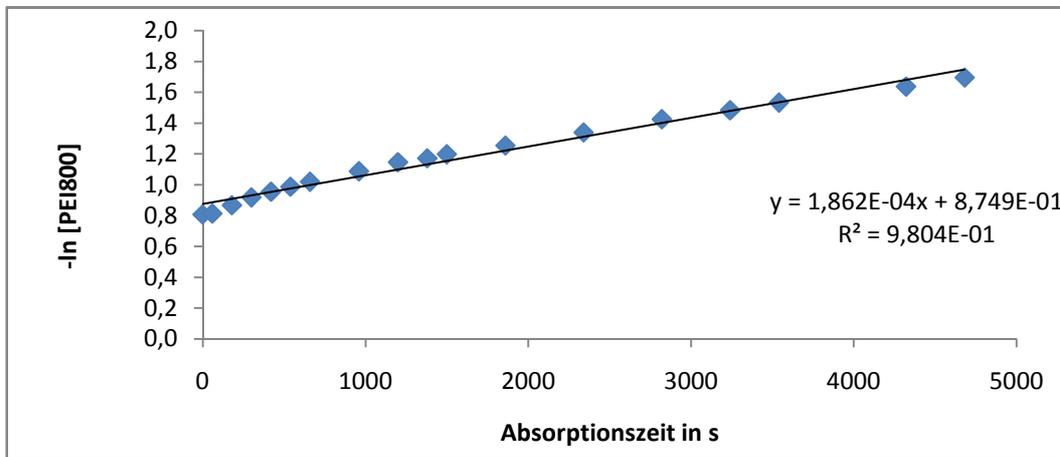


Abbildung 595 Auftragung  $-\ln [\text{PEI}]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei RT

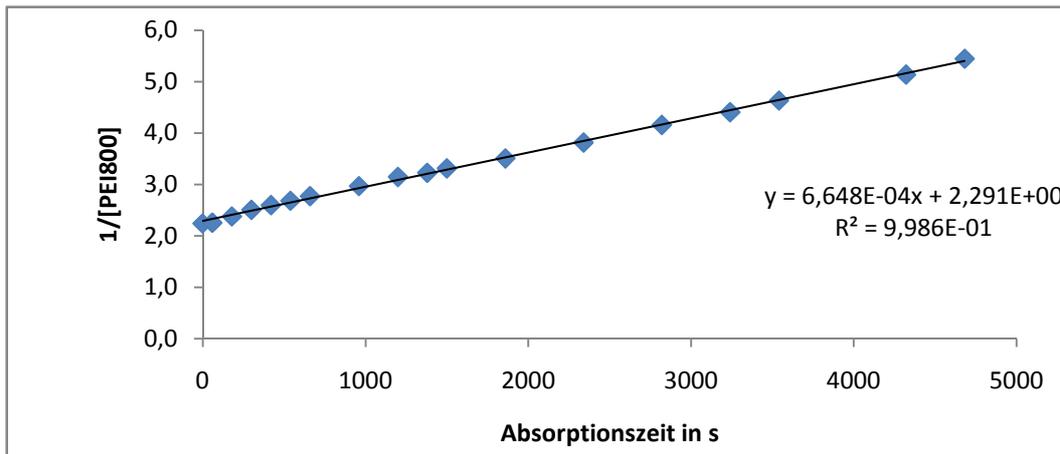


Abbildung 596 Auftragung  $1/[\text{PEI}]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei RT

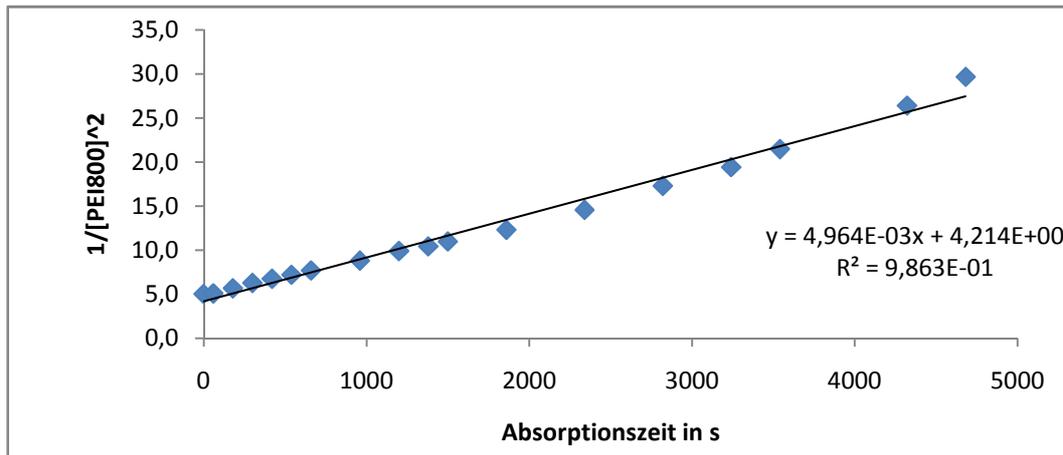


Abbildung 597 Auftragung  $1/[PEI]^2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 3.Ordnung bei der Behandlung einer 2,1 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$  bei RT

### 1.19.7 Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit $CO_2$

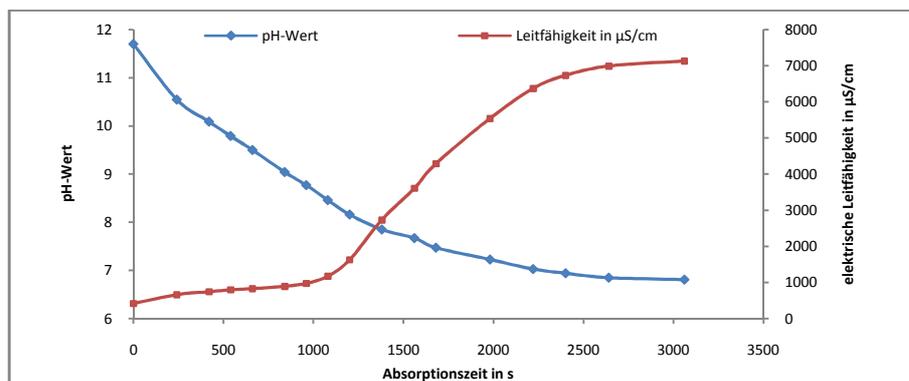


Abbildung 598 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$  bei Raumbedingungen

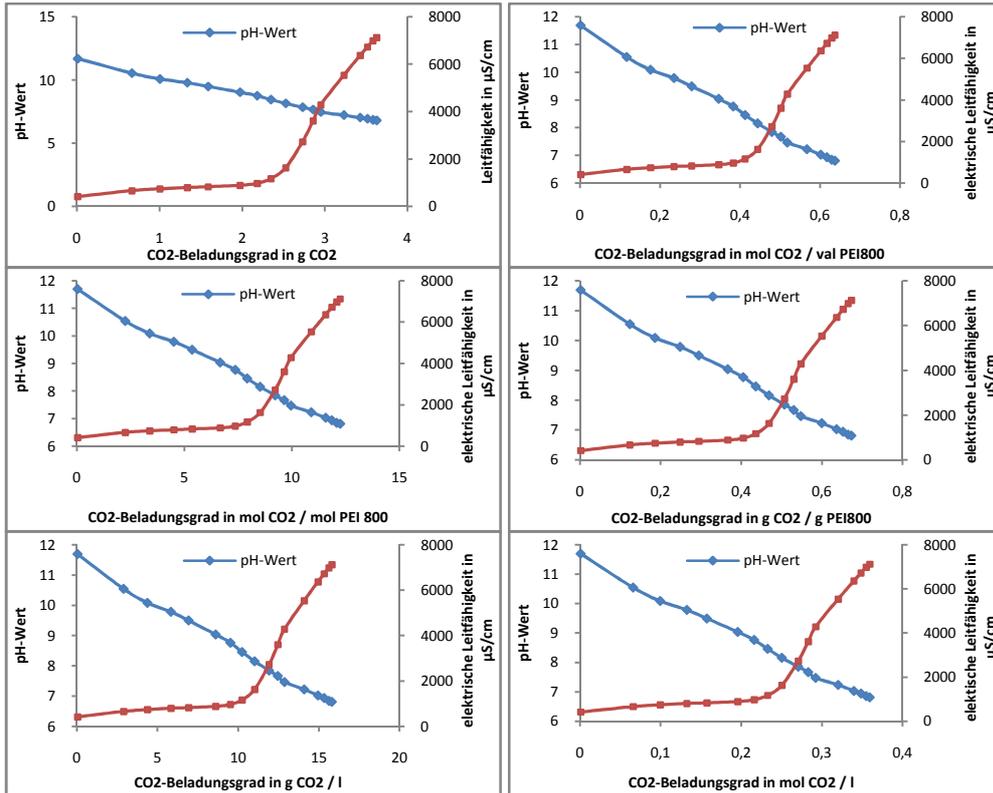


Abbildung 599 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

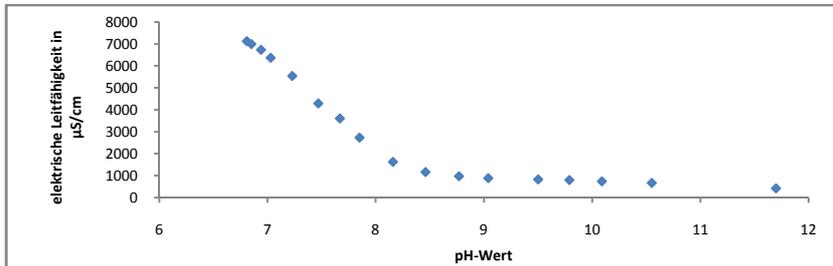


Abbildung 600 Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

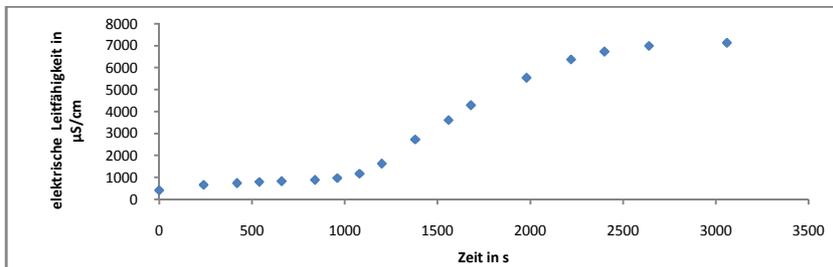


Abbildung 601 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

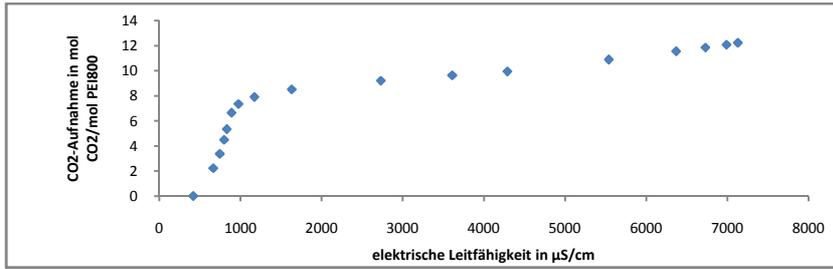


Abbildung 602 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen den die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

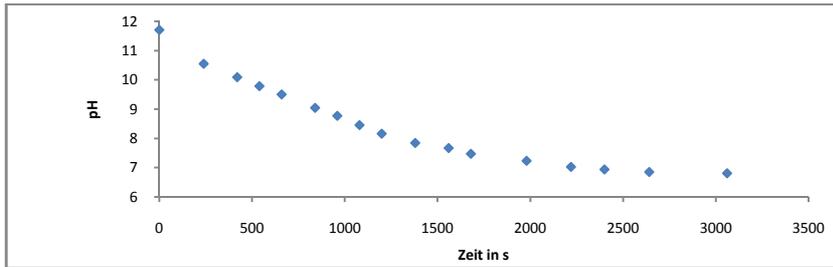


Abbildung 603 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

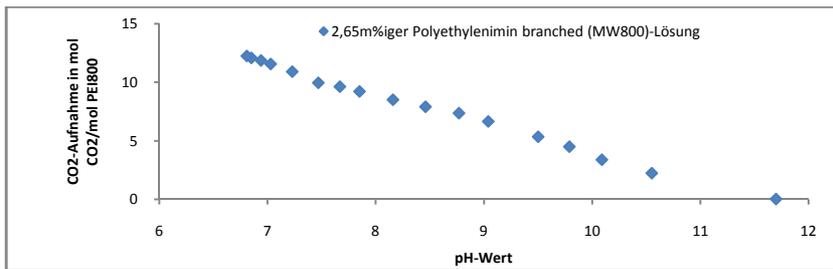


Abbildung 604 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen den pH bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

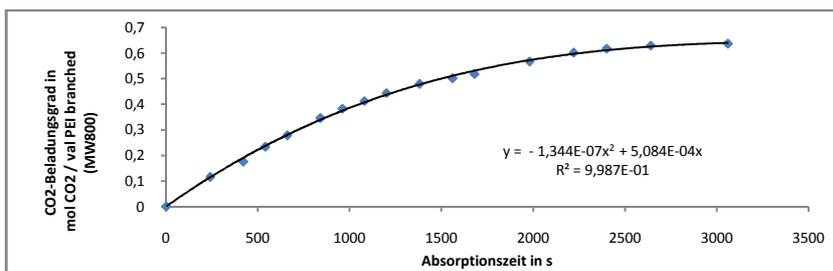


Abbildung 605 Verlauf der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

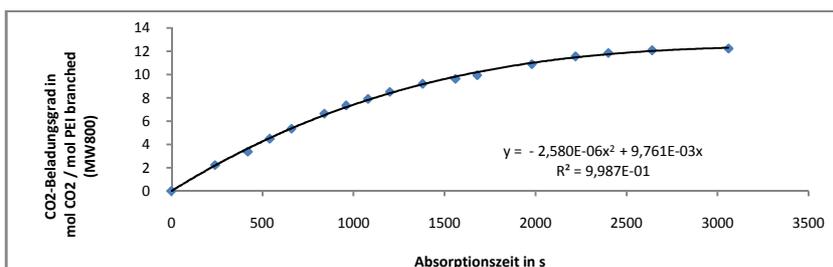


Abbildung 606 Verlauf der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

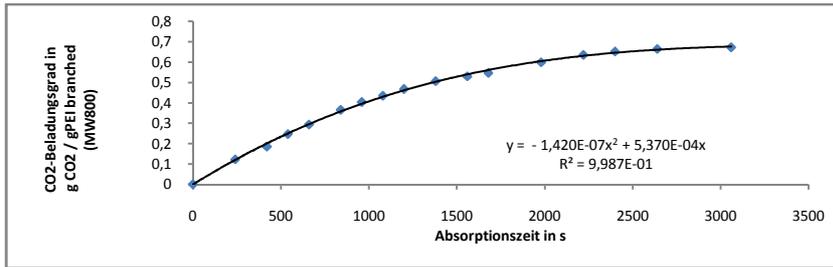


Abbildung 607 Verlauf der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

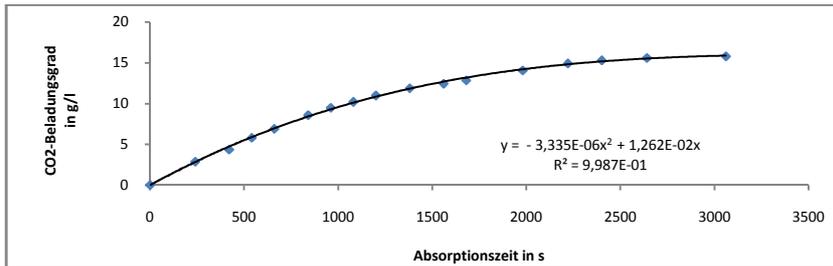


Abbildung 608 Verlauf der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

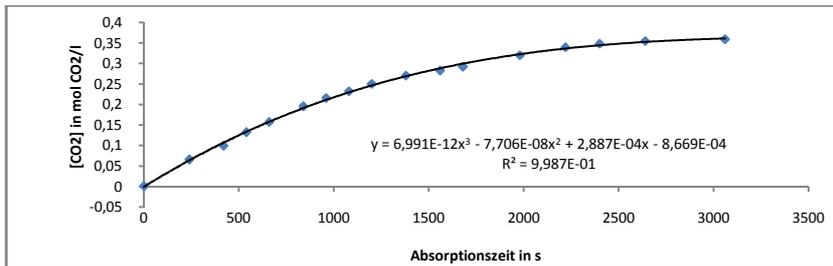


Abbildung 609 Verlauf der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

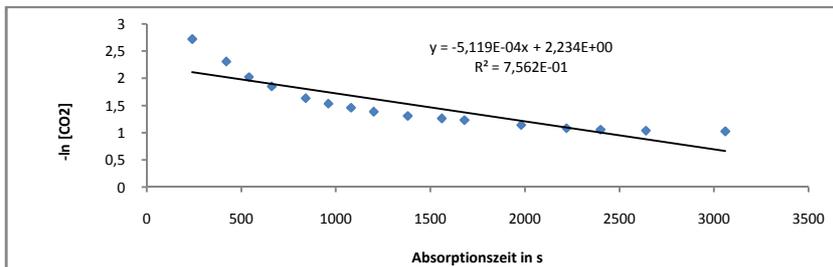


Abbildung 610 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der Aufnahme von CO<sub>2</sub> gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

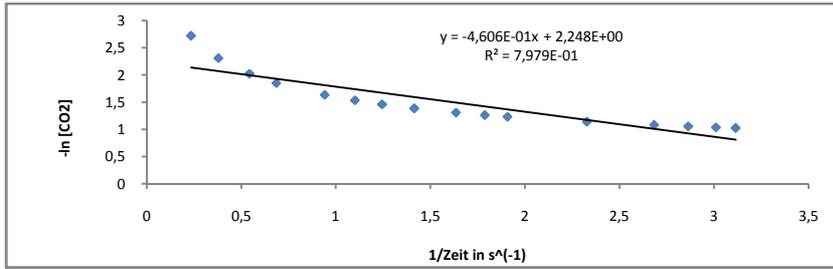


Abbildung 611 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der Aufnahme von CO<sub>2</sub> gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

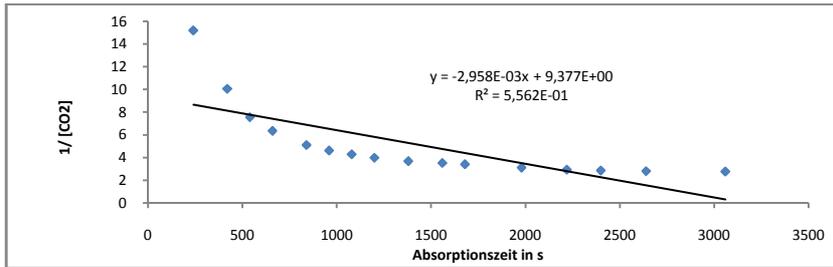


Abbildung 612 Verlauf des Kehrwertes der Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

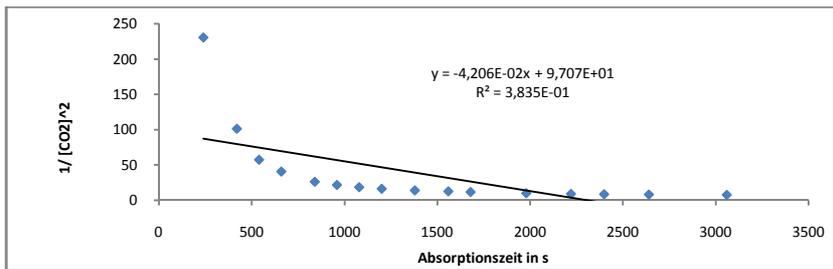


Abbildung 613 Verlauf des Kehrwertes der quadratischen Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

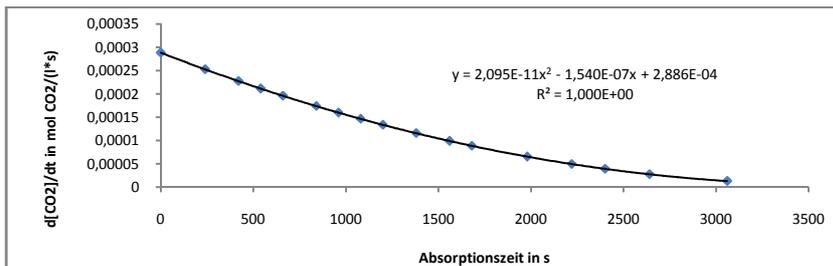


Abbildung 614 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

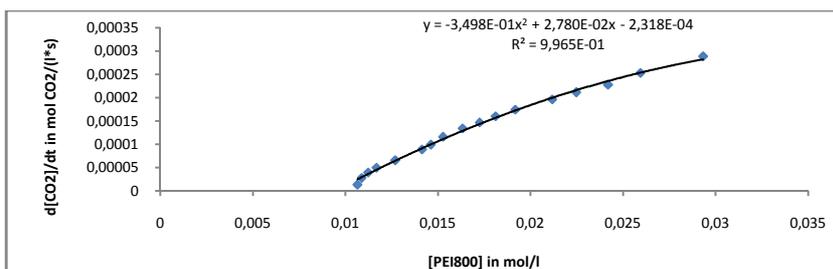


Abbildung 615 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI800 in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

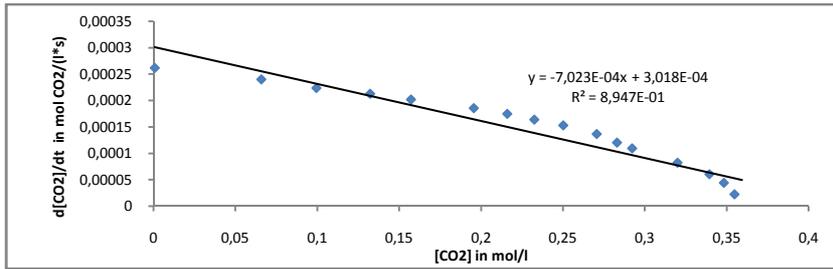


Abbildung 616 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

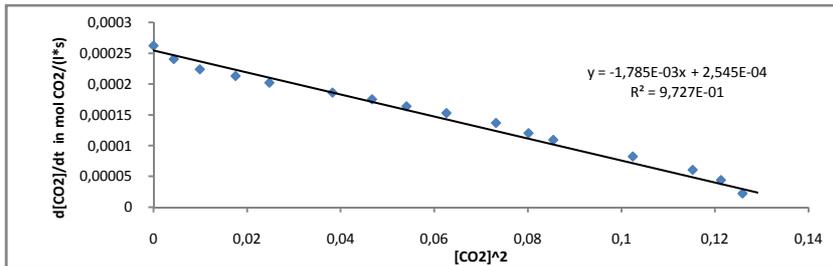


Abbildung 617 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

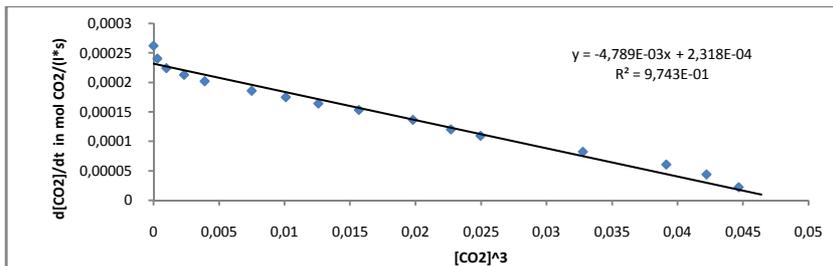


Abbildung 618 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte Aufnahme von CO<sub>2</sub> in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

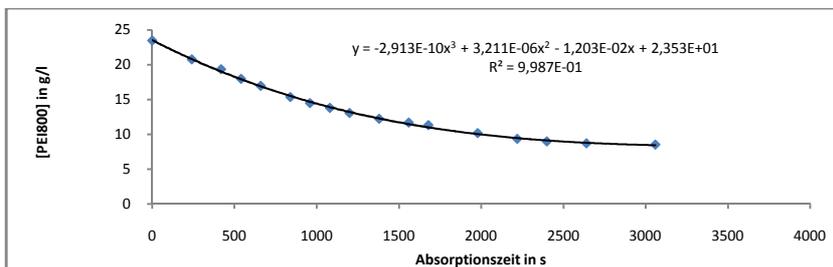


Abbildung 619 Verlauf der Konzentration von PEI800 in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

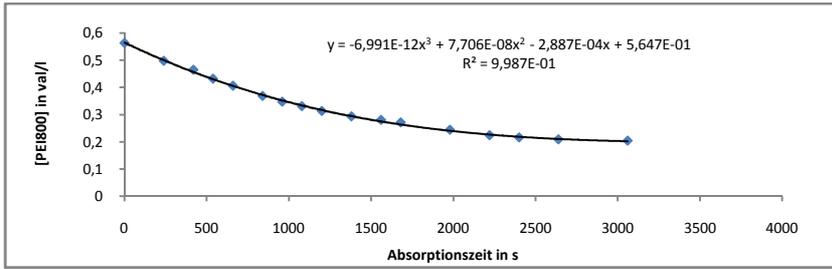


Abbildung 620 Verlauf der Konzentration von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

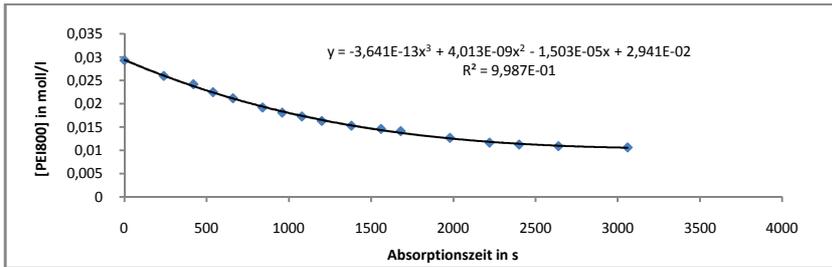


Abbildung 621 Verlauf der Konzentration von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

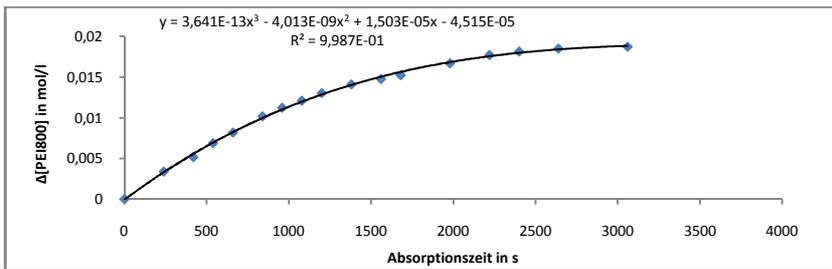


Abbildung 622 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

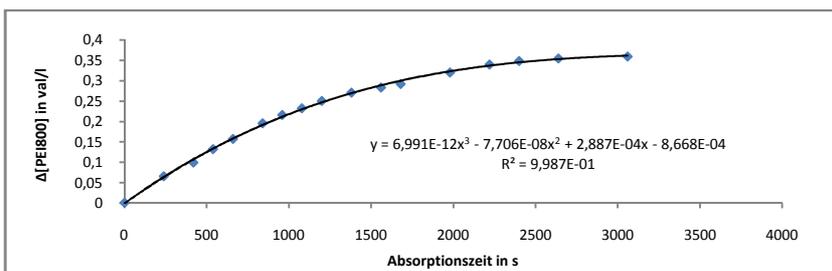


Abbildung 623 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

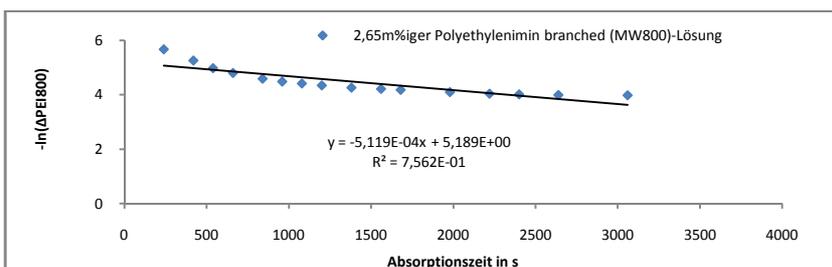


Abbildung 624 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

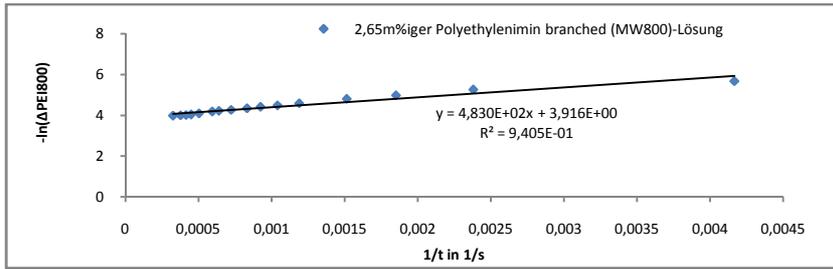


Abbildung 625 Verlauf es neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

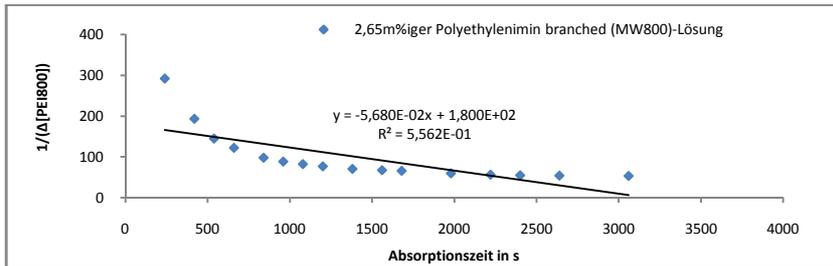


Abbildung 626 Verlauf es Kehrwertes des Umsatzes von PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

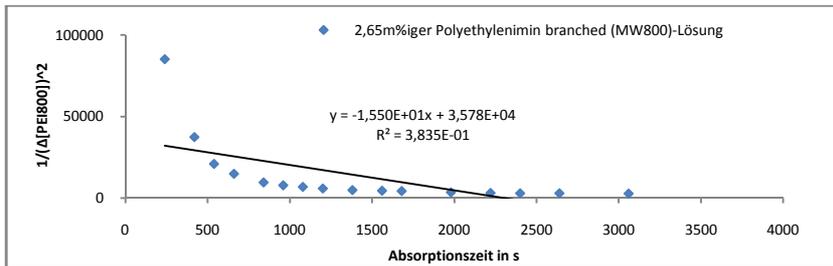


Abbildung 627 Verlauf es Kehrwertes des quadratischen Umsatzes von PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

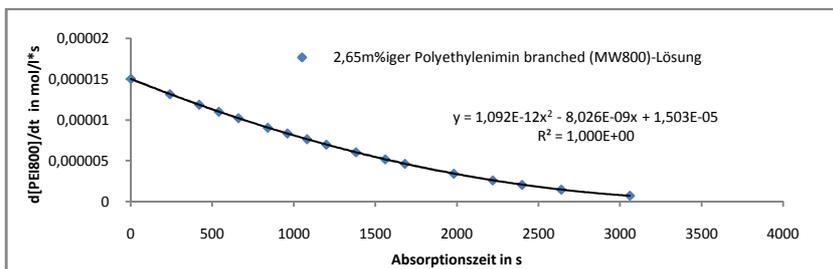


Abbildung 628 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Amin/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

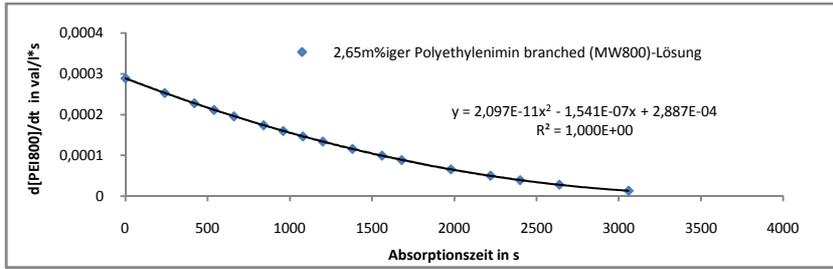


Abbildung 629 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val Amin/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in val/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

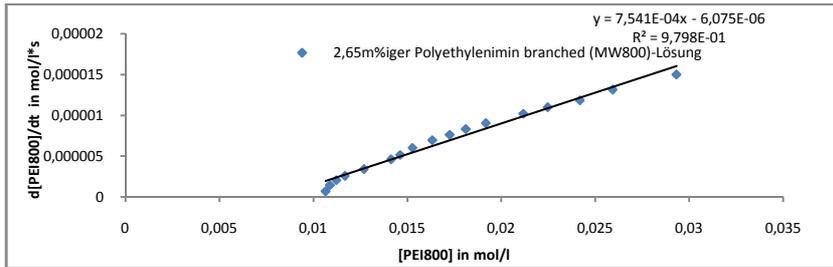


Abbildung 630 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol Amin/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in mol/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

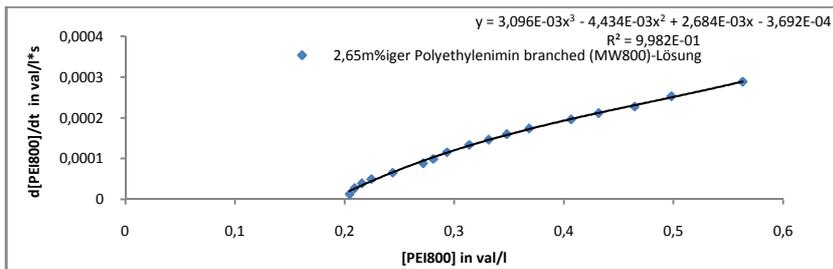


Abbildung 631 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in val Amin/(l\*s) gegen die Konzentration Amin in val/l bei der Behandlung einer 2,65 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

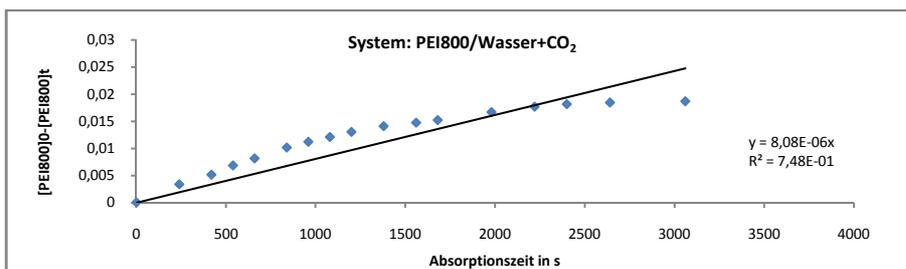


Abb. 632 Arrhenius-Plot 0.ter Ordnung für die Behandlung 2,65 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

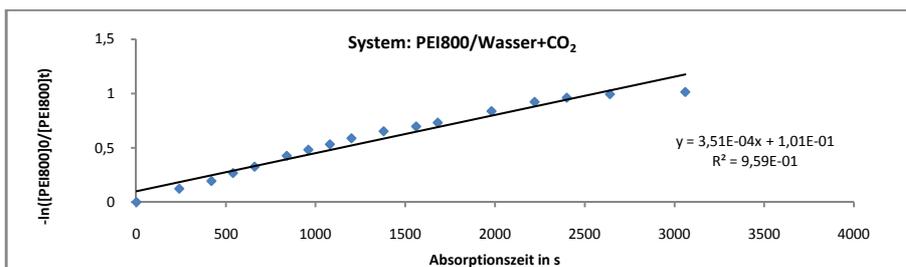


Abb. 633 Arrhenius-Plot 1.ter Ordnung für die Behandlung 2,65 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

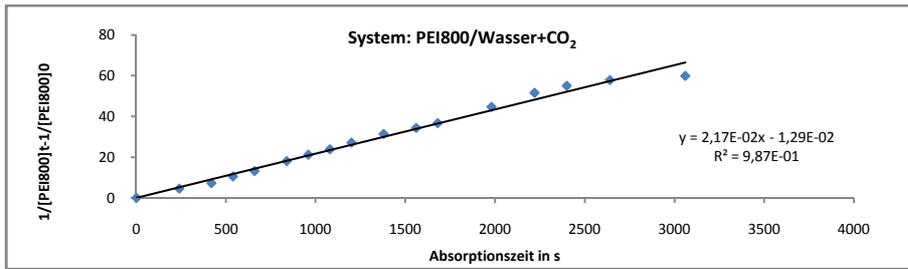


Abb. 634 Arrhenius-Plot 2.ter Ordnung für die Behandlung einer 2,65 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

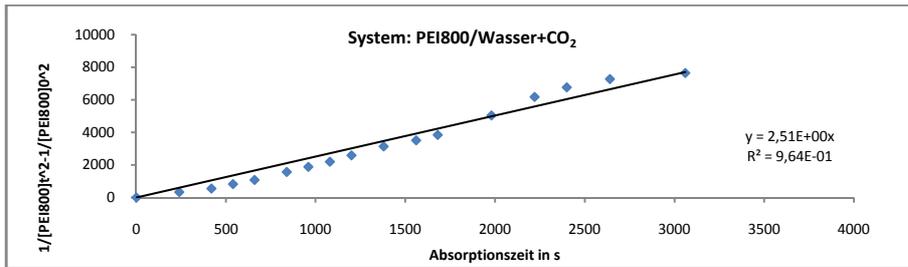


Abb. 635 Arrhenius-Plot 3.ter Ordnung für die Behandlung einer 2,65 m%igen wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

1.19.8 Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

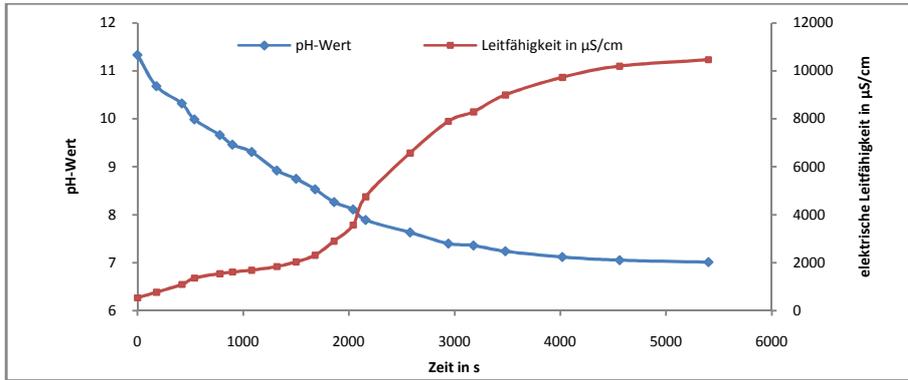


Abbildung 636 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen

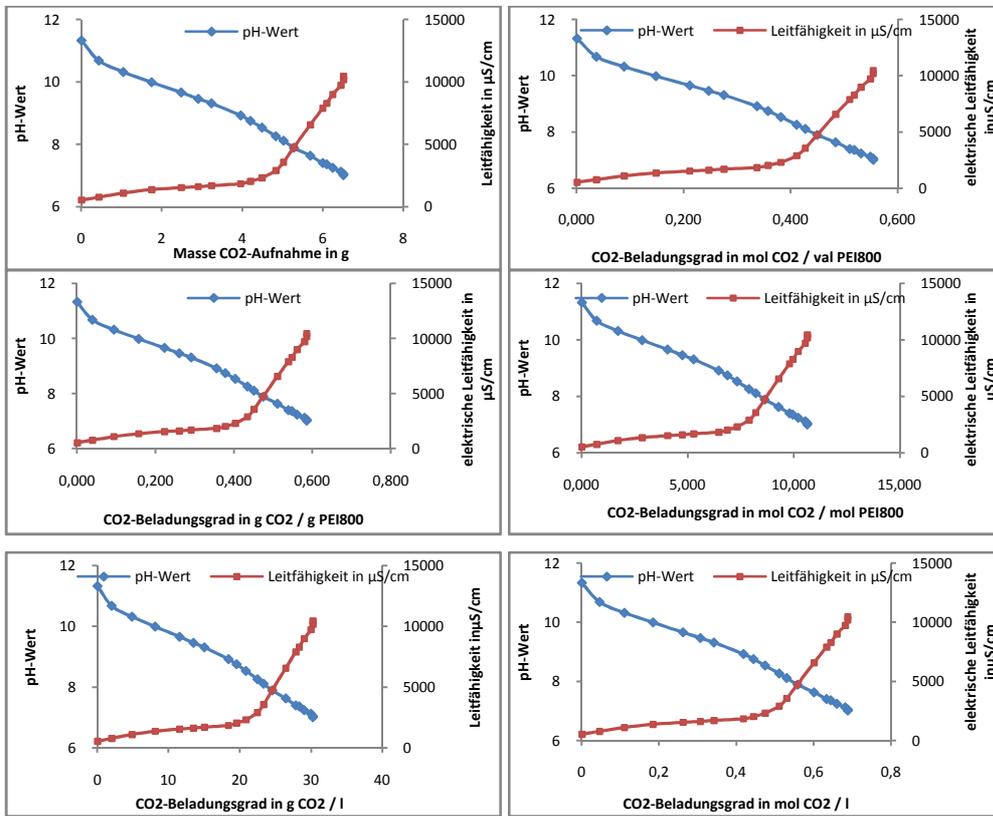


Abbildung 637 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Aufnahme bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen

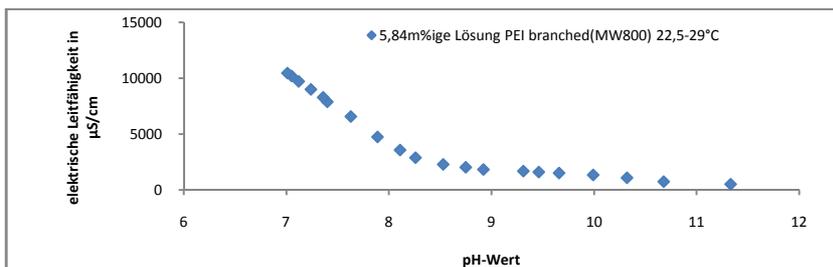


Abbildung 638 Korrelation von pH und elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

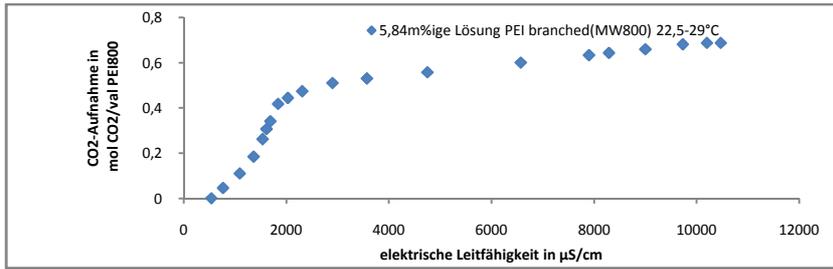


Abbildung 639 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

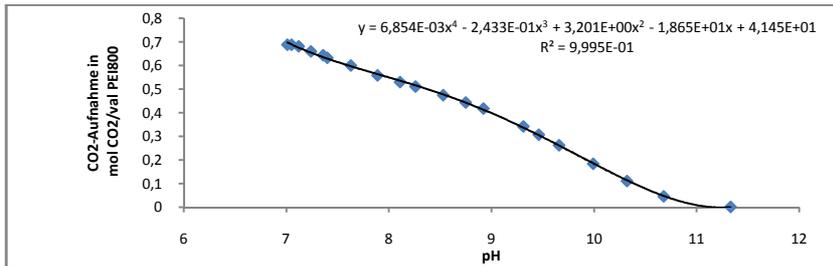


Abbildung 640 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen den pH bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

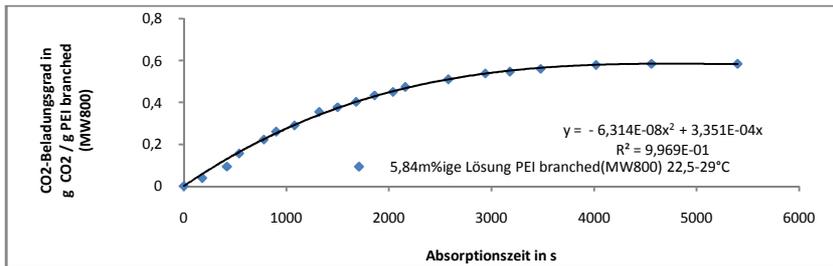


Abbildung 641 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

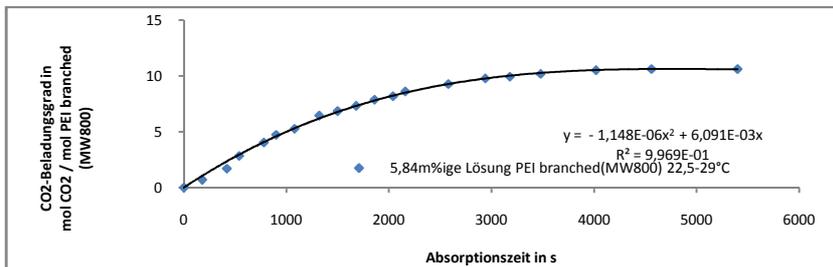


Abbildung 642 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



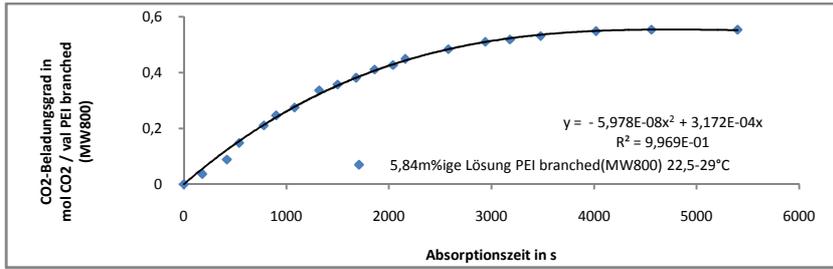
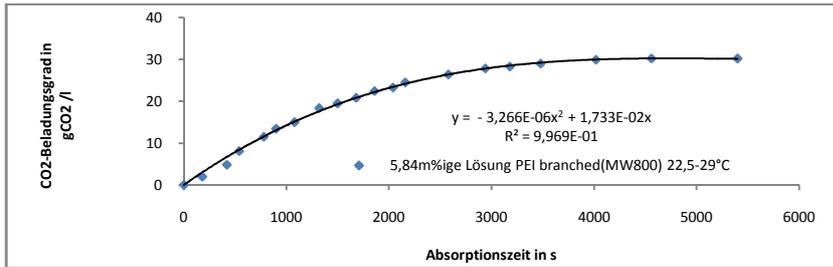


Abbildung 643 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

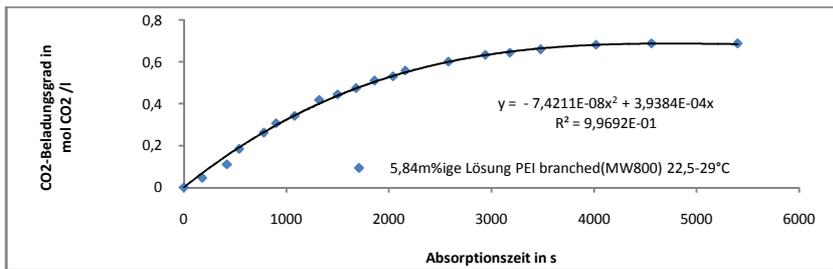


Abbildung 644 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

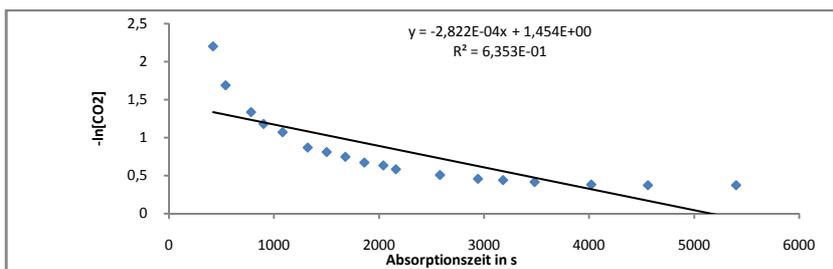
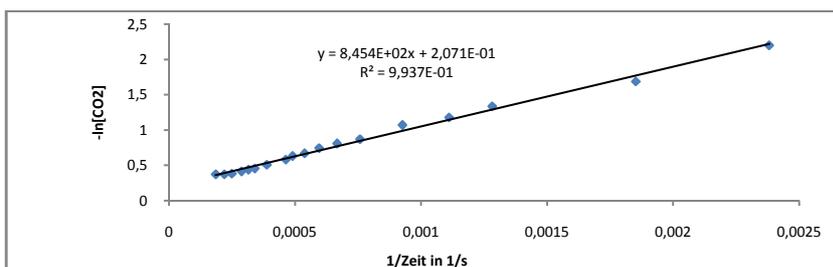
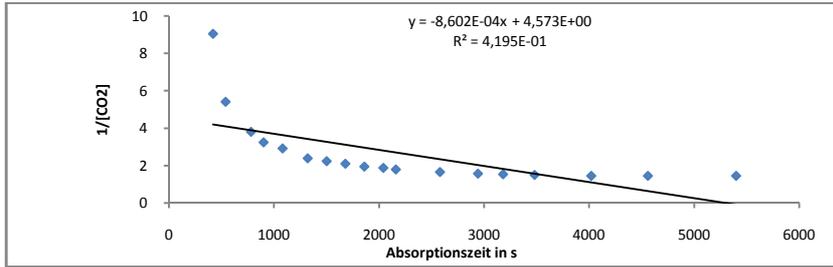


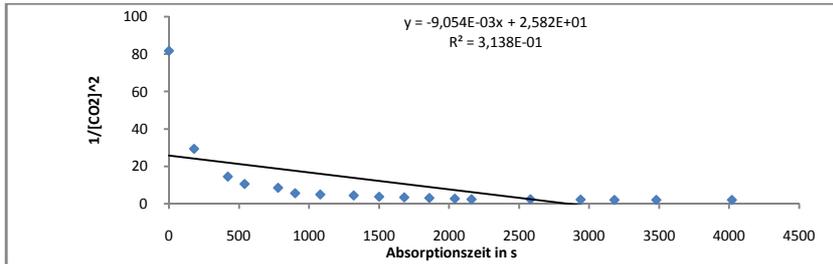
Abbildung 645 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



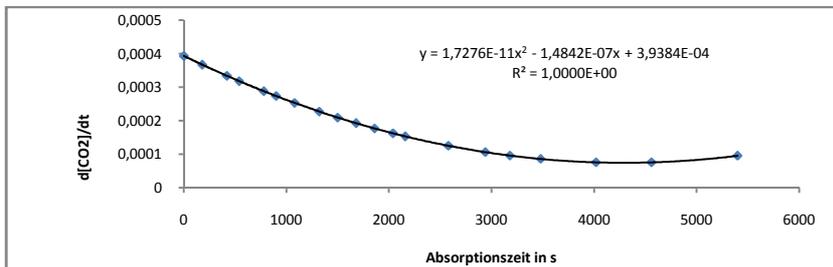
**Abbildung 646** Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



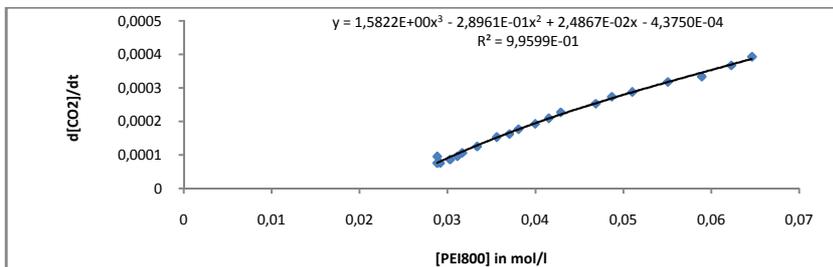
**Abbildung 647** Verlauf des Kehrwertes der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 648** Verlauf des Kehrwertes des Quadrats der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 649** Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen



**Abbildung 650** Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration PEI800 in mol PEI800/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

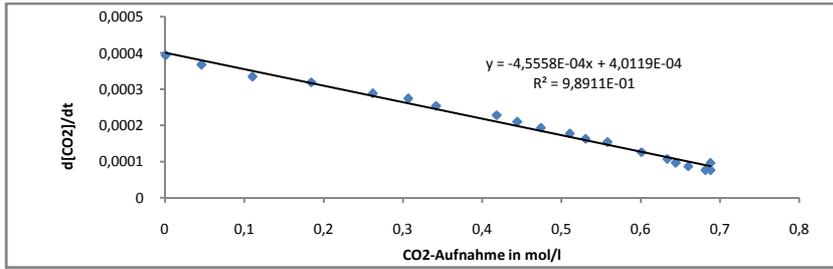


Abbildung 651 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

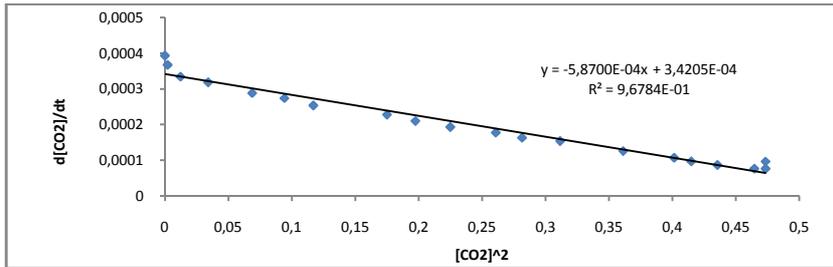


Abbildung 652 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die quadrierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

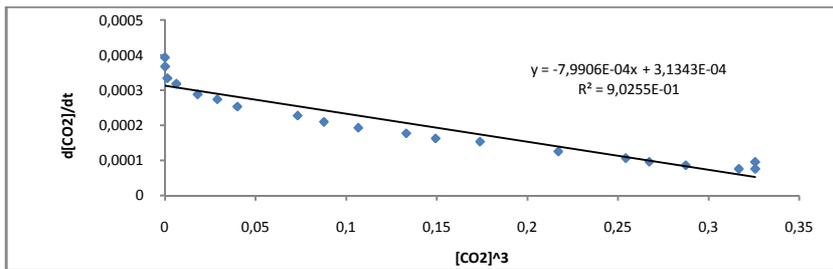


Abbildung 653 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die kubierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

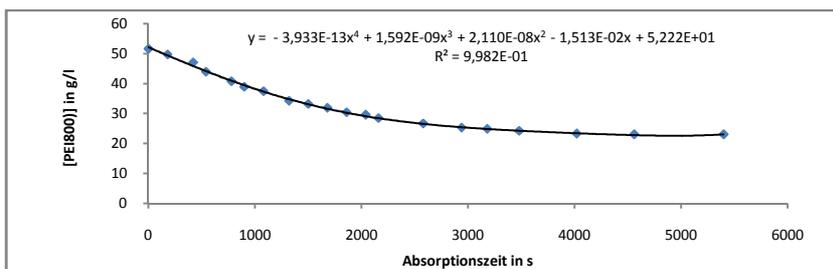


Abbildung 654 Verlauf der Konzentration PEI800 g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

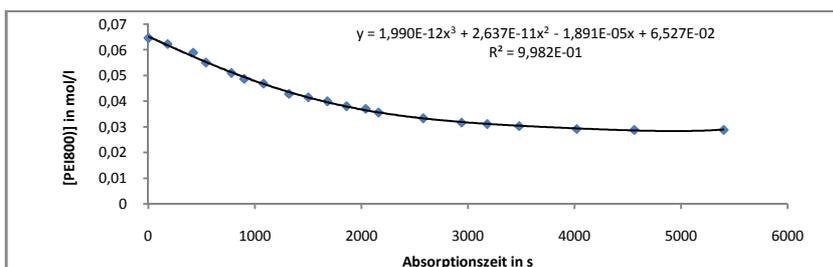


Abbildung 655 Verlauf der Konzentration PEI800 mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

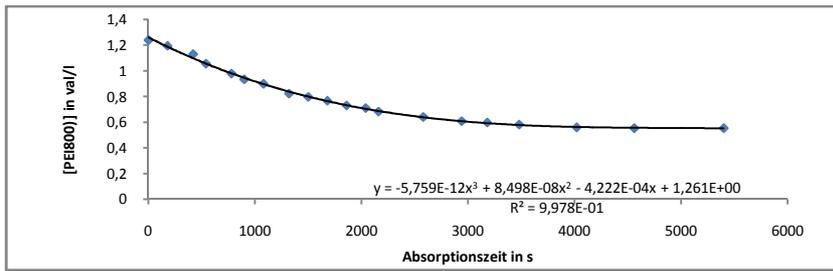


Abbildung 656 Verlauf der Konzentration PEI800 val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

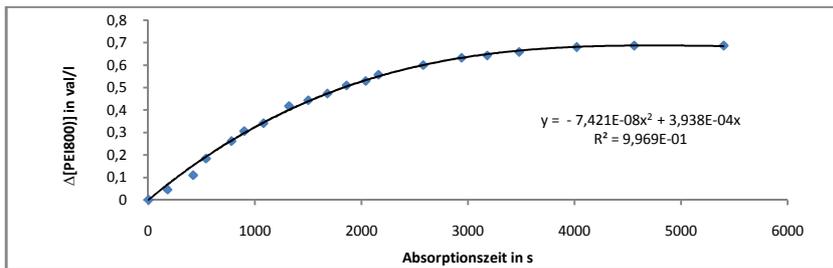


Abbildung 657 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

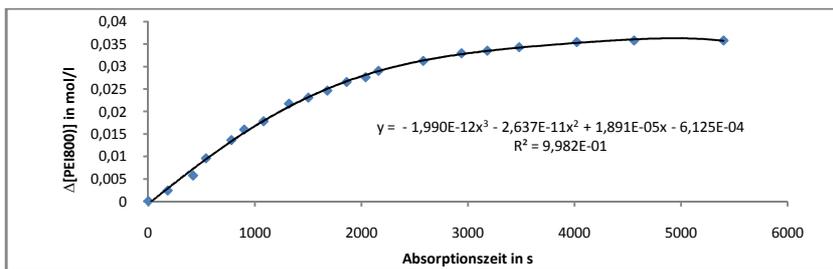


Abbildung 658 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

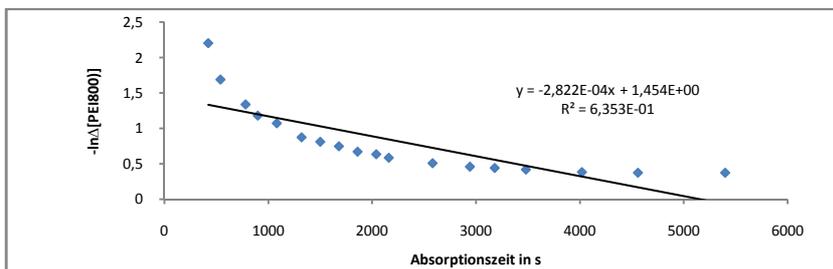


Abbildung 659 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

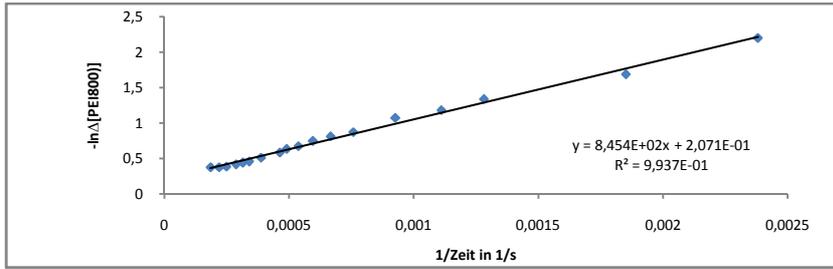


Abbildung 660 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

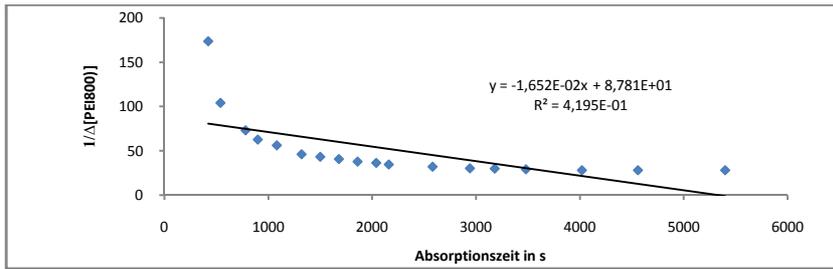


Abbildung 661 Verlauf des Kehrwerts des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

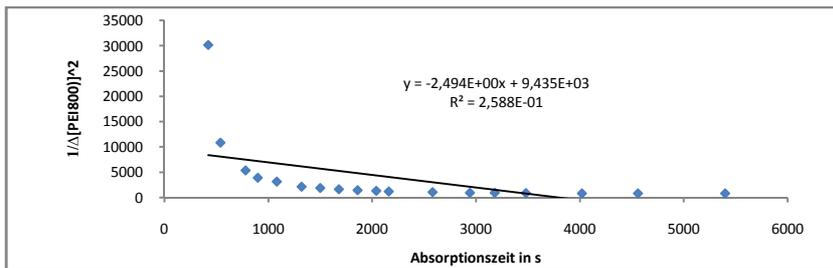


Abbildung 662 Verlauf des Kehrwerts des quadrierten Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

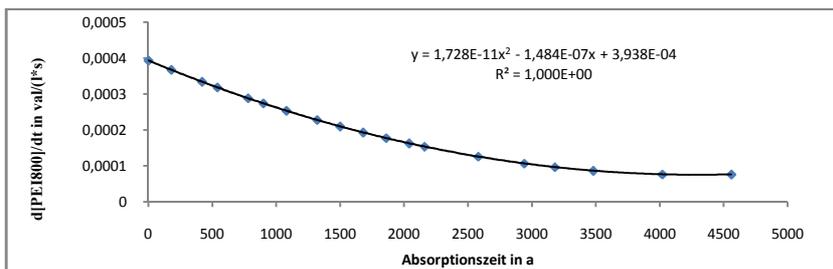


Abbildung 663 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI800/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

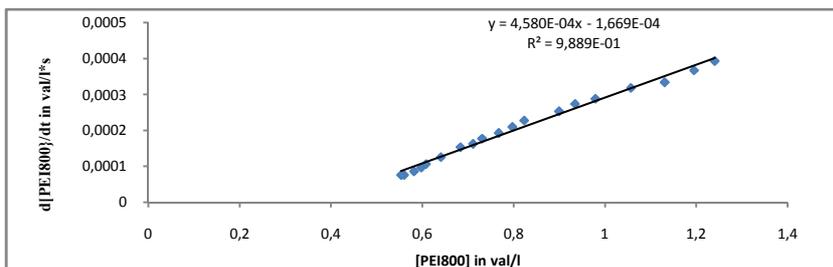


Abbildung 664 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI800/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI800 in val/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

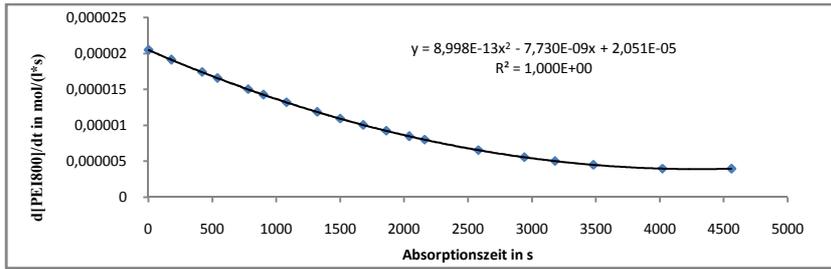


Abbildung 665 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

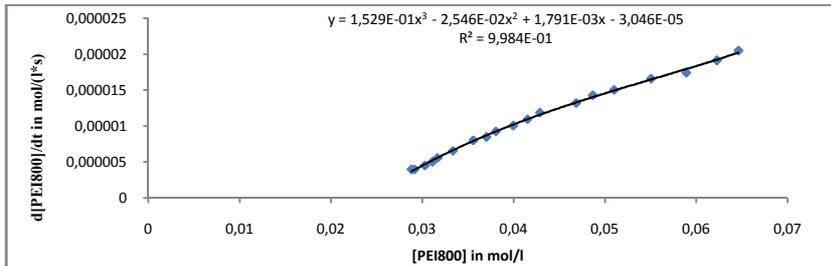


Abbildung 666 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI800 in mol/l bei der Behandlung einer 5,84 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

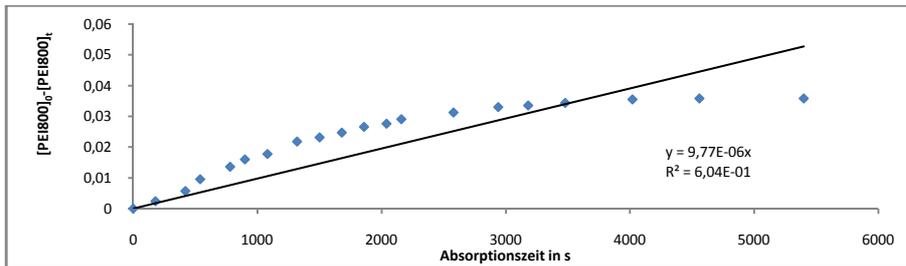


Abb. 667 Arrhenius-Plot 0.ter Ordnung für die Behandlung 5,84 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

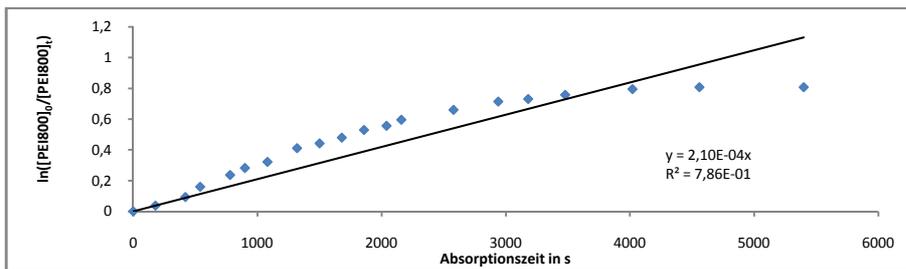


Abb. 668 Arrhenius-Plot 1.ter Ordnung für die Behandlung 5,84 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

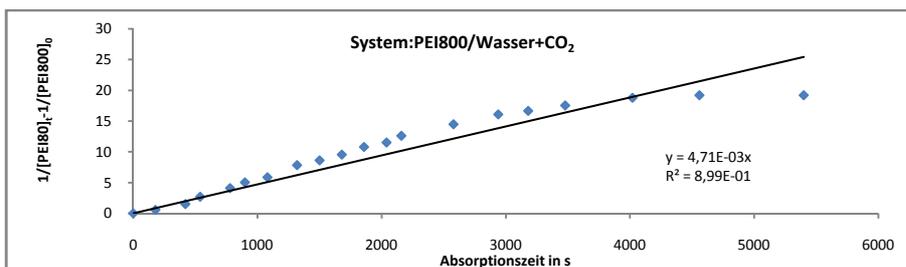


Abb. 669 Arrhenius-Plot 2.ter Ordnung für die Behandlung einer 5,84 m%igen wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

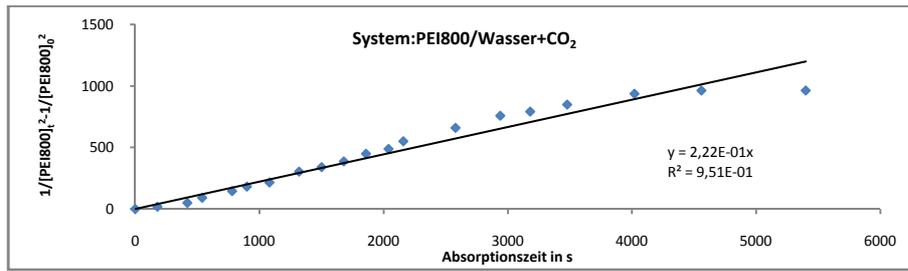


Abb. 670 Arrhenius-Plot 3.ter Ordnung für die Behandlung einer 5,84 m%igen wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

1.19.9 Behandlung einer 11,85%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

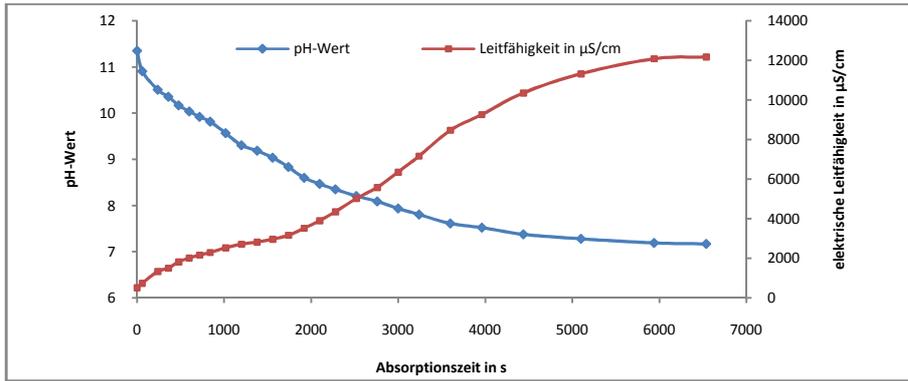


Abbildung 671 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 11,85%igen PEI800-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Aufnahme

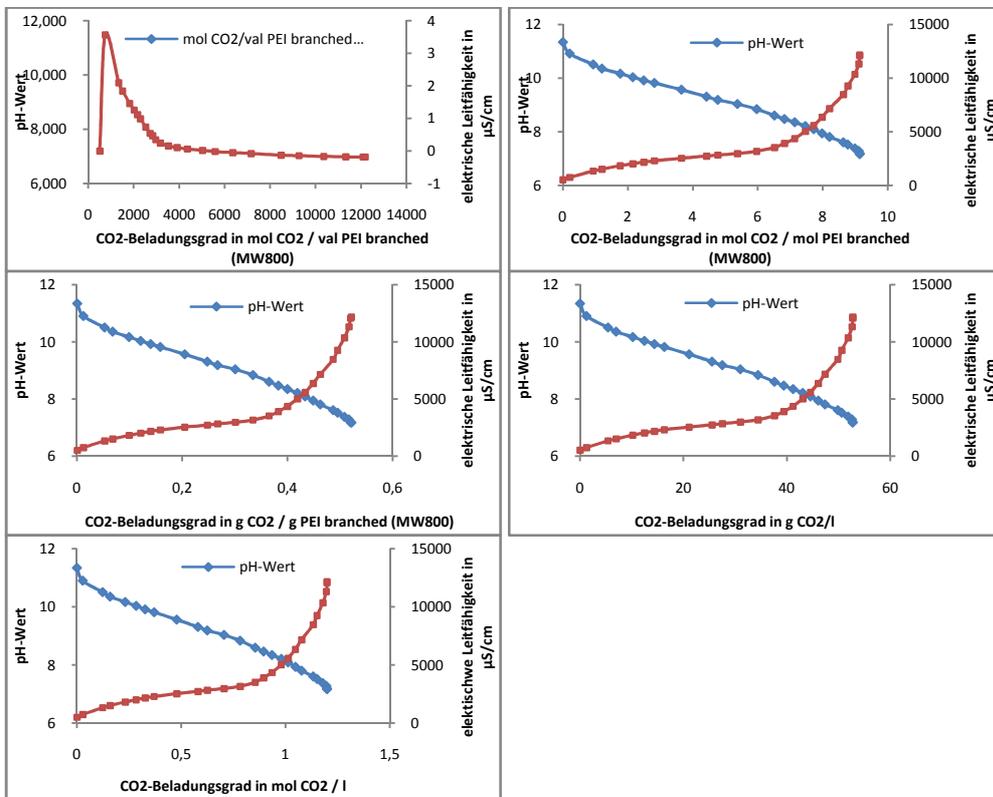


Abbildung 672 Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 11,85%igen PEI800-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Aufnahme

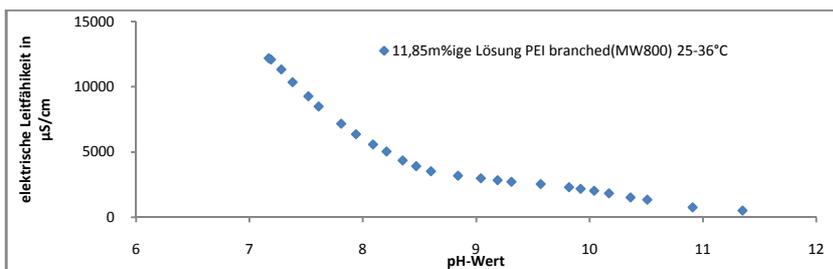


Abbildung 673 Korrelation von pH und elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser bei Raumbedingungen mit CO<sub>2</sub>

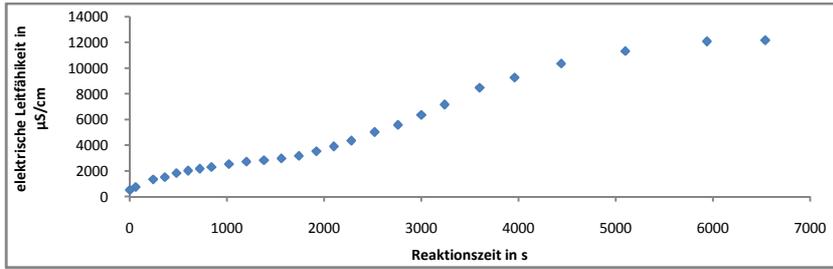


Abbildung 674 Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

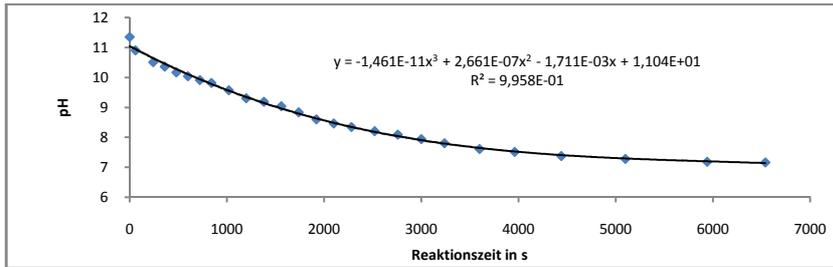


Abbildung 675 Verlauf des pH gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

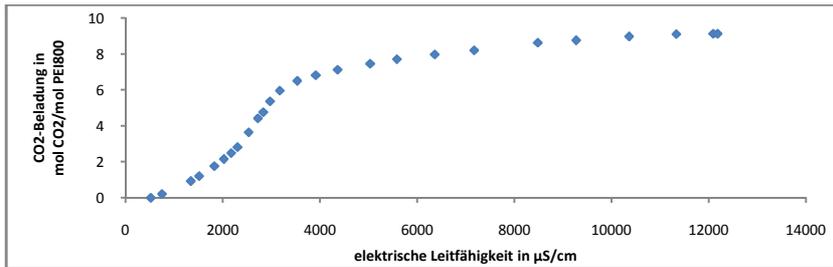


Abbildung 676 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

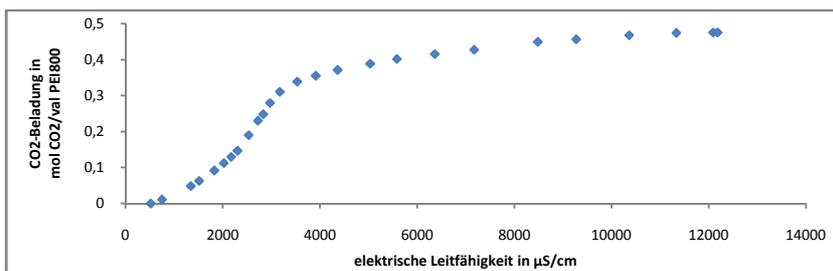


Abbildung 677 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

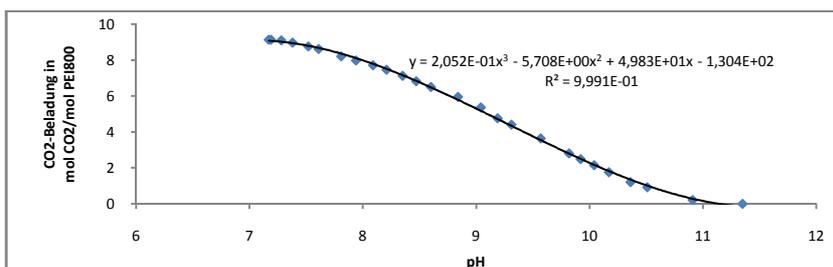


Abbildung 678 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen den pH bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

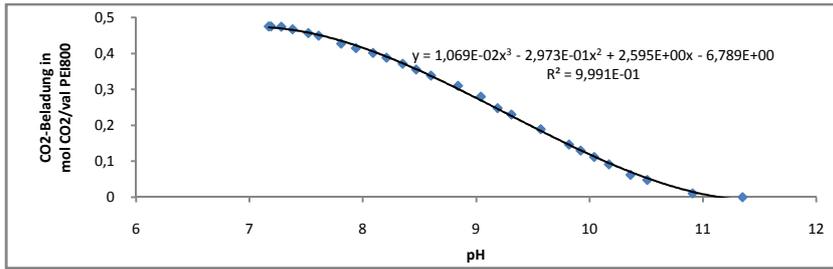


Abbildung 679 Korrelation der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen den pH bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

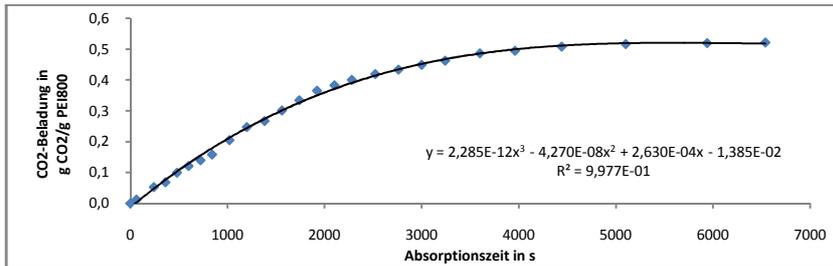


Abbildung 680 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

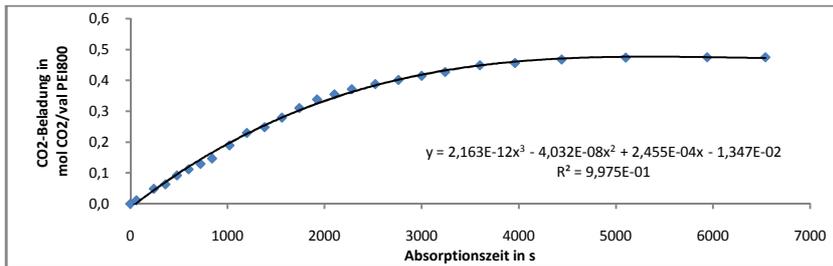


Abbildung 681 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

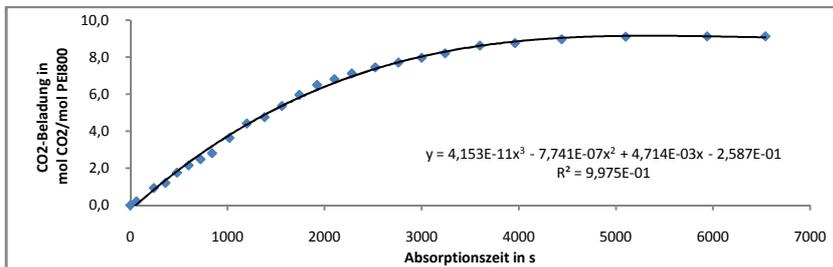


Abbildung 682 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

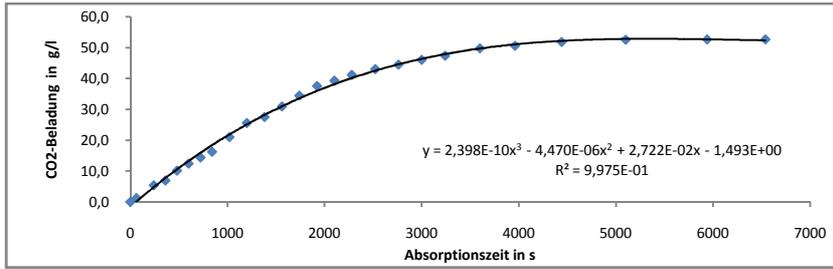


Abbildung 683 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

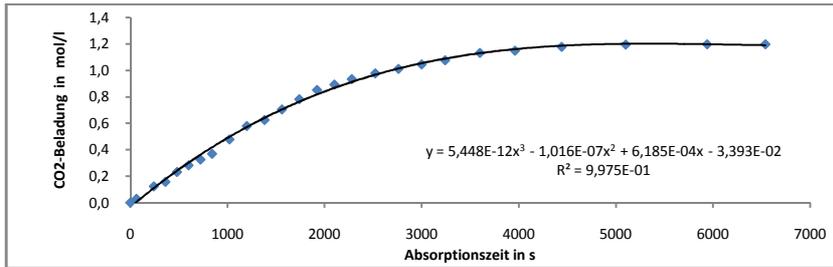


Abbildung 684 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

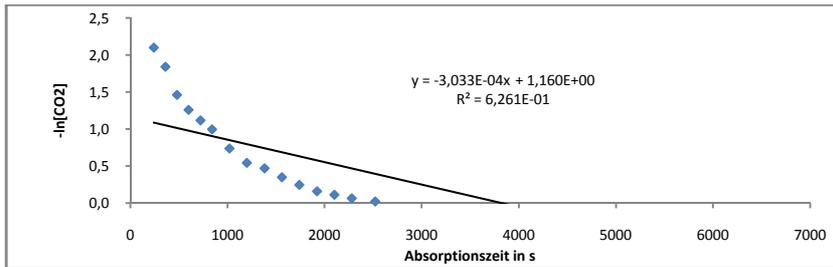


Abbildung 685 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

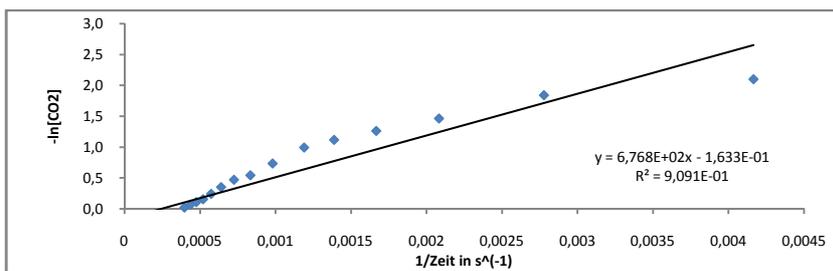


Abbildung 686 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

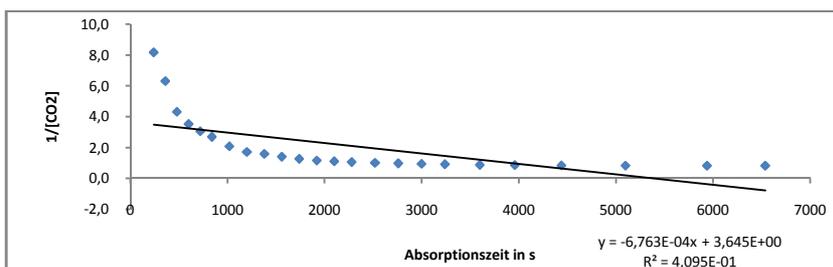


Abbildung 687 Verlauf des Kehrwertes der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

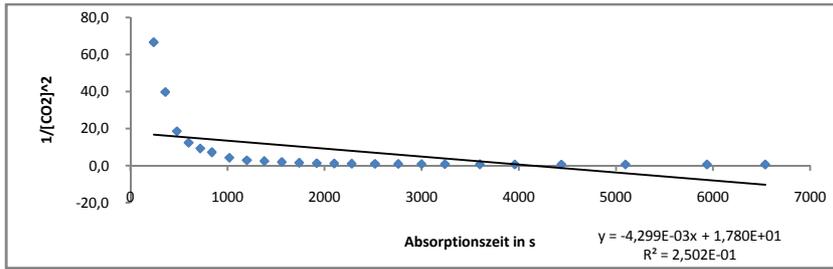


Abbildung 688 Verlauf des Kehrwertes der quadrierten CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

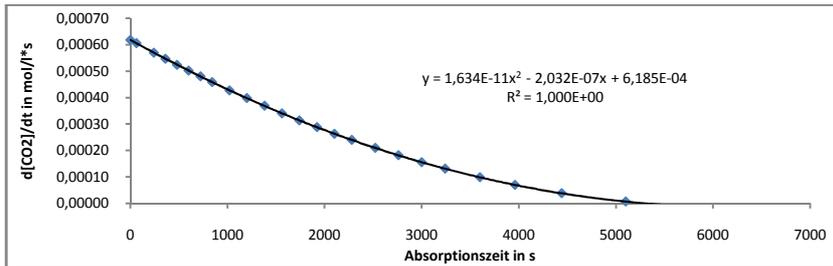


Abbildung 689 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

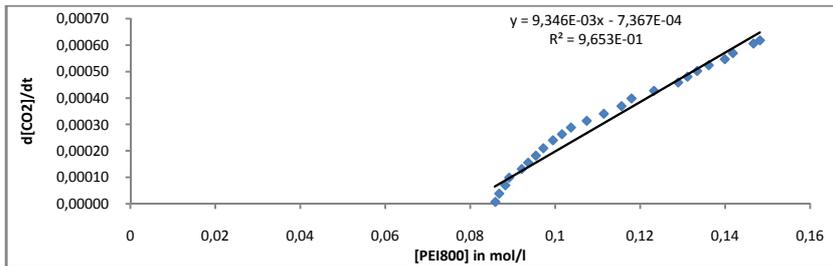


Abbildung 690 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI800 in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

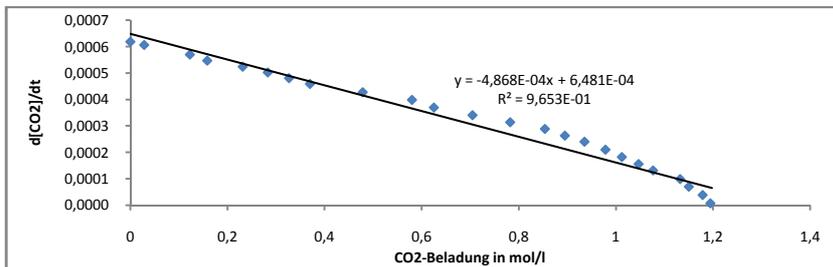


Abbildung 691 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

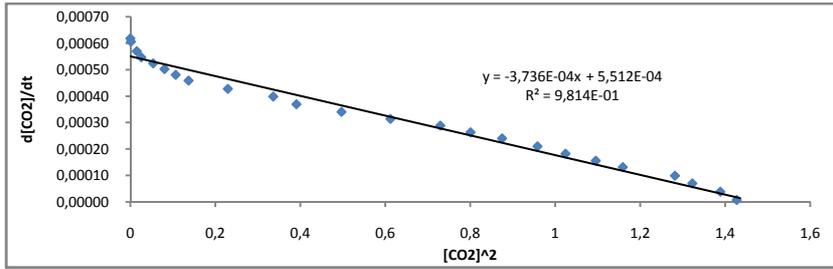


Abbildung 692 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(l*s)$  gegen die quadrierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/l$  bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

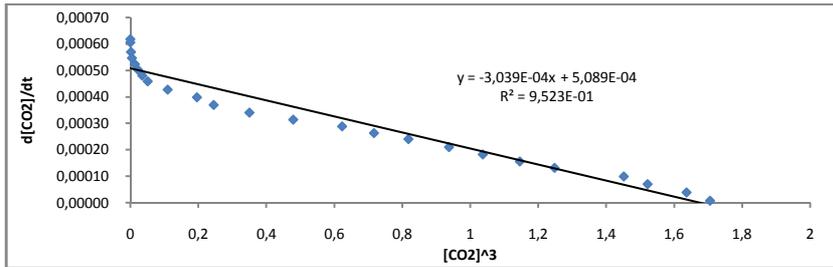


Abbildung 693 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(l*s)$  gegen die kubierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/l$  bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

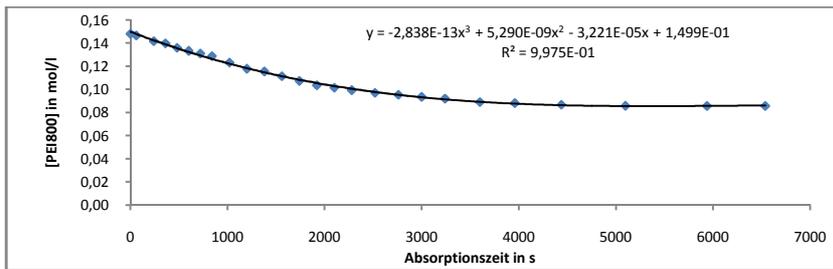


Abbildung 694 Verlauf der Konzentration von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

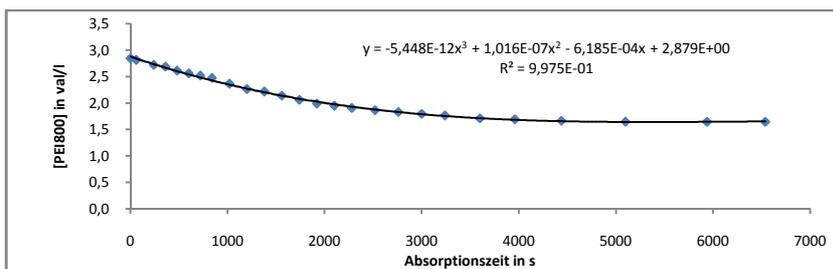


Abbildung 695 Verlauf der Konzentration von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

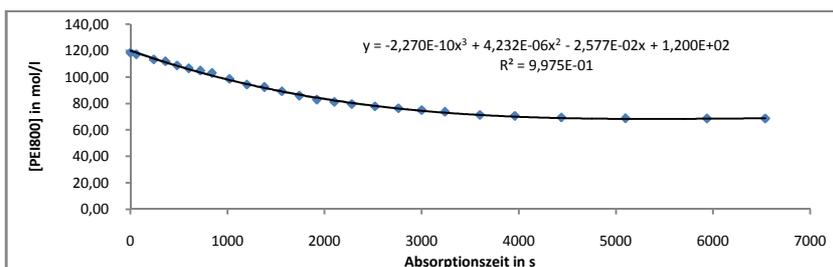


Abbildung 696 Verlauf der Konzentration von PEI800 in g/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

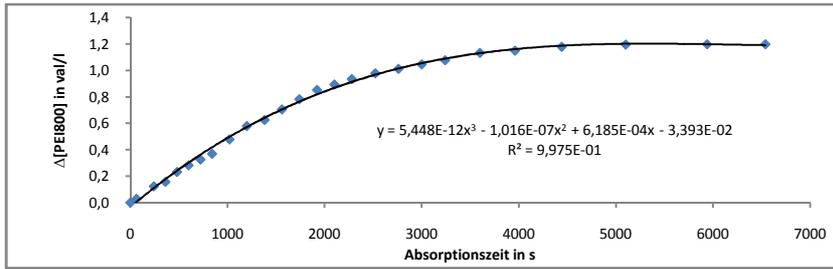


Abbildung 697 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in val/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

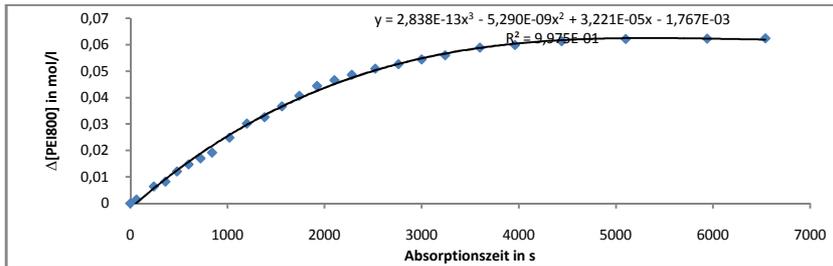


Abbildung 698 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

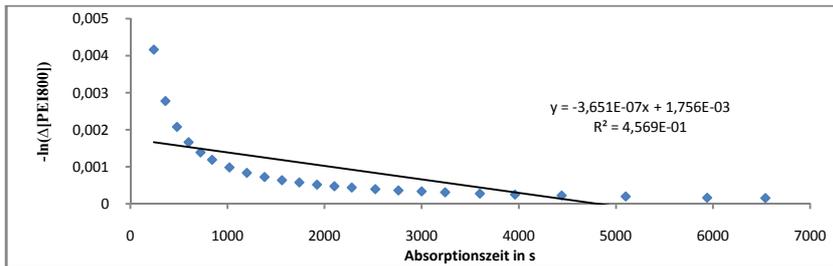


Abbildung 699 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

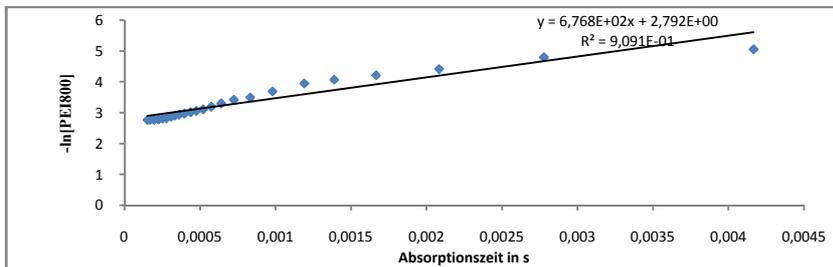


Abbildung 700 Korrelation des neg. natürlichen Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

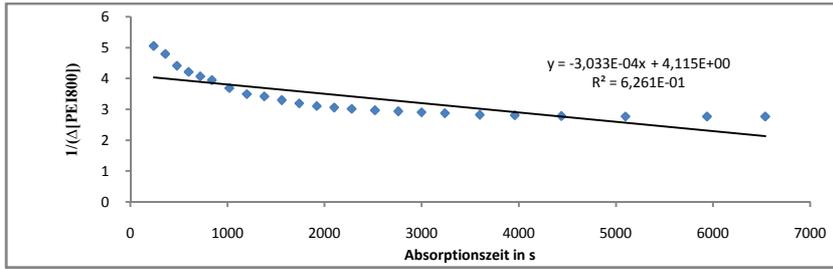


Abbildung 701 Verlauf des Kehrwertes des Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

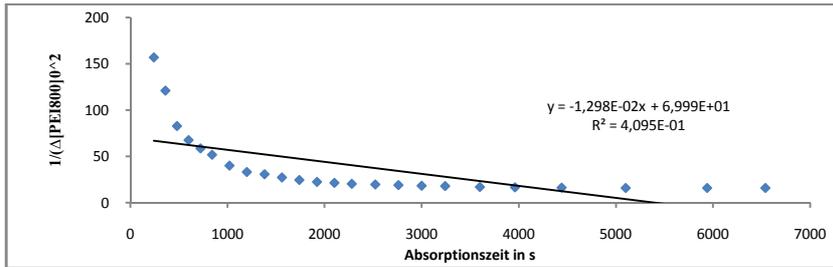


Abbildung 702 Verlauf des Kehrwertes des quadrierten Umsatzes von PEI800 in mol/l gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

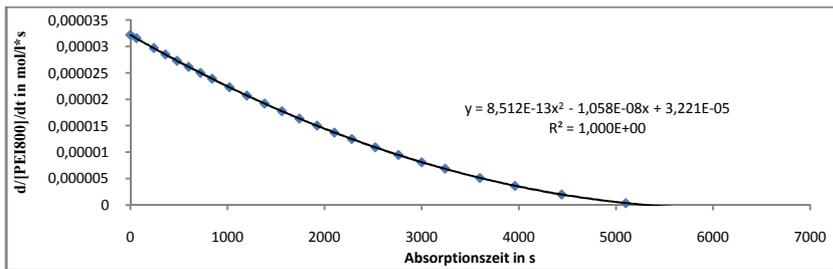


Abbildung 703 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

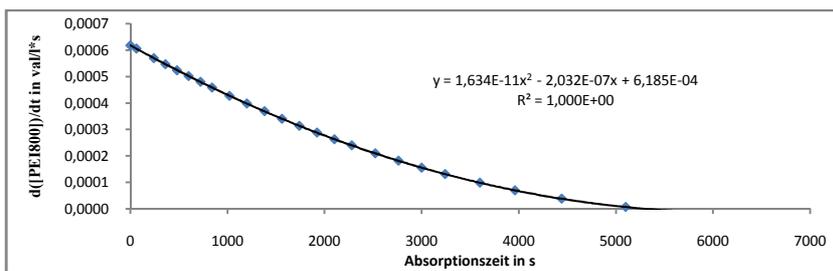


Abbildung 704 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI800/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

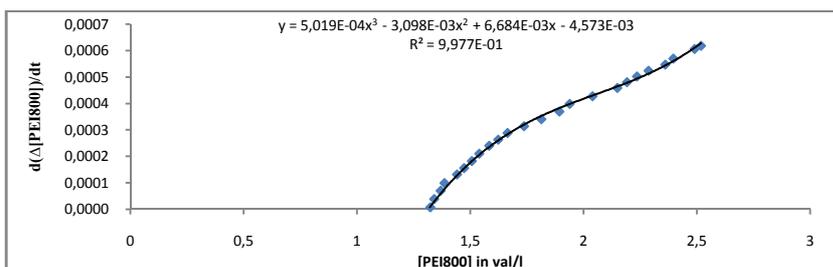


Abbildung 705 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI800/(l\*s) gegen die Konzentration von PEI800 in val/l bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

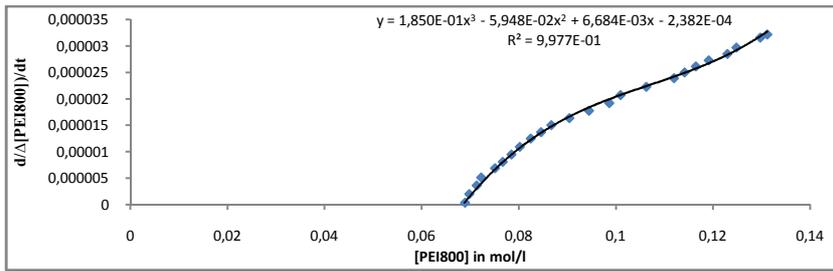


Abbildung 706 Korrelation der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/(l\*s) gegen die Konzentration PEI800 in mol/l bei der Behandlung einer 11,85 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

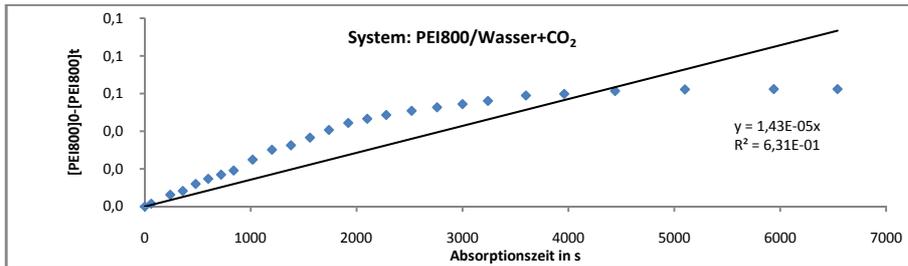


Abb. 707 Arrhenius-Plot 0.ter Ordnung für die Behandlung 11,85 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

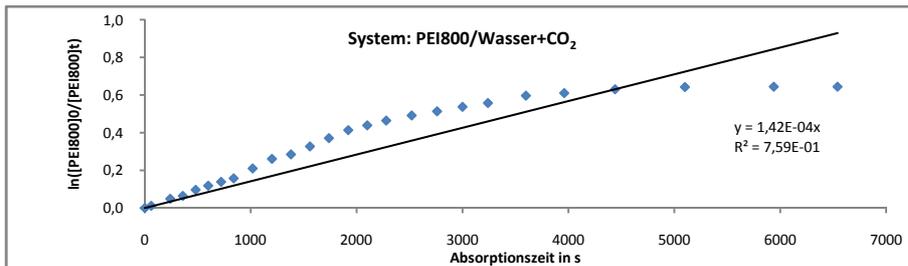


Abb. 708 Arrhenius-Plot 1.ter Ordnung für die Behandlung 11,85 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

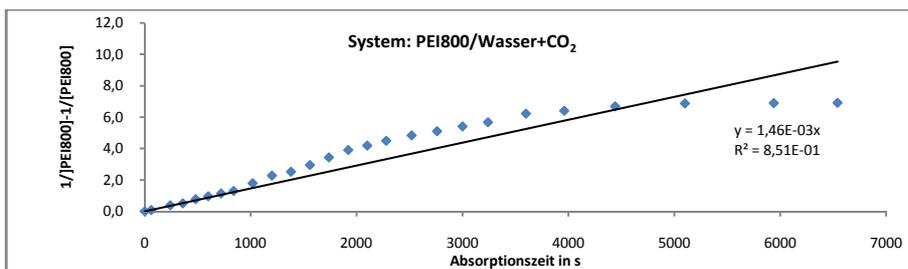


Abb. 709 Arrhenius-Plot 2.ter Ordnung für die Behandlung einer 11,85 m%igen wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

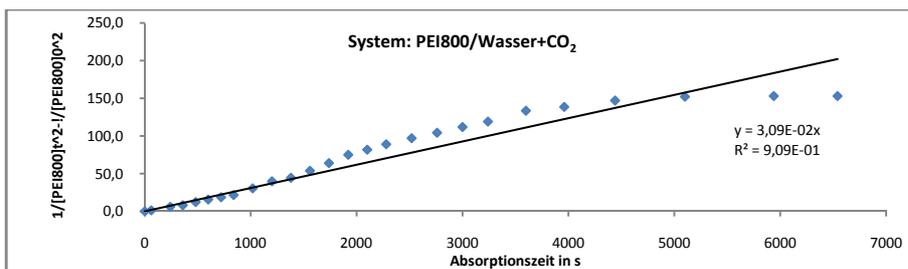


Abb. 710 Arrhenius-Plot 3.ter Ordnung für die Behandlung einer 11,85 m%igen wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

1.19.10 **Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C**

Eine 20 m%ige PEI 800-Lösung in Wasser von pH 12,6 wurde im Gegenstrom-Nasswäscher 900s mit CO<sub>2</sub> unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und und ca. 1bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck bei 5 °C mit starker mechanischer Phasenvermischung behandelt. Bei einer Absorptionstemperatur von 5 °C stellte sich nach 900 s Absorptionszeit ein pH von 8,3 ein.

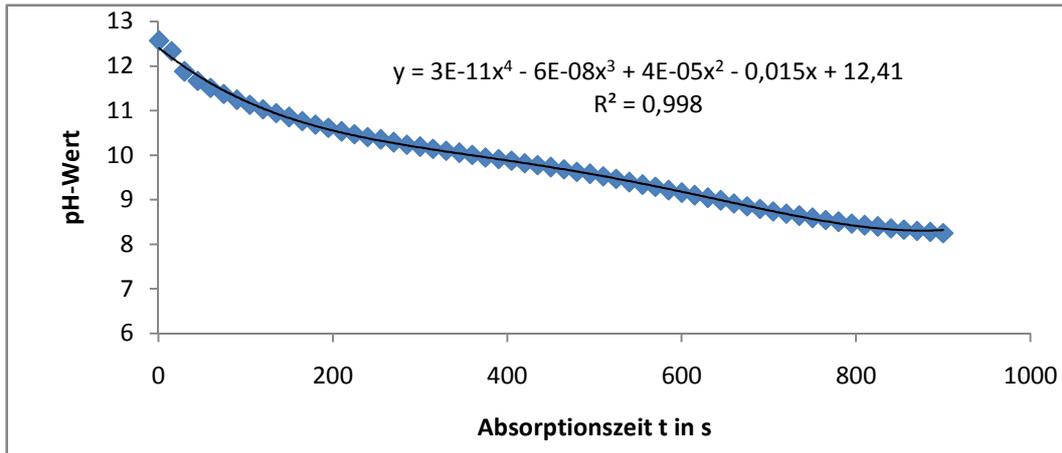


Abbildung 711 Verlauf des pH gegen die Absorptionszeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C

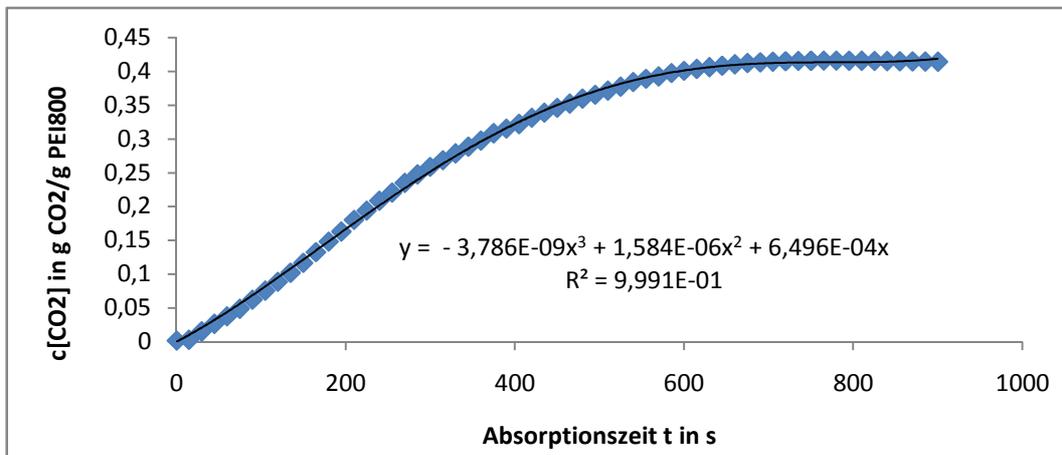


Abbildung 712 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in g CO<sub>2</sub>/g PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C

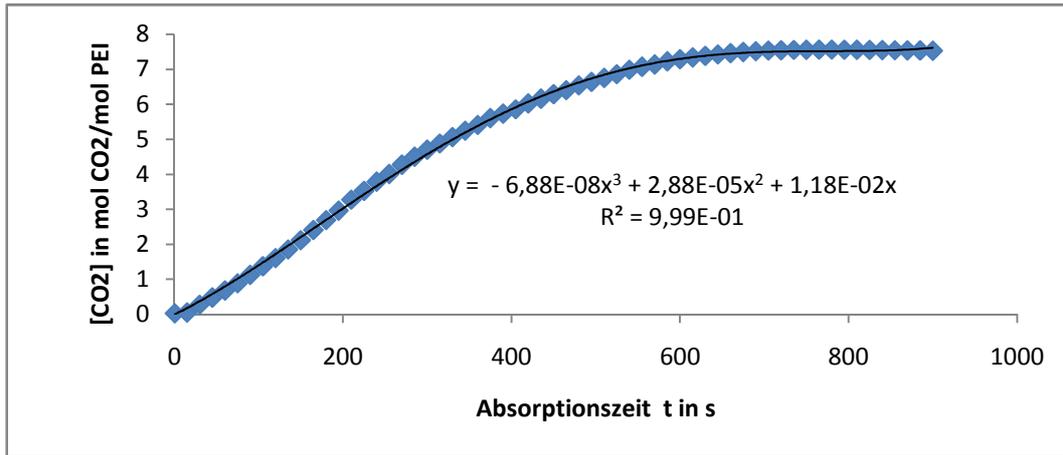


Abbildung 713 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C

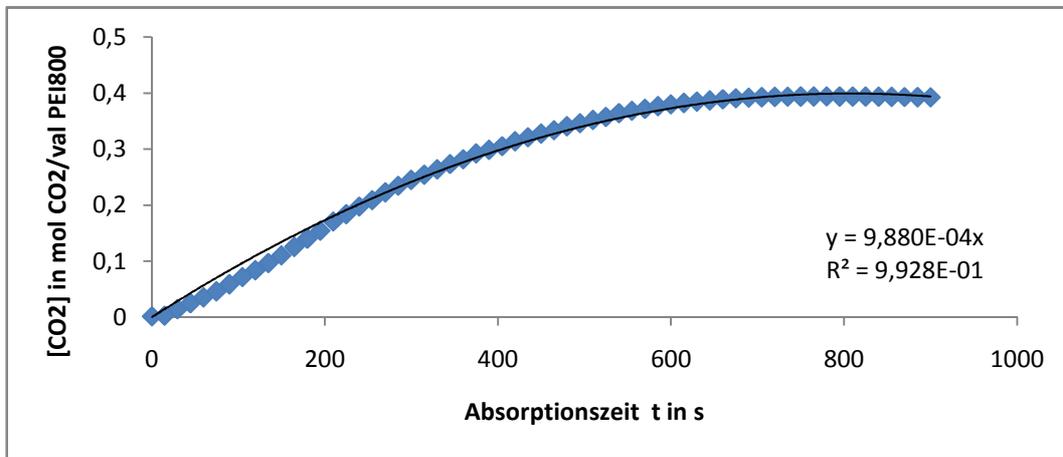


Abbildung 714 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/val PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C

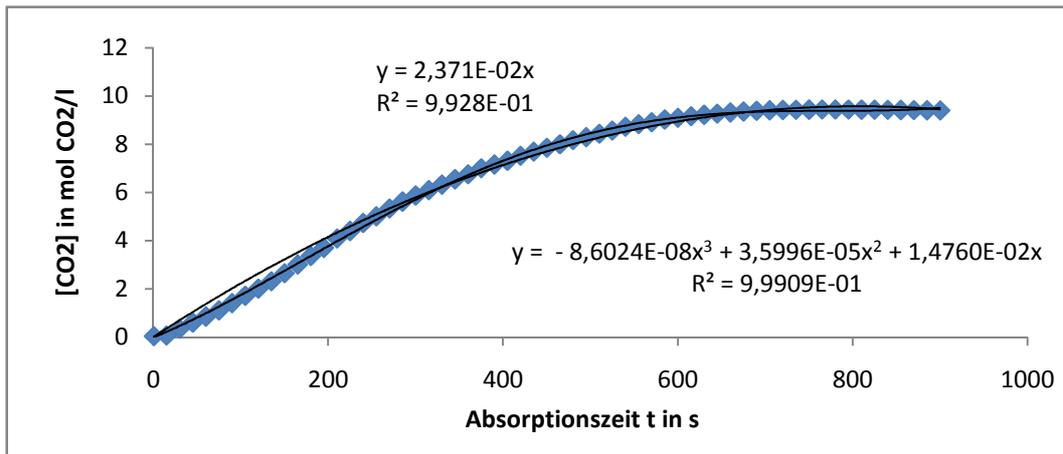


Abbildung 715 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/l Waschlösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 5 °C

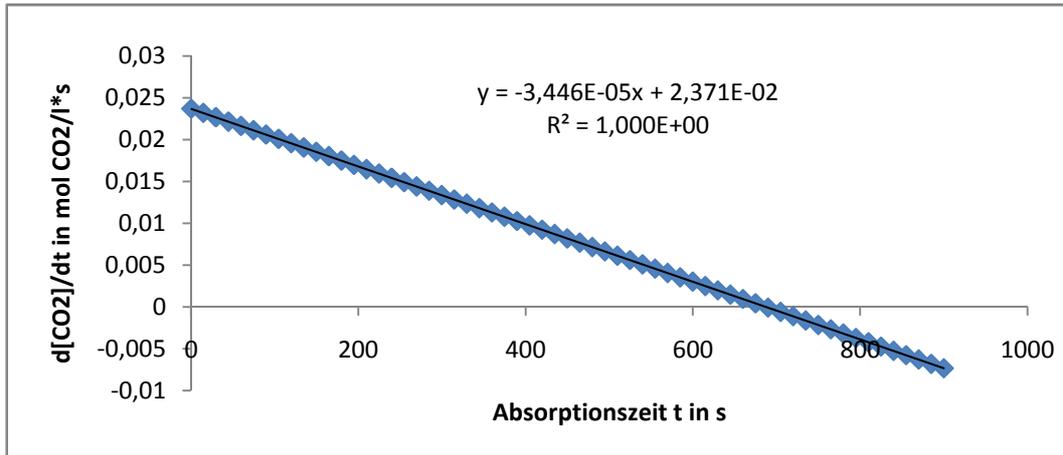


Abbildung 716 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit  $d[\text{CO}_2]/dt$  in mol  $\text{CO}_2/\text{l}\cdot\text{s}$  gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $5^\circ\text{C}$

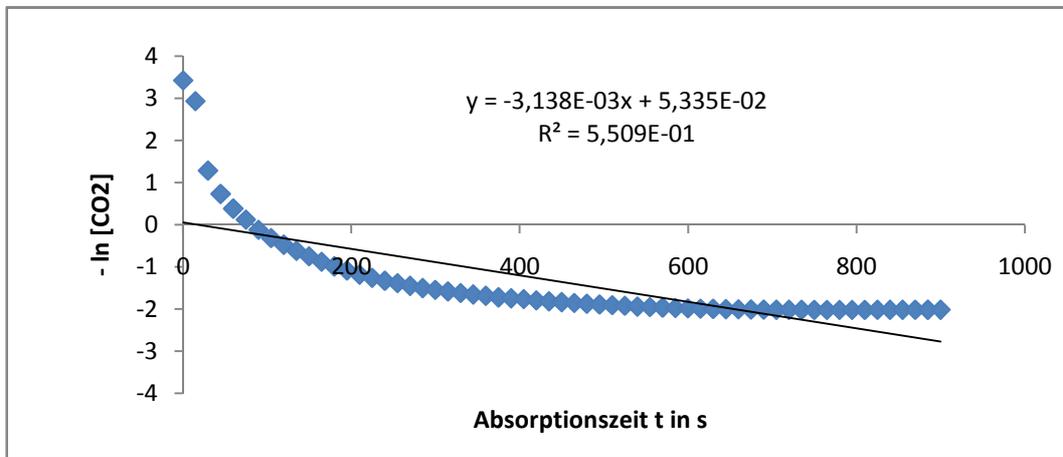


Abbildung 717 Auftragung  $-\ln[\text{CO}_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $5^\circ\text{C}$

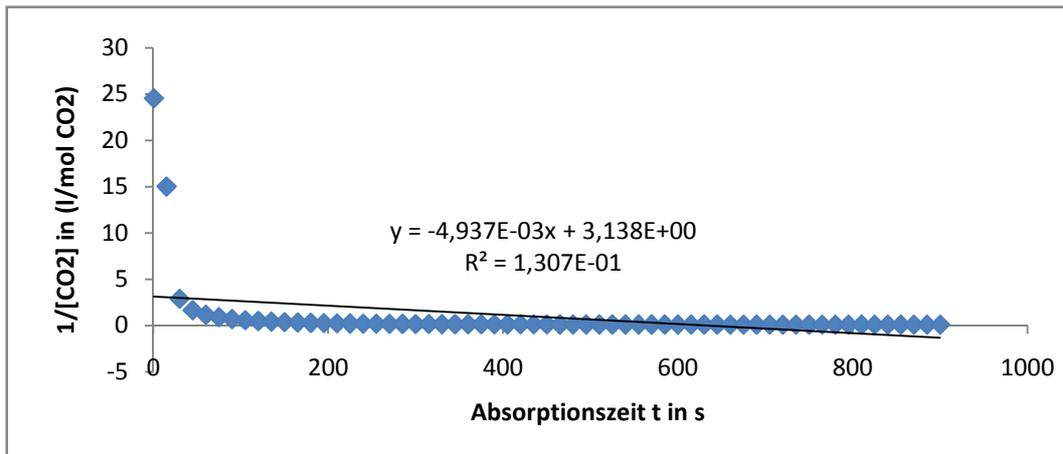


Abbildung 718 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]$  in mol PEI/mol  $\text{CO}_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $5^\circ\text{C}$

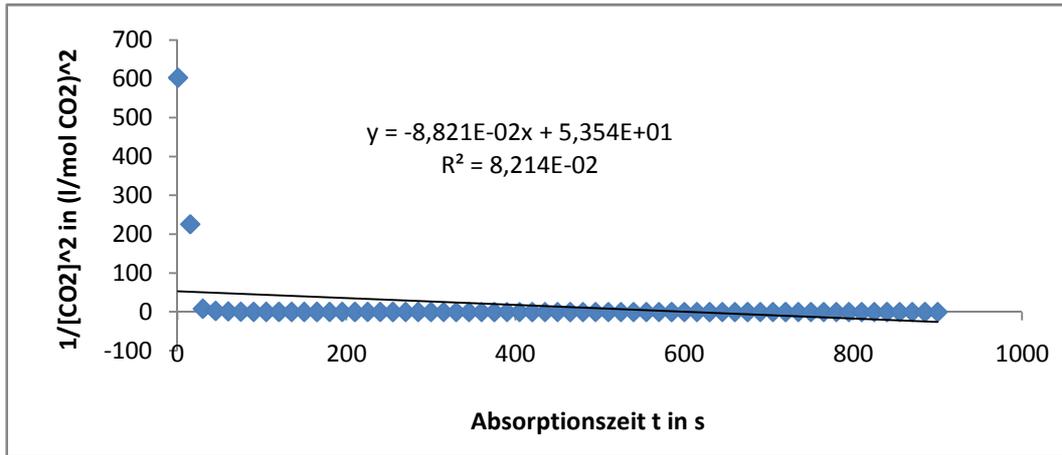


Abbildung 719 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]^2$  in mol PEI/mol  $\text{CO}_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 3.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $5\text{ }^\circ\text{C}$

### 1.19.11 Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit $\text{CO}_2$ bei $10\text{ }^\circ\text{C}$

Eine 20 m%ige PEI 800-Lösung in Wasser von pH 12,5 wurde im Gegenstrom-Nasswäscher 900s mit  $\text{CO}_2$  unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und und ca. 1bar  $\text{CO}_2$ -Dampfdruck bei  $10\text{ }^\circ\text{C}$  mit starker mechanischer Konvektion behandelt. Bei einer Absorptionstemperatur von  $10\text{ }^\circ\text{C}$  stellte sich nach 900 s Absorptionszeit ein pH von 8,1 ein.

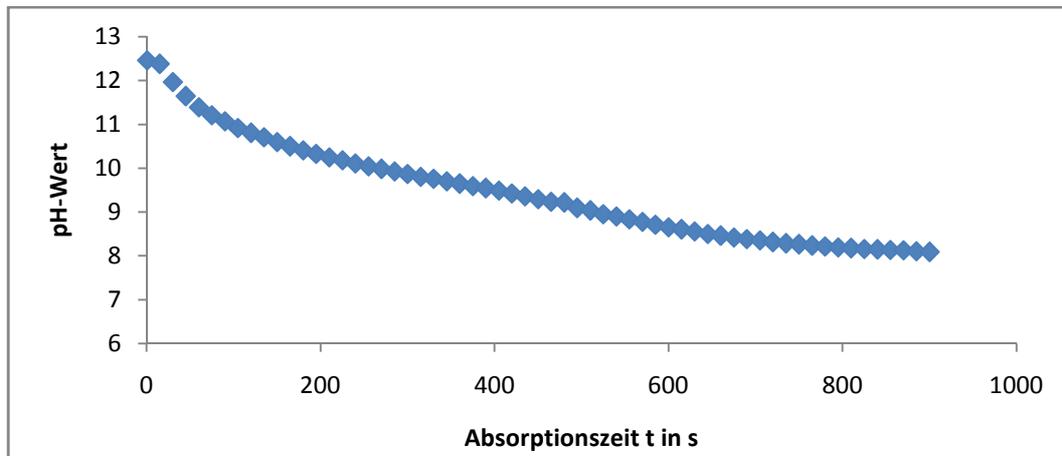


Abbildung 720 Verlauf des pH gegen die Absorptionszeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $10\text{ }^\circ\text{C}$  von

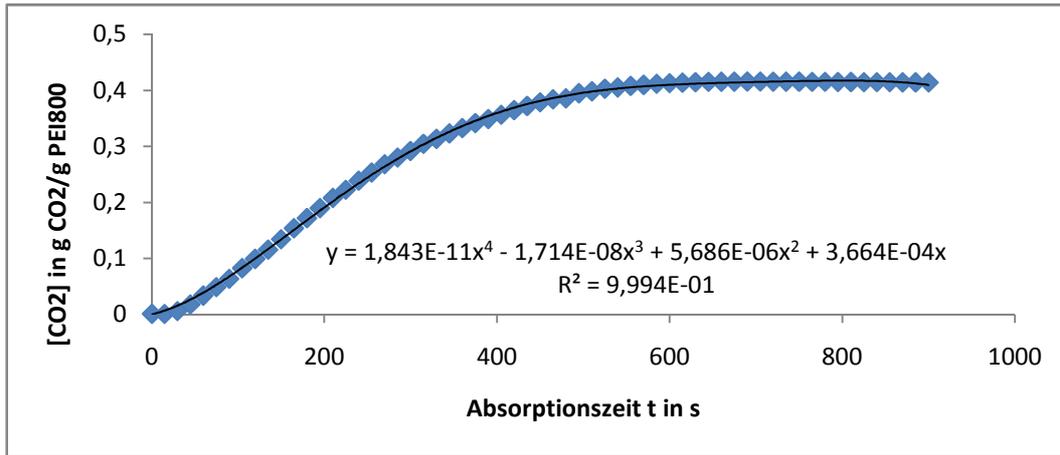


Abbildung 721 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C

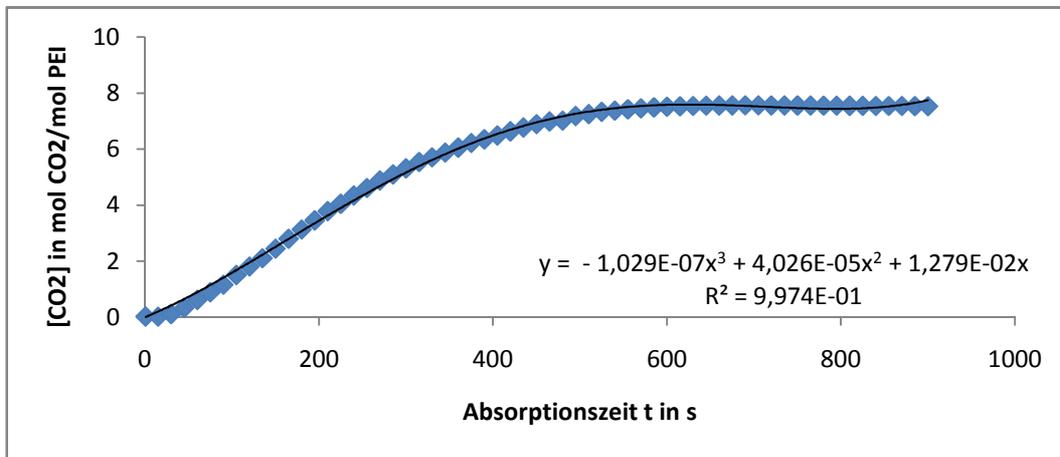


Abbildung 722 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C

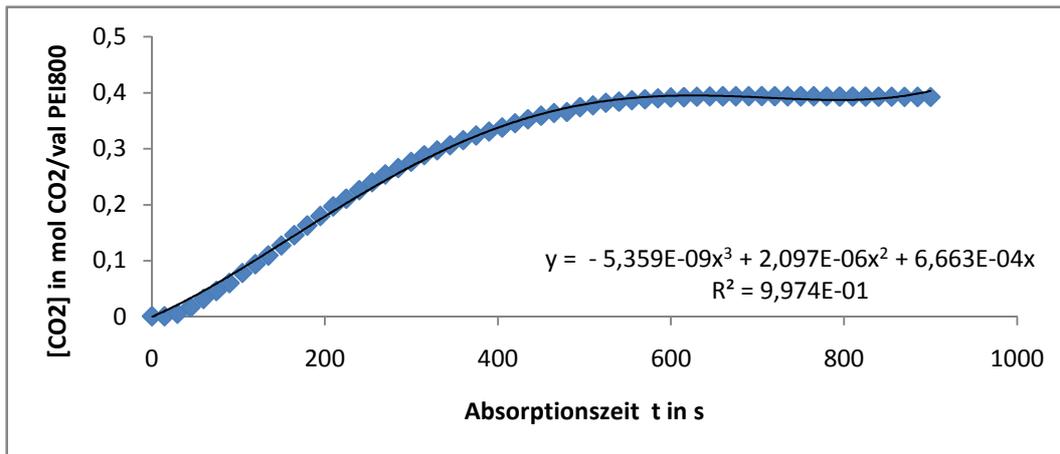


Abbildung 723 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C

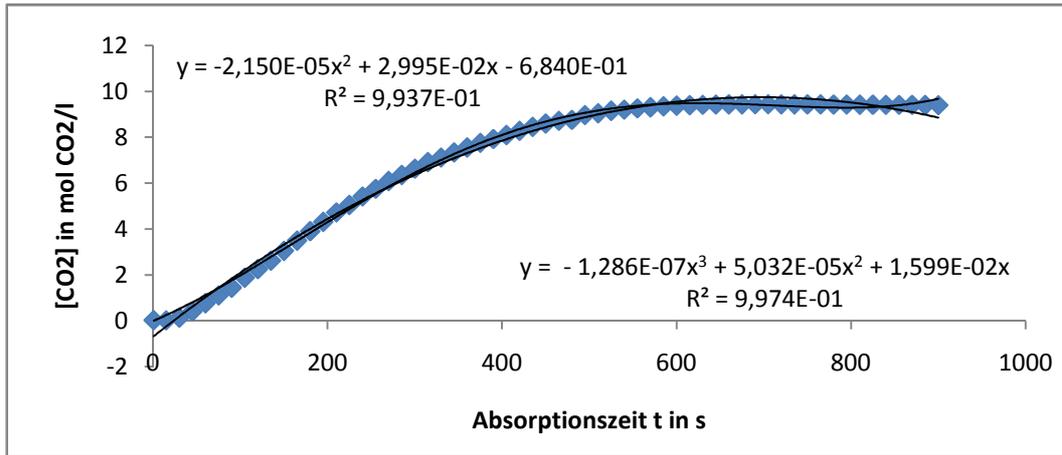


Abbildung 724 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/l Waschlösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

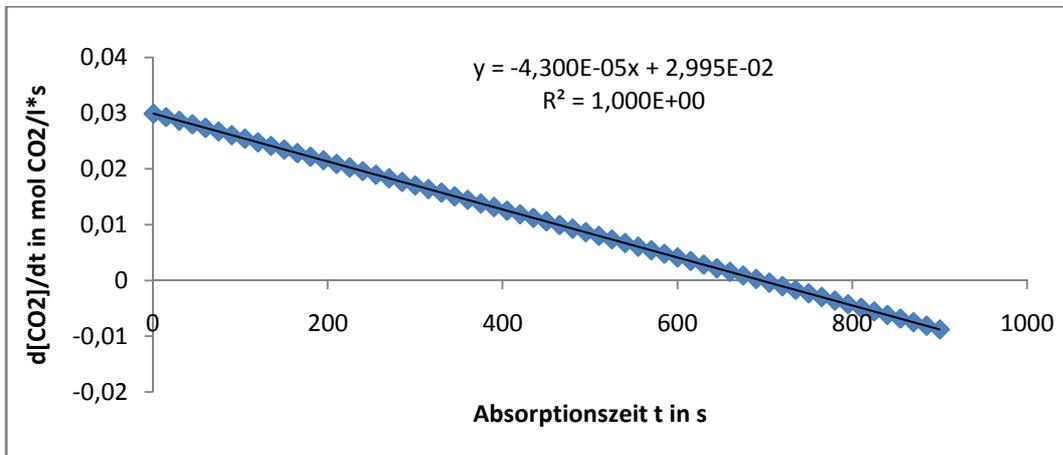


Abbildung 725 Auftragung Reaktionsgeschwindigkeit  $d[CO_2]/dt$  in mol/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C

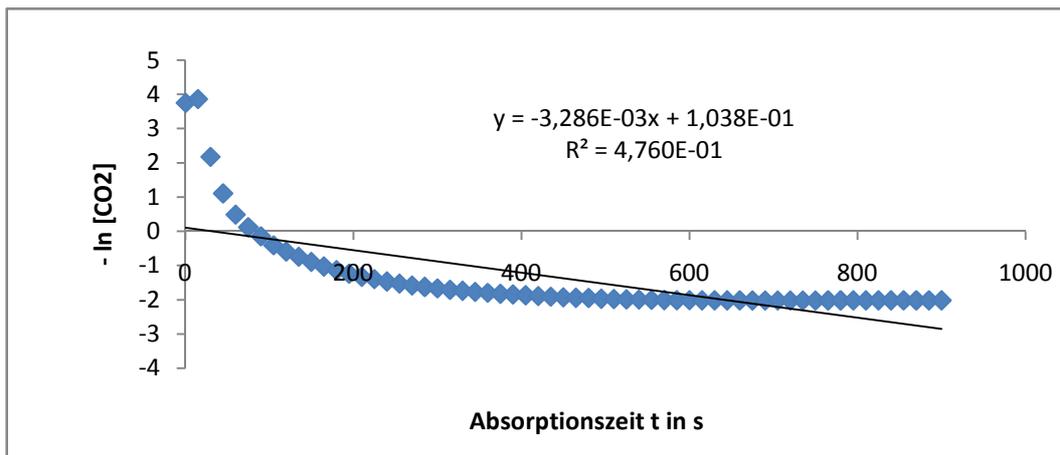


Abbildung 726 Auftragung  $-\ln[CO_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 10 °C

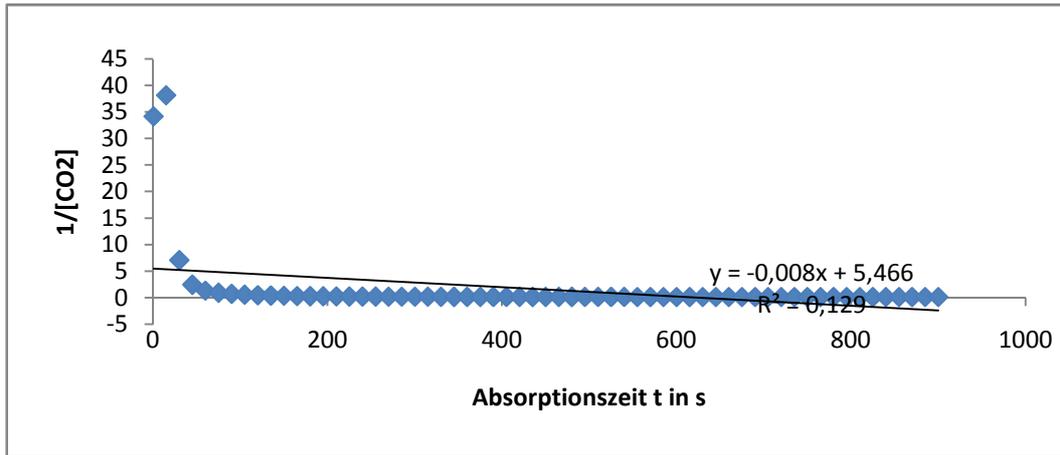


Abbildung 727 Auftragung  $1/[CO_2]$  in l Waschflüssigkeit/mol  $CO_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$  bei 10 °C

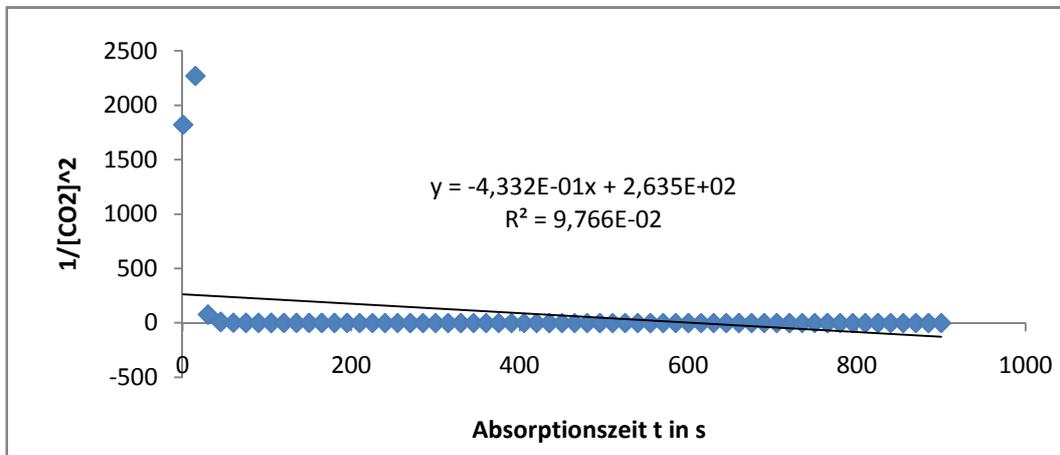


Abbildung 728 Auftragung  $1/[CO_2]^2$  in l Waschflüssigkeit/mol  $CO_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 3.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$  bei 10 °C

### 1.19.12 Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit $CO_2$ bei 20 °C

Eine 20 m%ige PEI 800-Lösung in Wasser von pH 12,3 wurde im Gegenstrom-Nasswäscher 900s mit  $CO_2$  unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und und ca. 1bar  $CO_2$ -Dampfdruck bei 20 °C mit starker mechanischer Konvektion behandelt. Bei einer Absorptionstemperatur von 20 °C stellte sich nach 900 s Absorptionszeit ein pH von 7,9 ein.

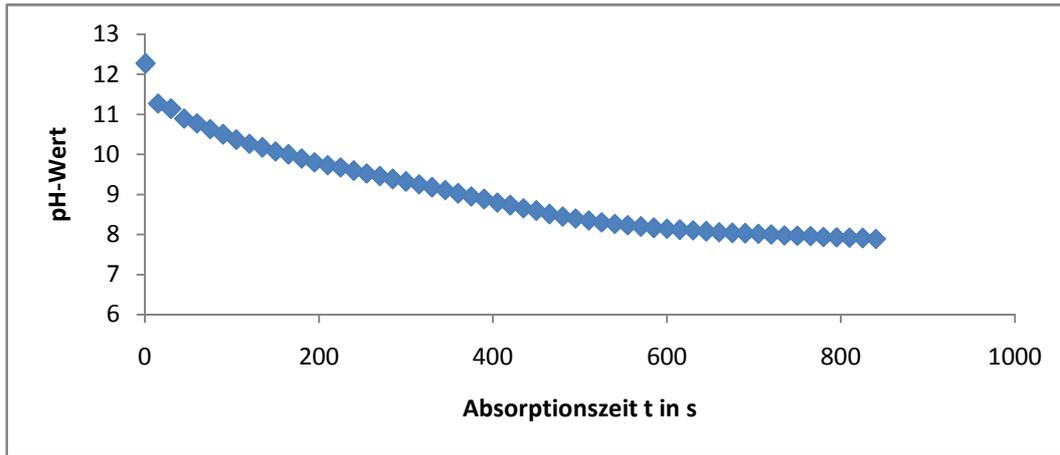


Abbildung 729 Verlauf des pH gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

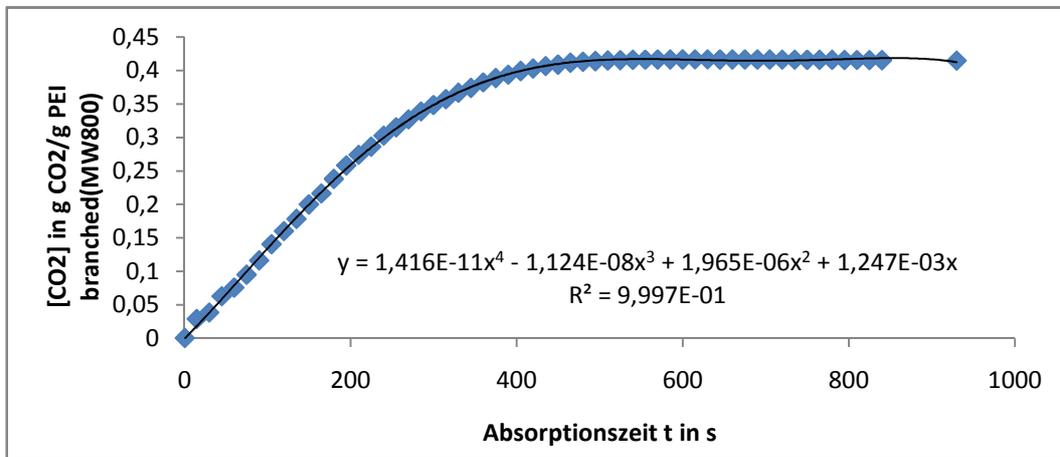


Abbildung 730 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in g CO<sub>2</sub>/g PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

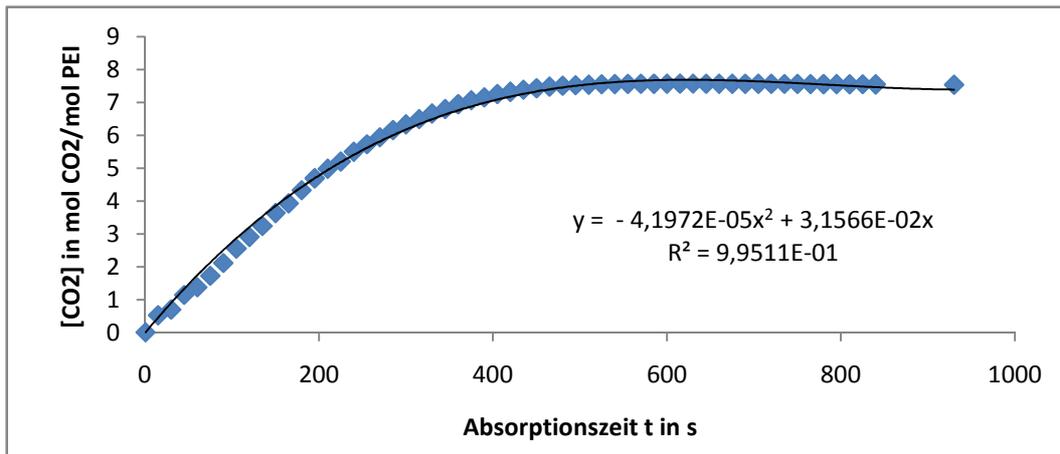


Abbildung 731 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

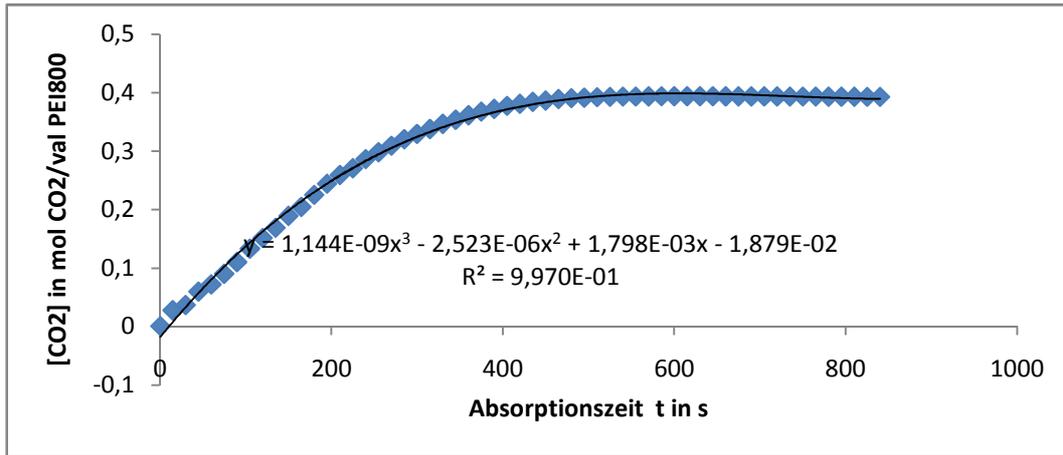


Abbildung 732 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/val PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

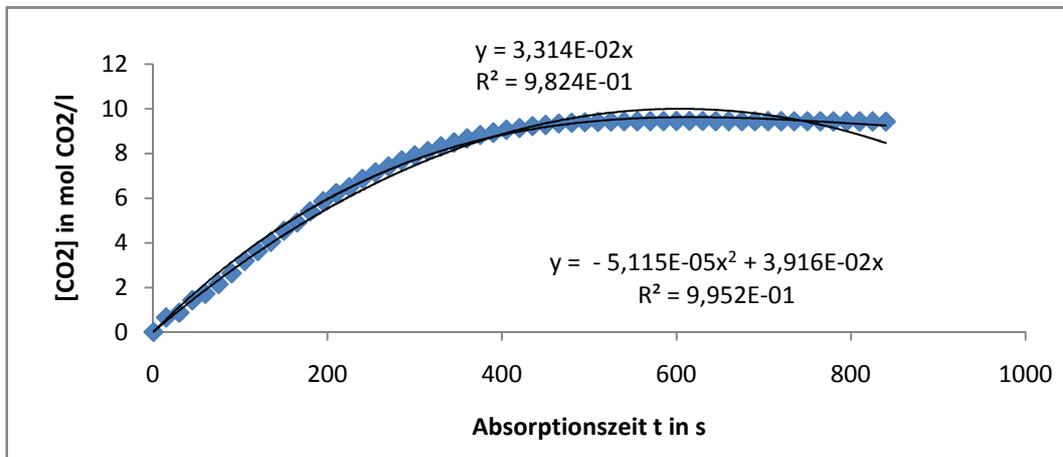


Abbildung 733 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/l Washlösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

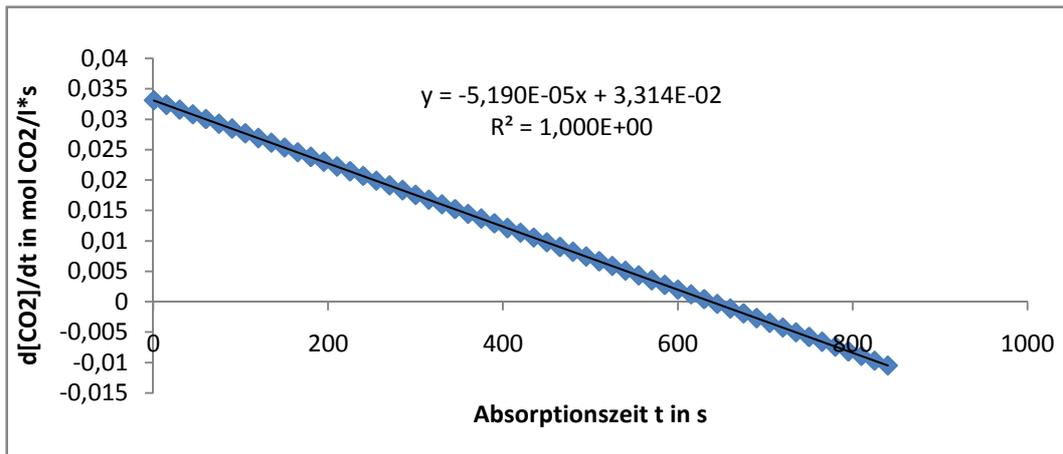


Abbildung 734 Auftragung Reaktionsgeschwindigkeit  $d[CO_2]/dt$  in mol CO<sub>2</sub>/(s\*l) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C

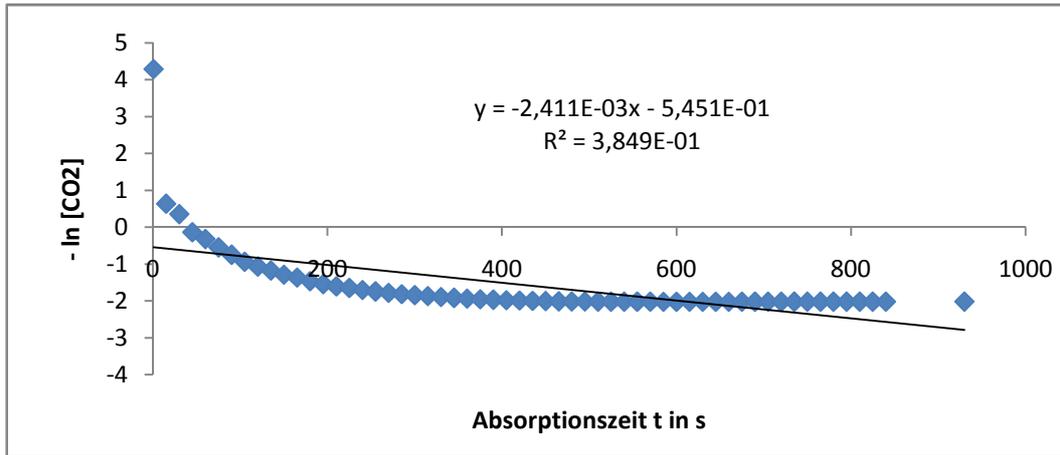


Abbildung 735 Auftragung  $-\ln[\text{CO}_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $20^\circ\text{C}$

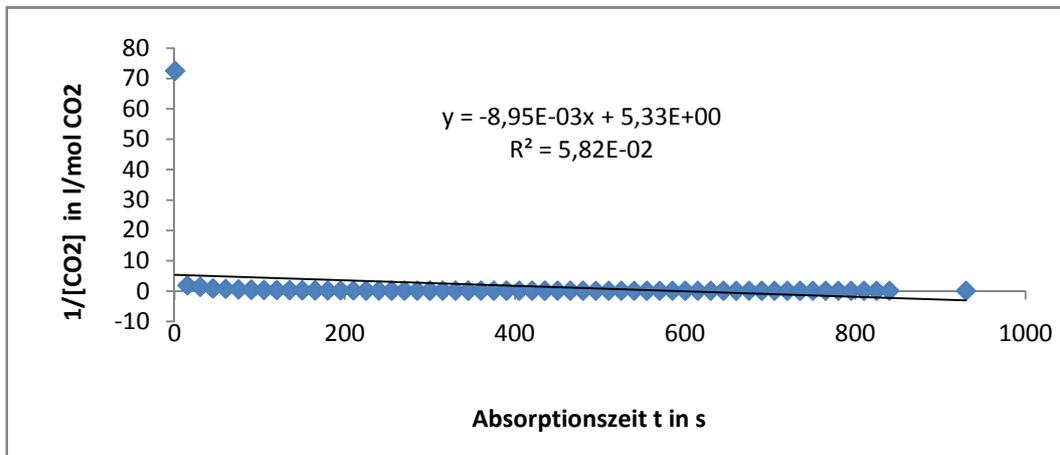


Abbildung 736 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]$  in  $\text{l/mol CO}_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $20^\circ\text{C}$

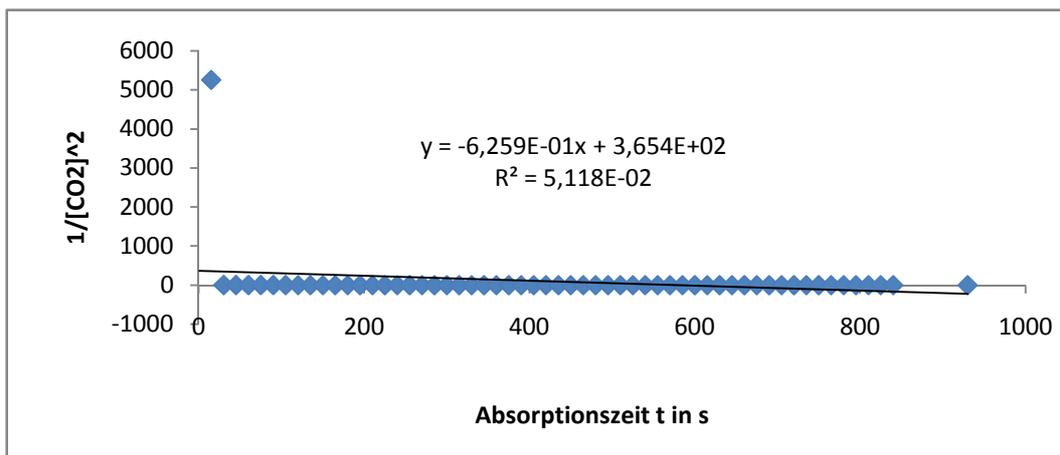


Abbildung 737 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]^2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 3.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $20^\circ\text{C}$

### 1.19.13 Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit $\text{CO}_2$ bei $50^\circ\text{C}$

Eine 20 m%ige PEI 800-Lösung in Wasser von pH 11,6 wurde im Gegenstrom-Nasswäscher 900s mit  $\text{CO}_2$  unter isobaren Bedingungen bei Raumdruck und und ca. 1bar  $\text{CO}_2$ -Dampfdruck

bei 50 °C mit starker mechanischer Konvektion behandelt. Bei einer Absorptionstemperatur von 50 °C stellte sich nach 900 s Absorptionszeit ein pH von 7,7 ein.

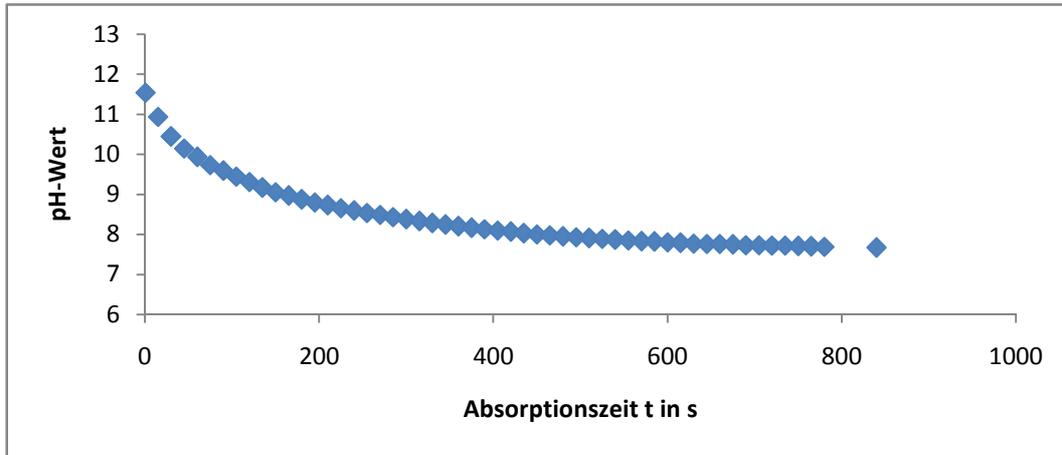


Abbildung 738 Verlauf des pH gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C

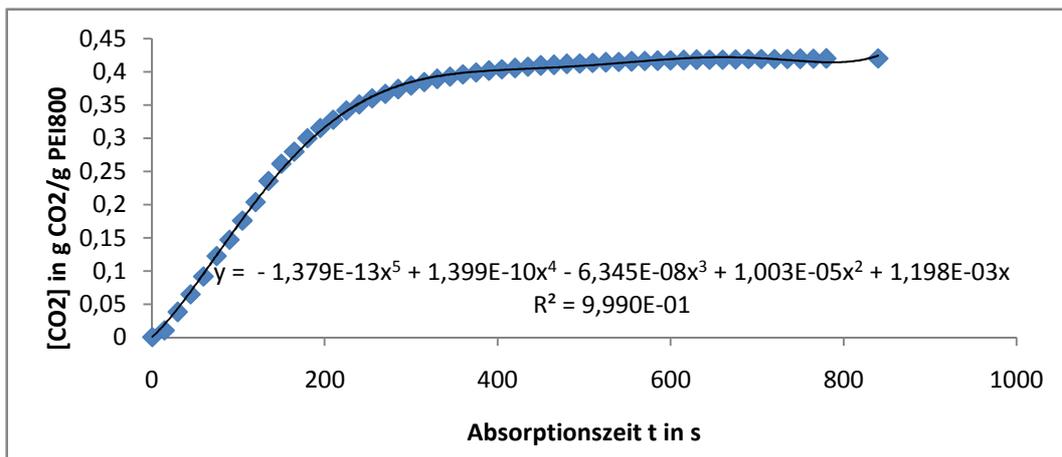


Abbildung 739 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in g CO<sub>2</sub>/g PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C für eine Reaktionszeit von 900s

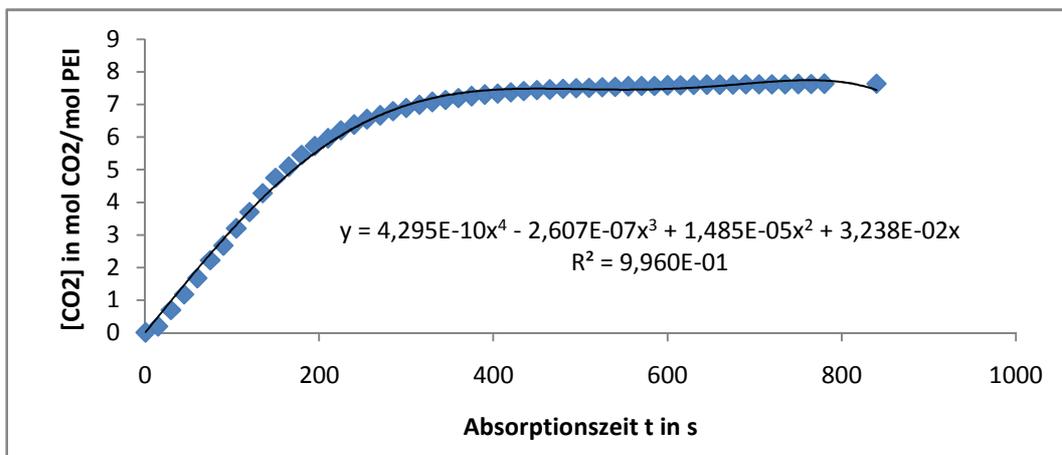


Abbildung 740 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C

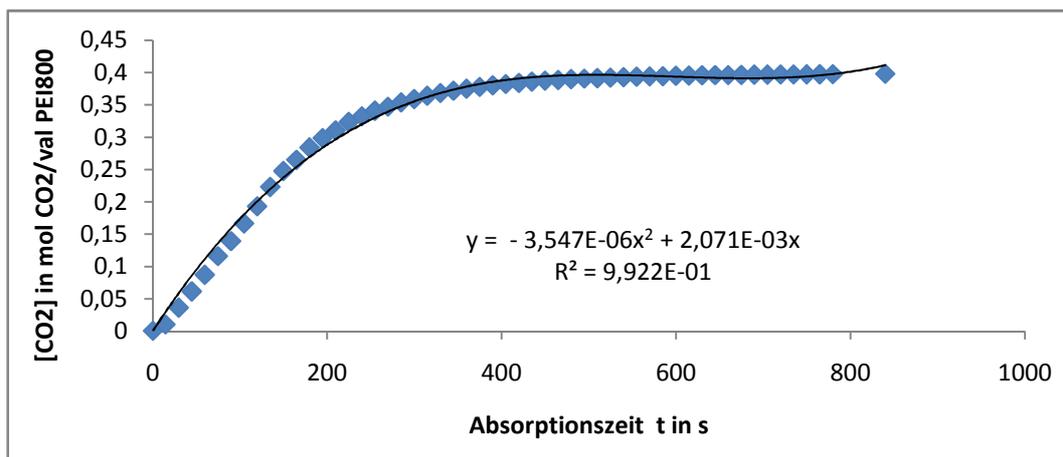


Abbildung 741 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/val PEI gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C

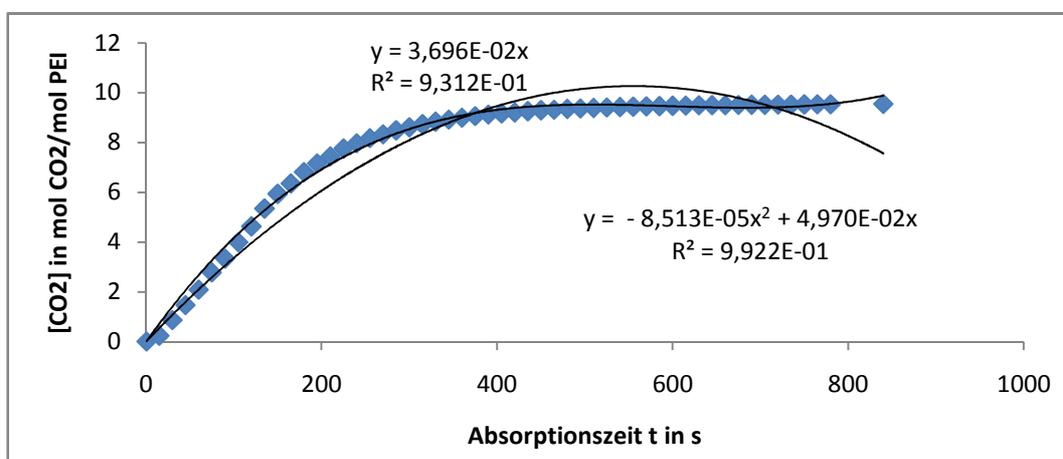


Abbildung 742 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/l Waschlösung gegen die Absorptionzeit bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C

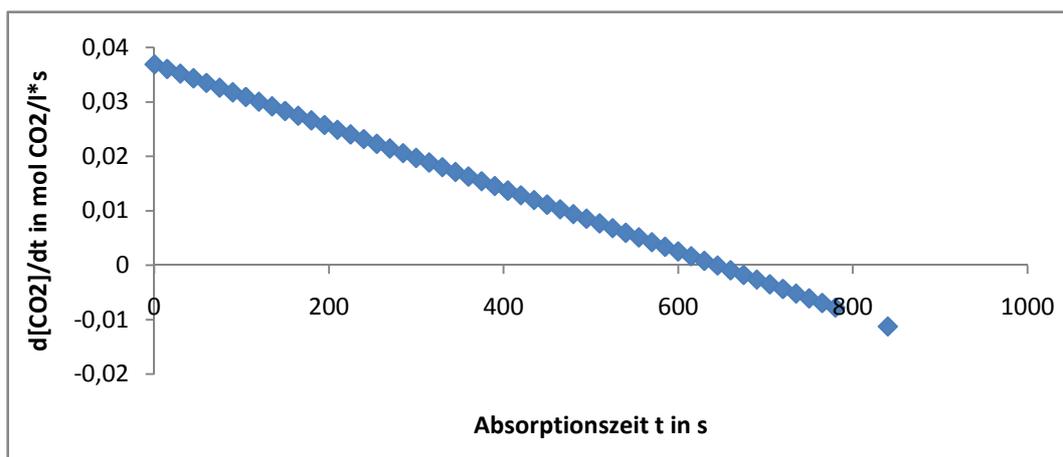


Abbildung 743 Auftragung Reaktionsgeschwindigkeit  $d[CO_2]/dt$  in mol CO<sub>2</sub>/(s\*l Waschlösung) bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei 50 °C

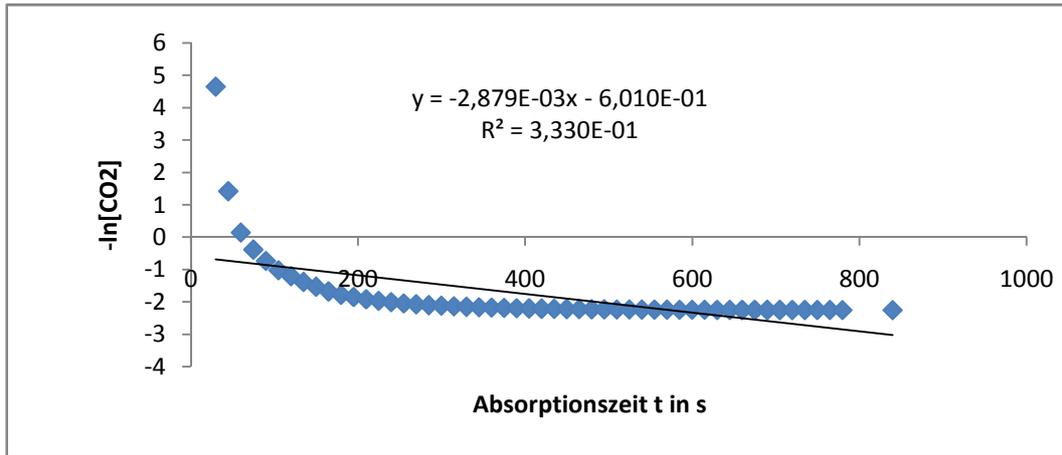


Abbildung 744 Auftragung  $-\ln[\text{CO}_2]$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 1.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $50^\circ\text{C}$

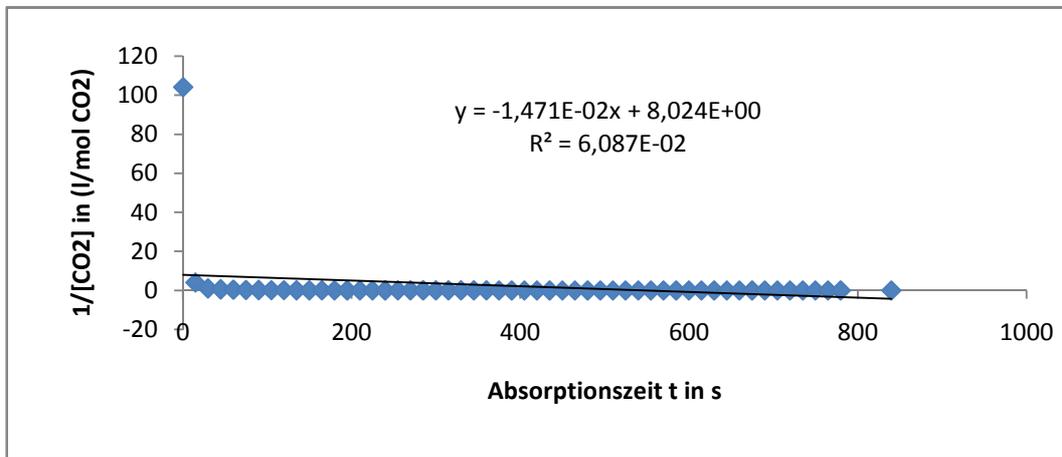


Abbildung 745 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]$  in  $\text{l Waschlösung/mol CO}_2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $50^\circ\text{C}$

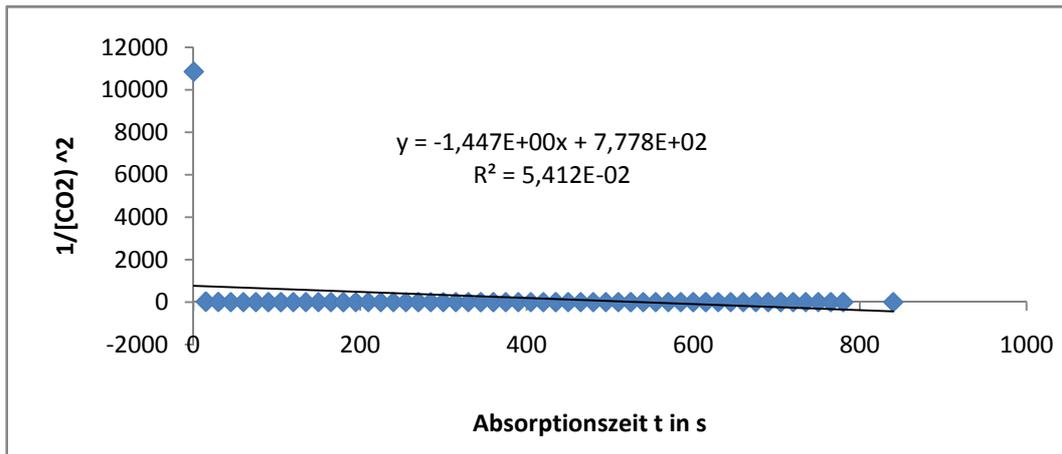


Abbildung 746 Auftragung  $1/[\text{CO}_2]^2$  gegen die Absorptionszeit für ein Geschwindigkeitsgesetz 2.Ordnung bei der Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  bei  $50^\circ\text{C}$

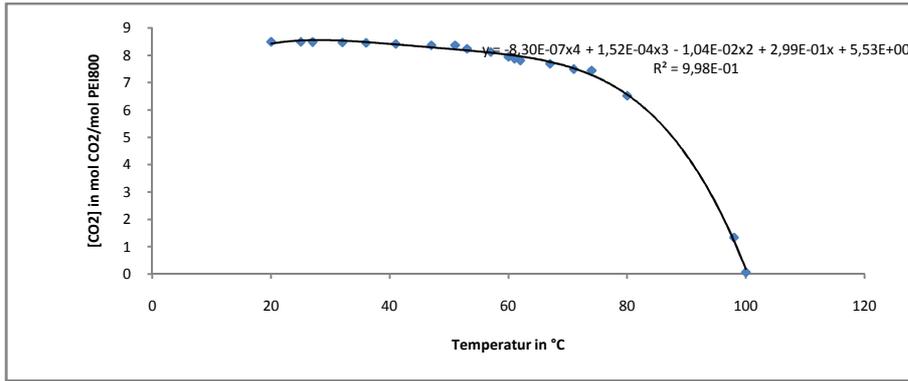


Abb. 747 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

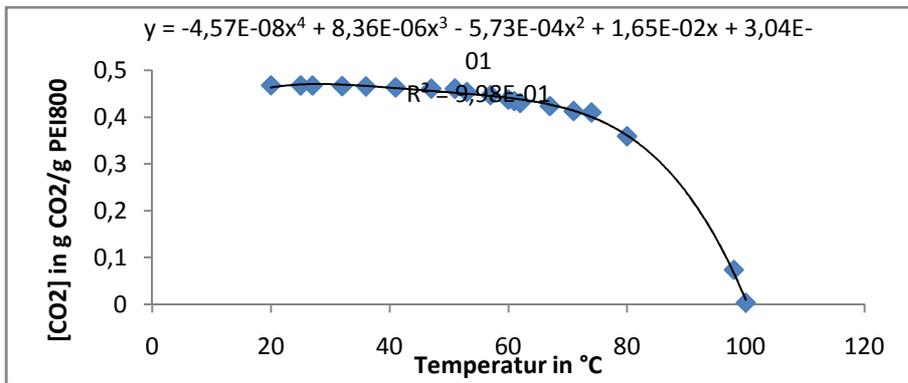


Abbildung 748 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

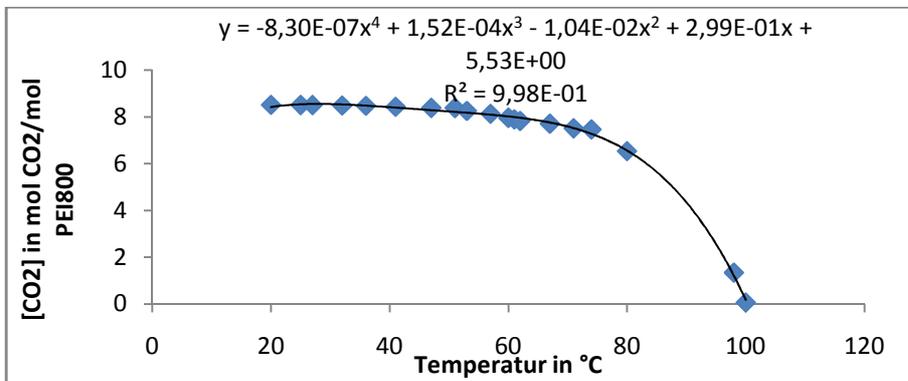


Abbildung 749 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

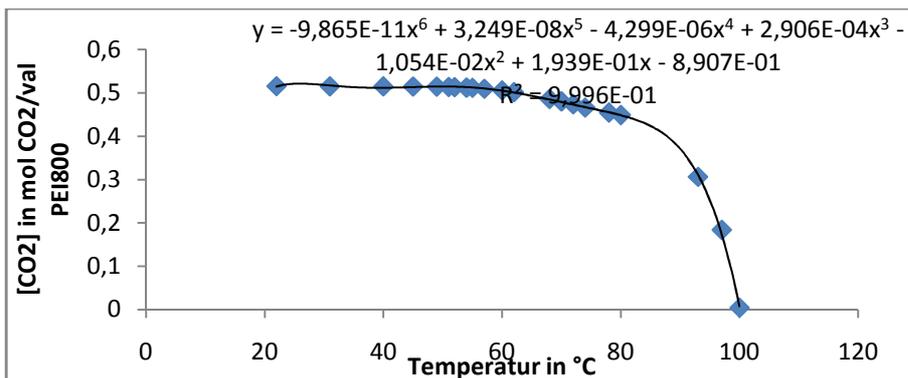


Abbildung 750 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/val PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

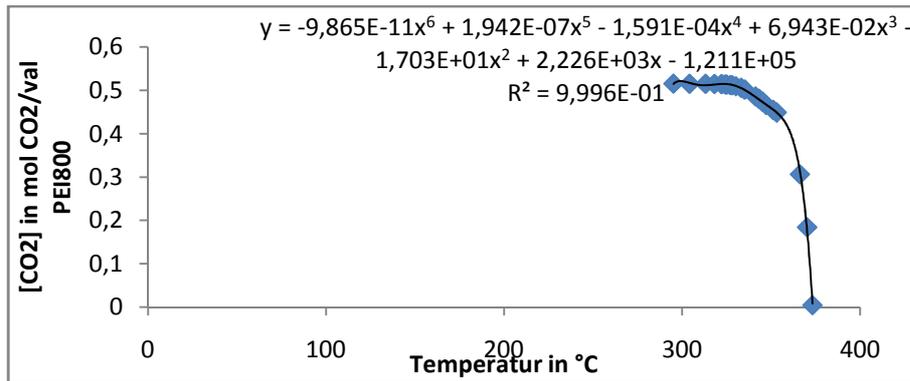


Abbildung 751 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> gegen die Temperatur in K für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

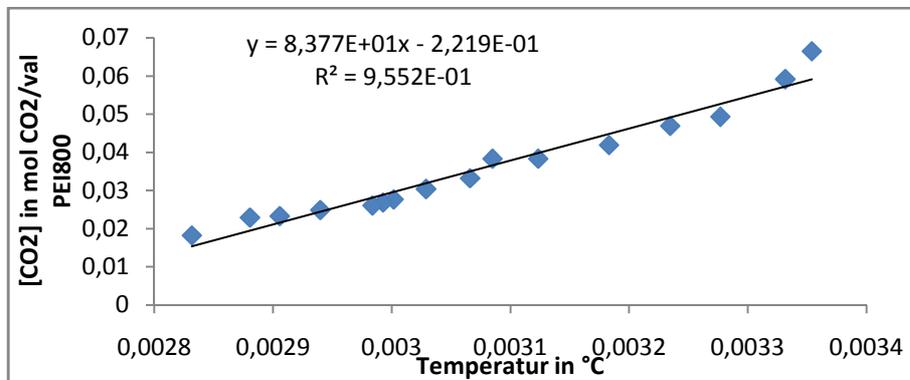


Abbildung 752 Bestimmung der Reaktionsenthalpie für die Behandlung für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> nach van't Hoff

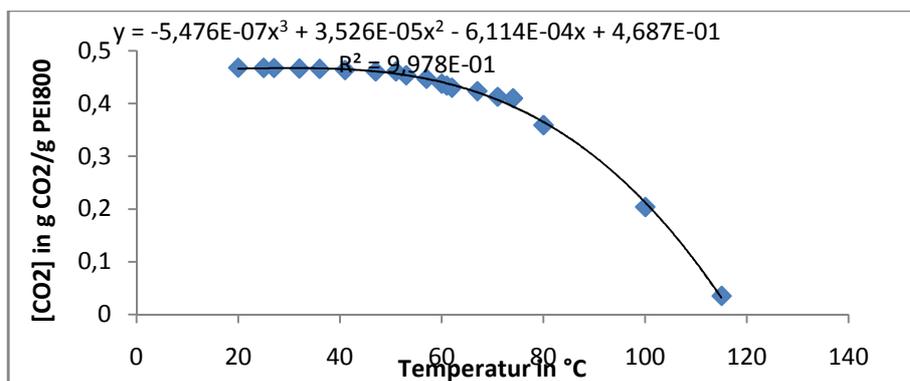


Abbildung 753 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub>

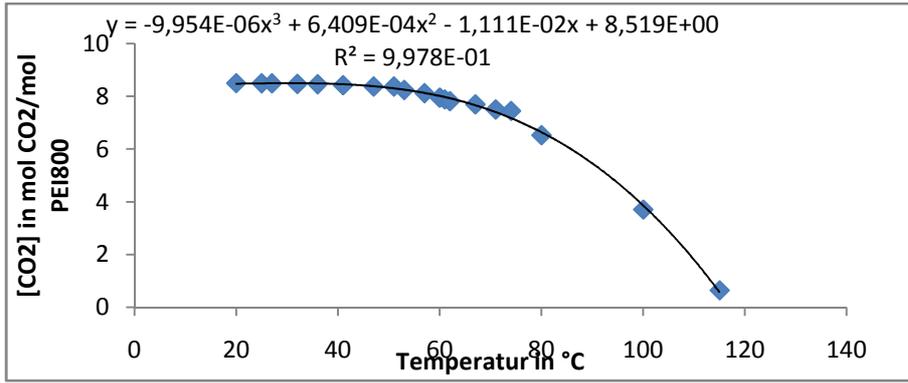


Abbildung 754 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $\text{CO}_2$  in mol  $\text{CO}_2$ /mol PEI800 gegen die Temperatur in  $^\circ\text{C}$  für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit  $\text{CO}_2$

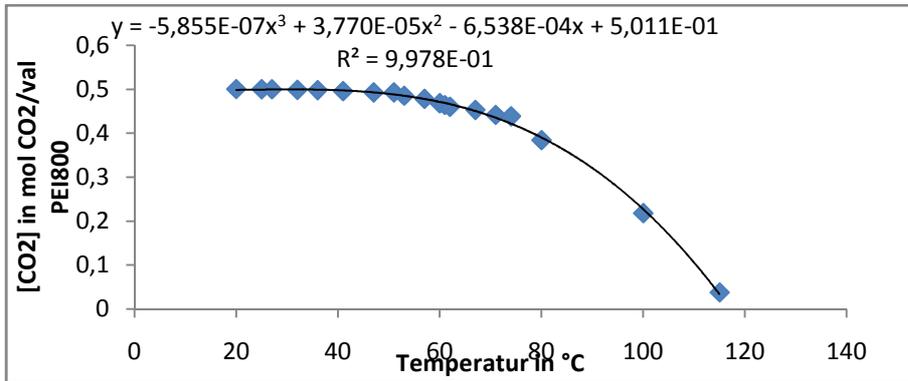


Abbildung 755 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $\text{CO}_2$  gegen die Temperatur in  $^\circ\text{C}$  für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit  $\text{CO}_2$

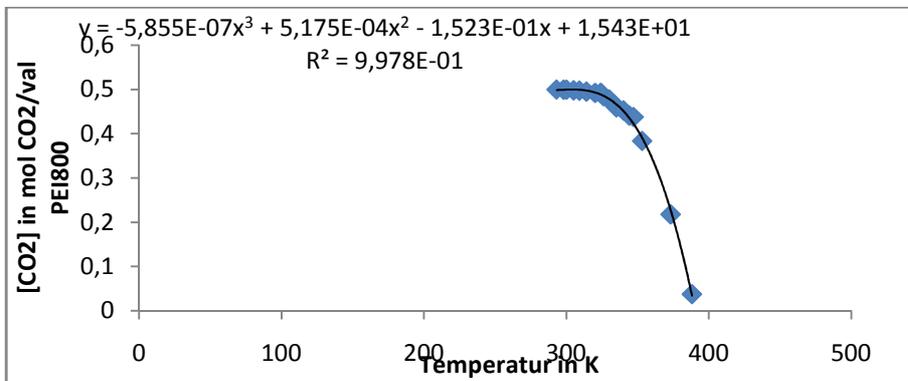


Abbildung 756 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $\text{CO}_2$  gegen die Temperatur in K für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit  $\text{CO}_2$

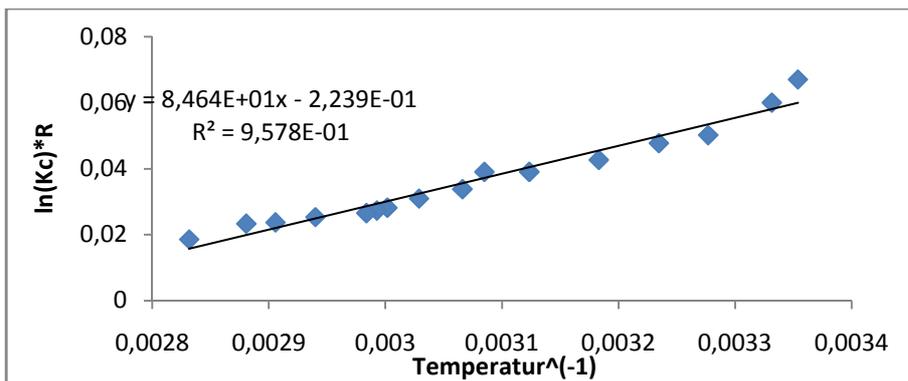


Abbildung 757 Bestimmung der Reaktionsenthalpie für die Behandlung für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub> nach van't Hoff

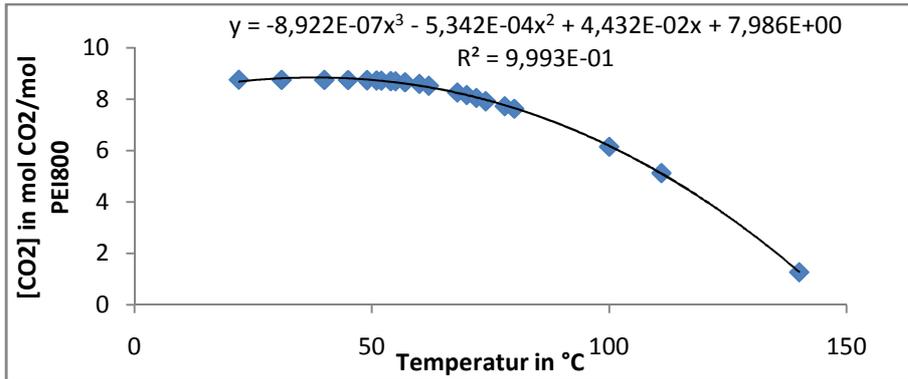


Abbildung 758 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wasserfreien 20 m%igen PEI800-Lösung in MEG mit CO<sub>2</sub>

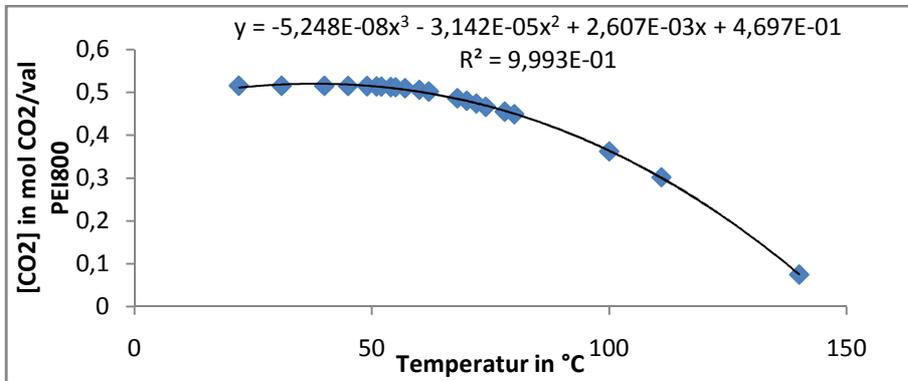


Abbildung 759 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wasserfreien 20 m%igen PEI800-Lösung in MEG mit CO<sub>2</sub>

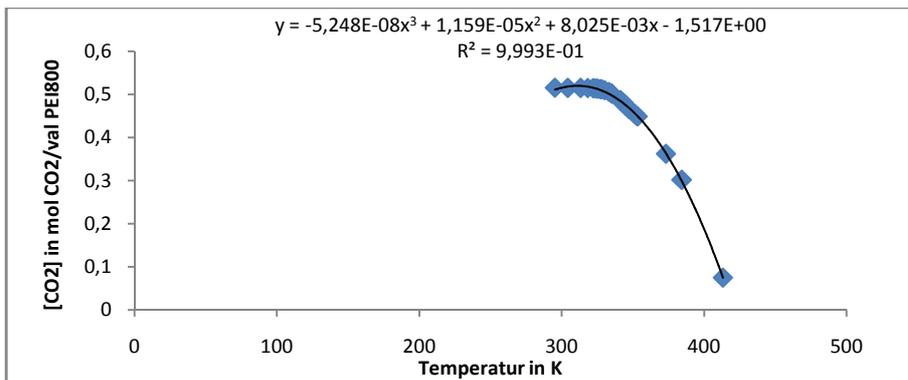


Abbildung 760 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> gegen die Temperatur in K für die Behandlung einer wasserfreien 20 m%igen PEI800-Lösung in MEG mit CO<sub>2</sub>

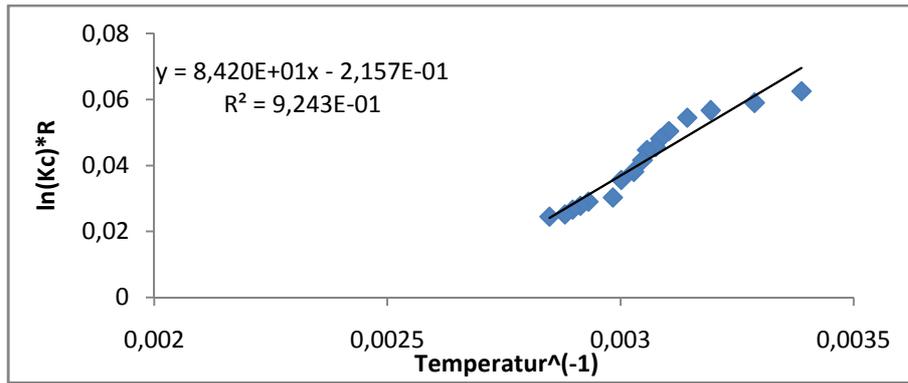


Abbildung 761 Bestimmung der Reaktionsenthalpie für die Behandlung einer wasserfreien 20 m%igen PEI800-Lösung in MEG mit CO<sub>2</sub> nach van't Hoff

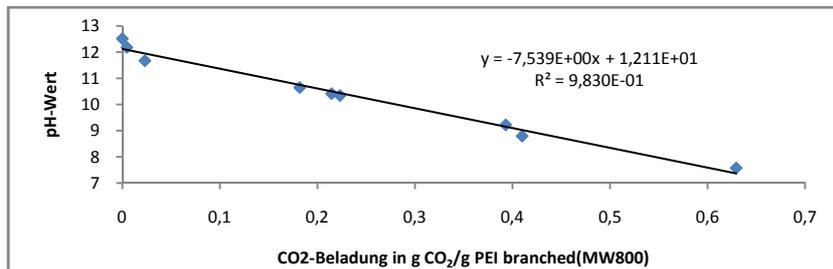
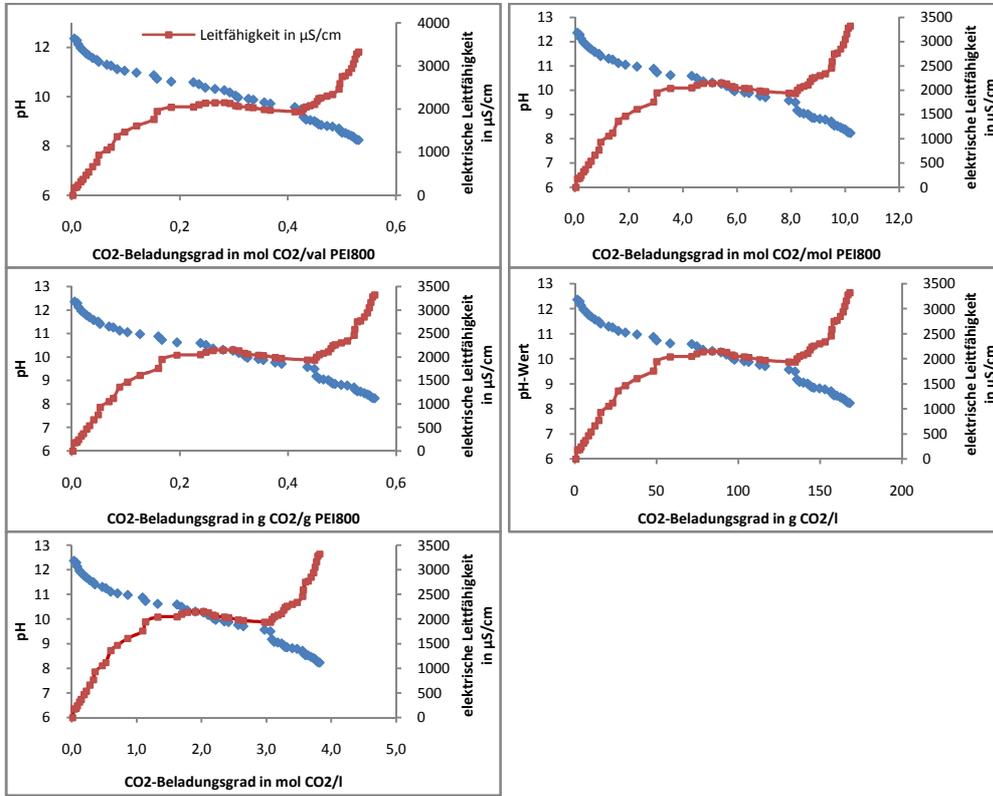


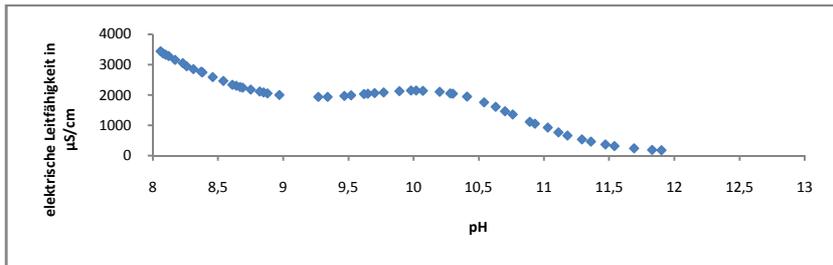
Abbildung 762 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Beladung auf den pH bei der Behandlung einer 20 m%igen PEI800 -Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> bei Raumbedingungen

1.19.14 **Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>**

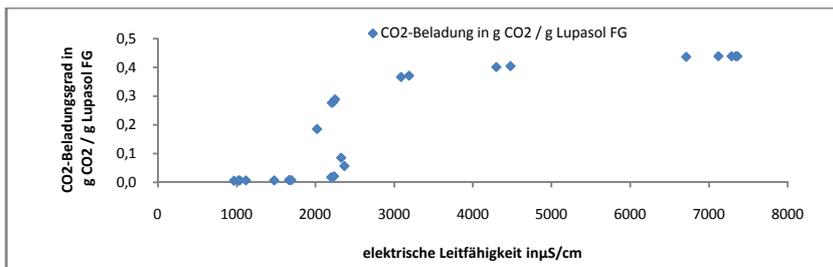
**Abbildung 763** Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> gegen die Reaktionszeit



**Abbildung 764** Korrelation des pH und der elektrischen Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub> gegen die Reaktionszeit und die CO<sub>2</sub>-Aufnahme



**Abbildung 765** Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>



**Abbildung 766** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die elektrische Leitfähigkeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

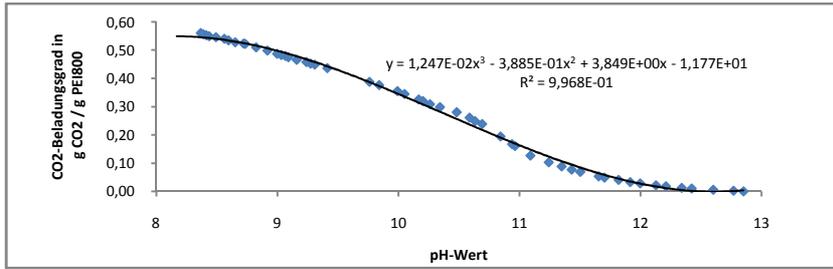


Abbildung 767 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{g CO}_2/\text{g PEI800}$  gegen den pH bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

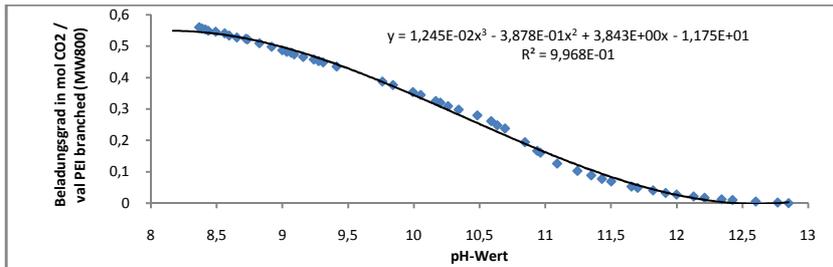


Abbildung 768 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{val PEI800}$  gegen den pH bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

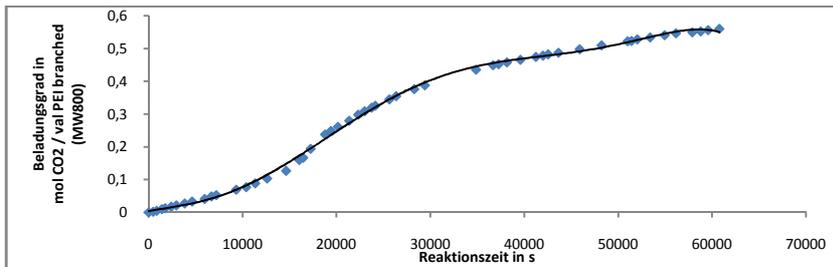


Abbildung 769 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{val PEI800}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

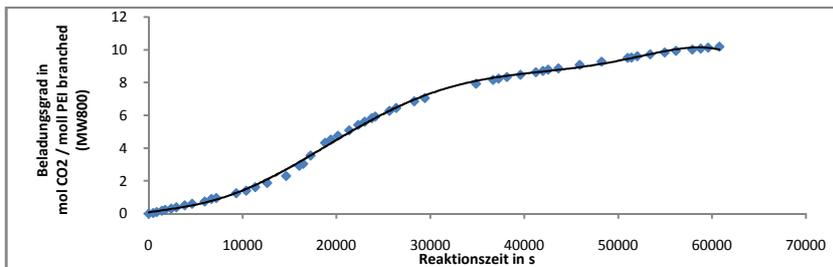


Abbildung 770 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{mol CO}_2/\text{mol PEI800}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

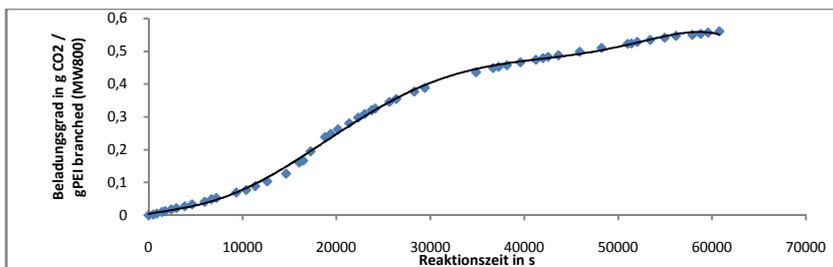


Abbildung 771 Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in  $\text{g CO}_2/\text{g PEI800}$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

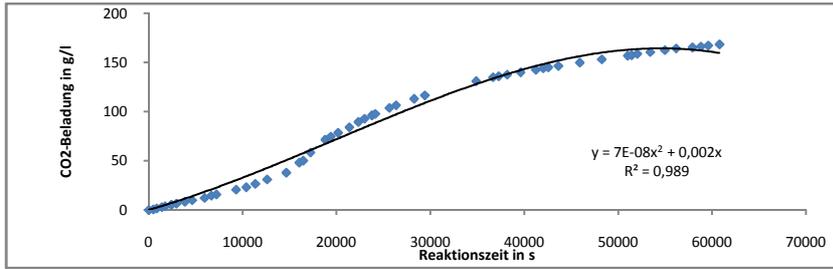


Abbildung 772 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in g CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

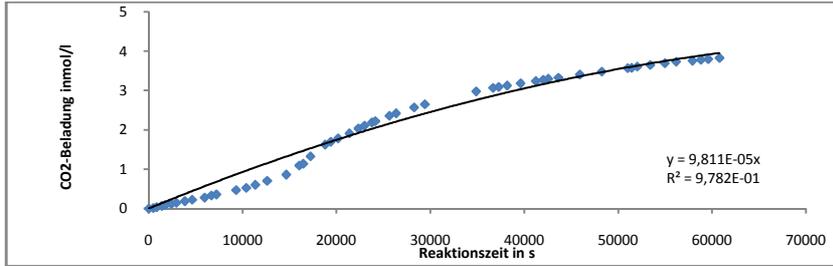


Abbildung 773 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

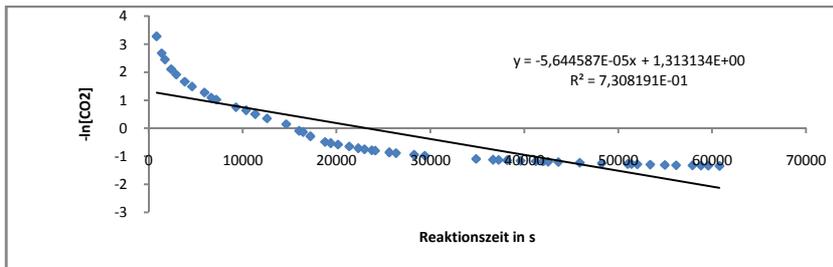


Abbildung 774 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

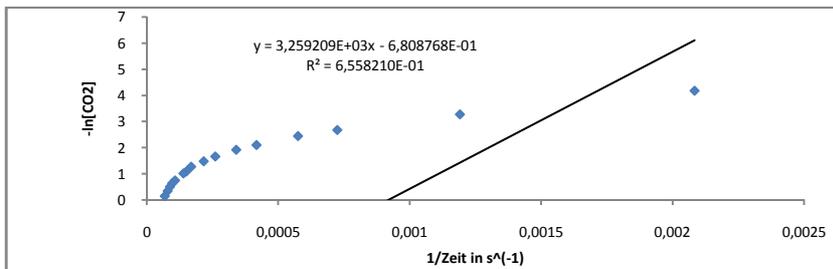


Abbildung 775 Verlauf des neg. natürlichen Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

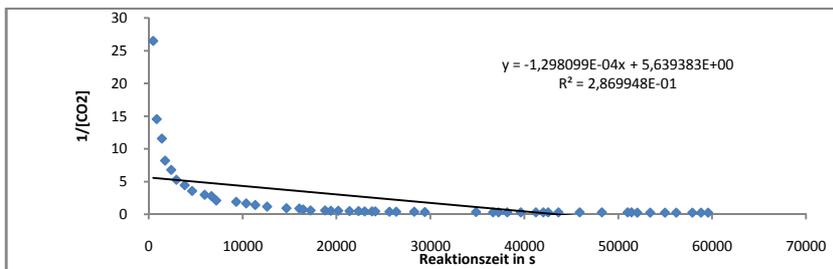


Abbildung 776 Verlauf des Kehrwertes der der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in mol CO<sub>2</sub>/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

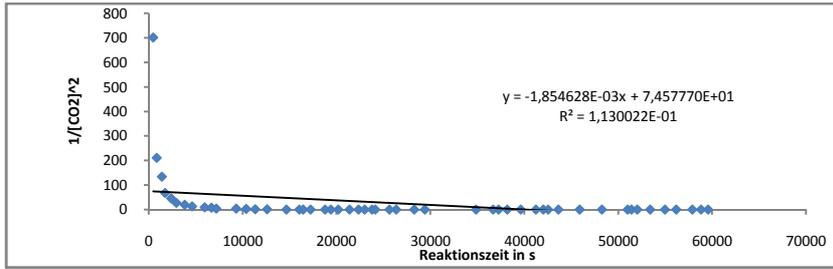


Abbildung 777 Verlauf des Kehrwertes der der quadrierten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol  $\text{CO}_2/\text{l}$  Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

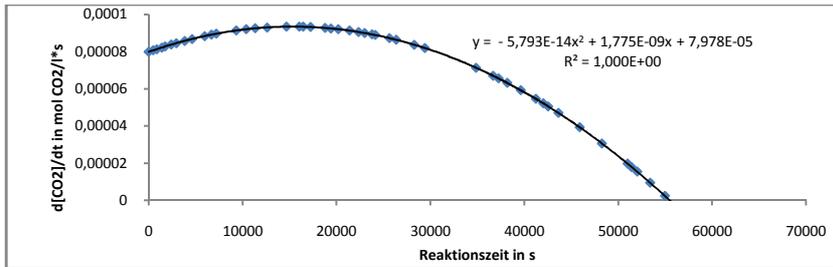


Abbildung 778 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

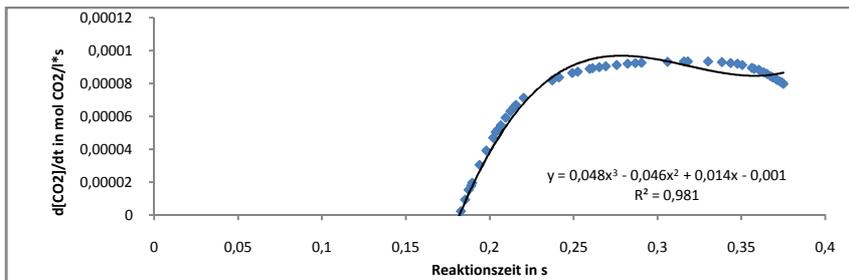


Abbildung 779 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die Konzentration in mol/l bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

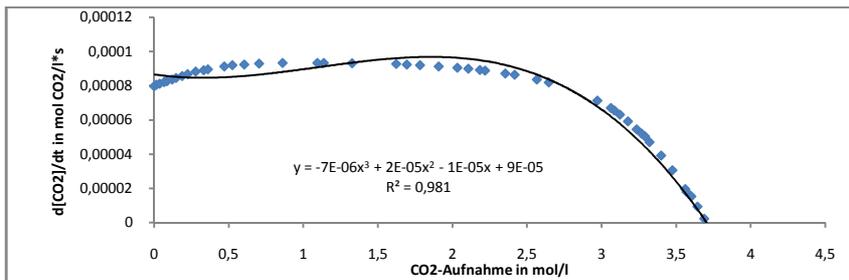


Abbildung 780 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

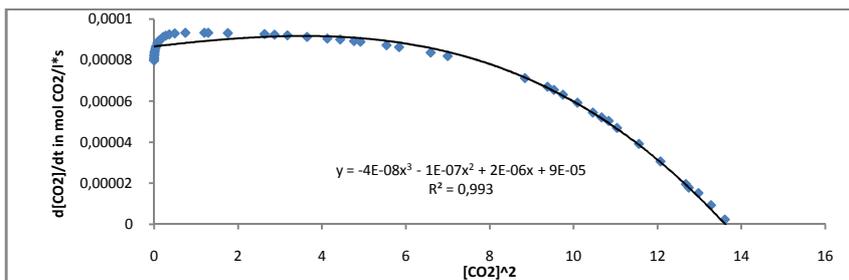


Abbildung 781 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $\text{CO}_2/(\text{l}\cdot\text{s})$  gegen die quadrierte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

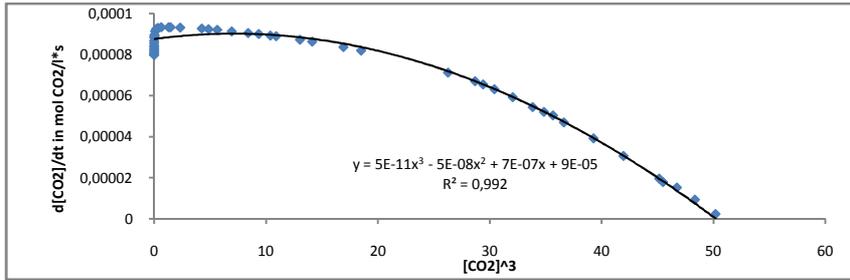


Abbildung 782 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol  $CO_2/(l \cdot s)$  gegen die kubierte  $CO_2$ -Aufnahme in mol/l bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

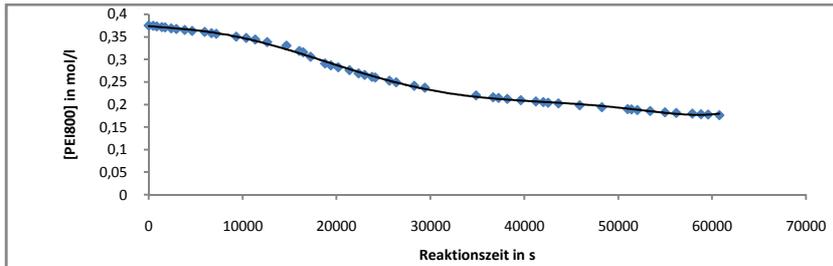


Abbildung 783 Verlauf der Konzentration PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

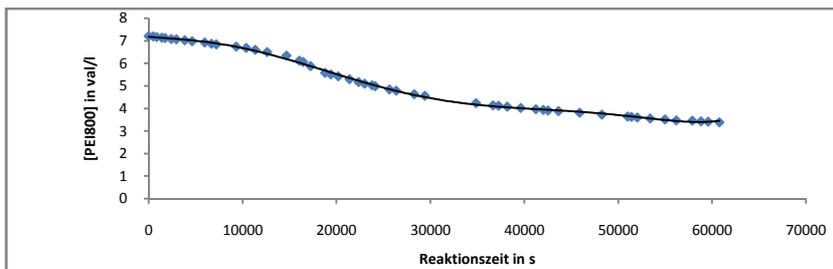


Abbildung 784 Verlauf der Konzentration PEI800 in val/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

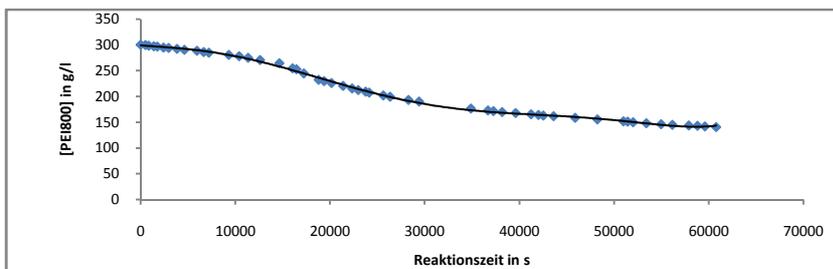


Abbildung 785 Verlauf der Konzentration PEI800 in g/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

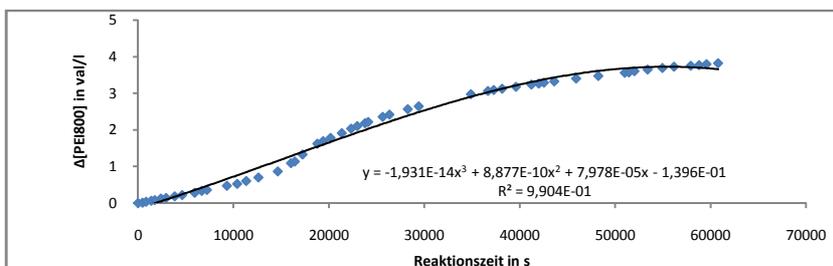


Abbildung 786 Verlauf des Umsatzes von PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $CO_2$

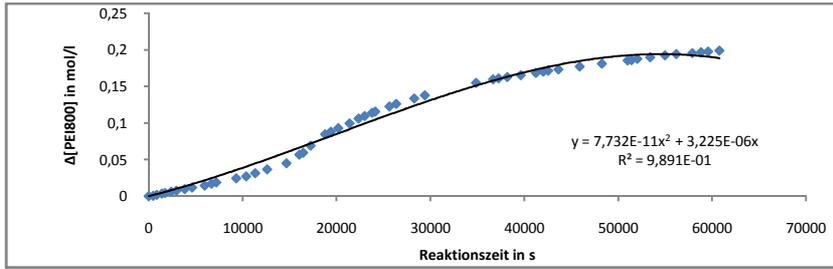


Abbildung 787 Verlauf der Konzentration PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

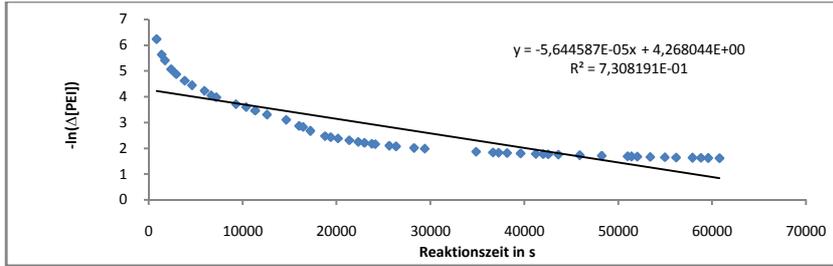


Abbildung 788 Verlauf des neg. natürlichen >Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

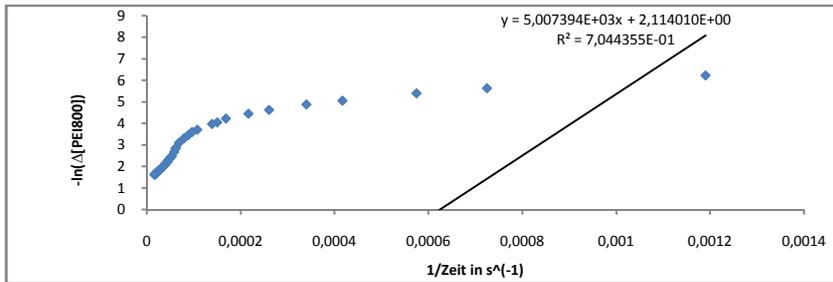


Abbildung 789 Verlauf des neg. natürlichen >Logarithmus des Umsatzes von PEI800 in mol/l Aminlösung gegen den Kehrwert der Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

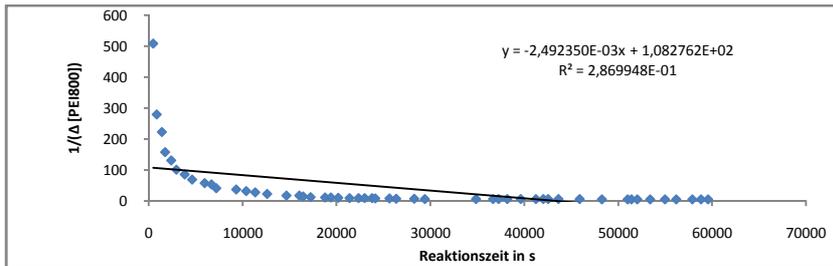


Abbildung 790 Verlauf des Kehrwertes des Umsatzes von PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

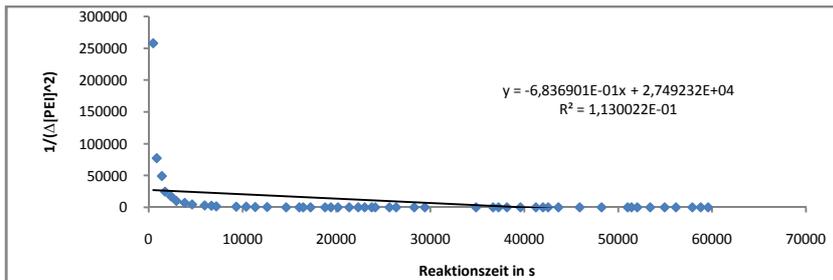


Abbildung 791 Verlauf des Kehrwertes des quadrierten Umsatzes von PEI800 in mol/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$

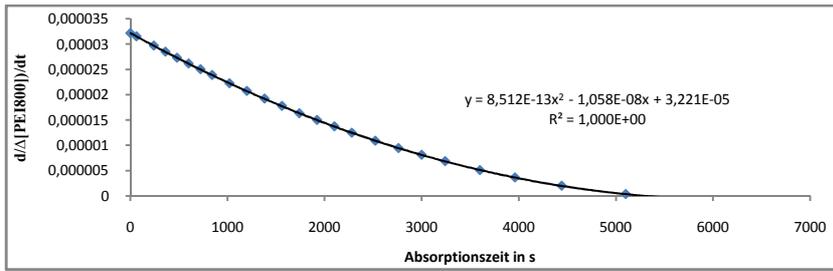


Abbildung 792 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/l Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

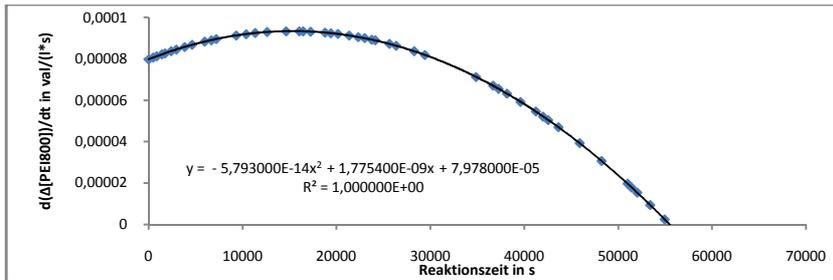


Abbildung 793 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in val PEI800/(l\*s) Aminlösung gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

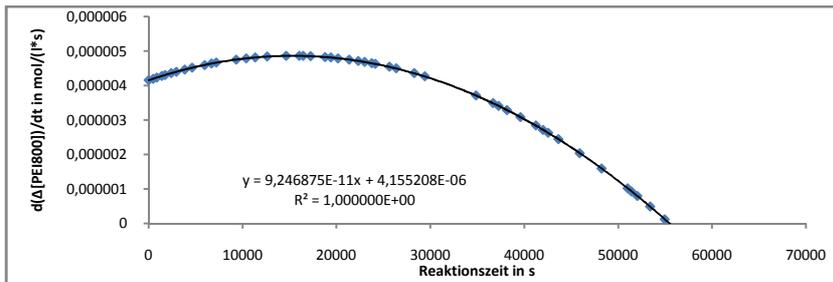


Abbildung 794 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/(l\*s) gegen die Reaktionszeit bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

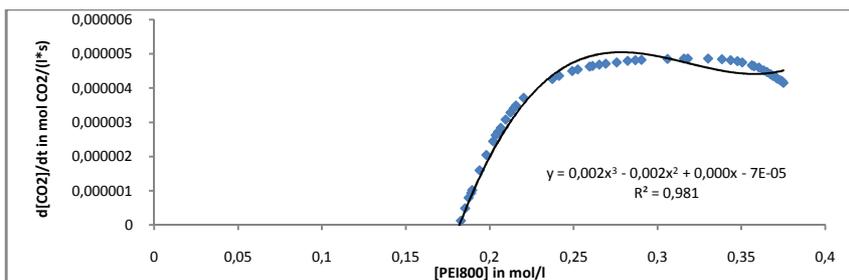


Abbildung 795 Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit in mol PEI800/l Aminlösung gegen die Konzentration PEI800 in mol/l bei der Behandlung einer 30 m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit CO<sub>2</sub>

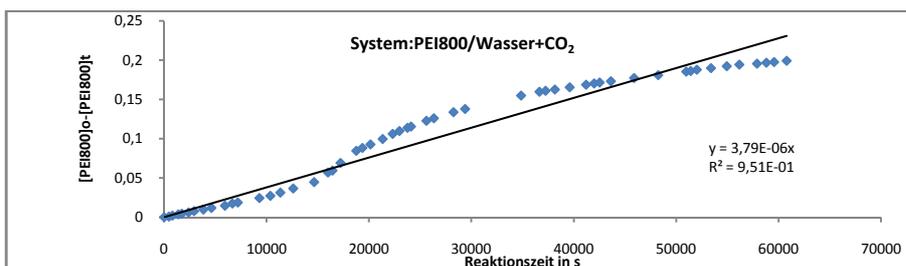


Abb. 796 Arrhenius-Plot 0.ter Ordnung für die Behandlung 30 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

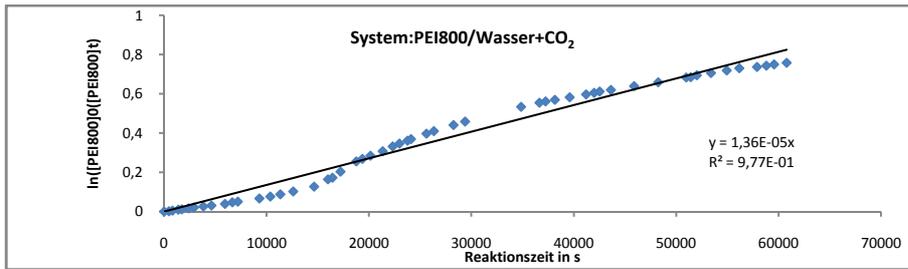


Abb. 797 Arrhenius-Plot 1.ter Ordnung für die Behandlung 30 m%iger wässriger PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

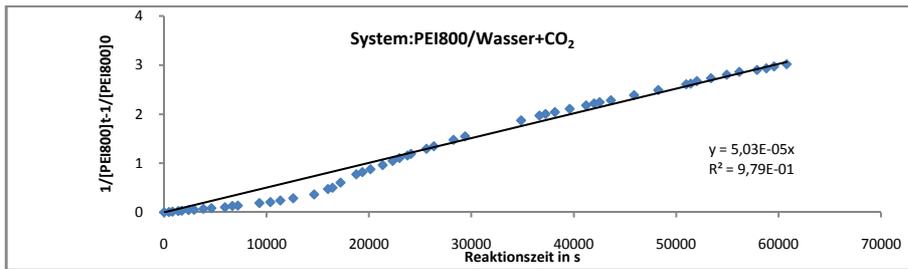


Abb. 798 Arrhenius-Plot 2.ter Ordnung für die Behandlung einer 30 m%igen wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

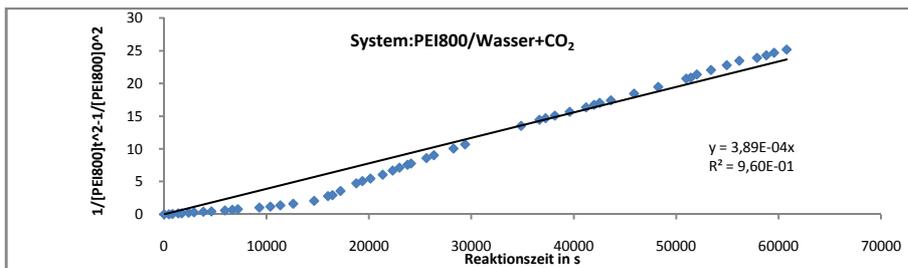


Abb. 799 Arrhenius-Plot 3. Ordnung für die Behandlung einer 30 m%igen wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

### 1.19.15 Behandlung einer 20%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG mit CO<sub>2</sub>

Für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG(20/80) mit CO<sub>2</sub> unter isothermen und isobaren Bedingungen im Blasenwäscher bei Raumdruck und annähernd 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck wurden für den Temperaturbereich zwischen 20 und der Sättigungstemperatur 115 °C experimentell Gleichgewichtskonstanten ermittelt, um daraus nach van't Hoff die Reaktionsenthalpie zu ermitteln. Trägt man ln(K)\*R gegen den Kehrwert der absoluten Temperatur auf, so ergibt sich für den Temperaturbereich von 293 bis 393 K ein annähernd linearer Verlauf des Graphen mit einer Steigung von 84,64 mit einem Bestimmtheitsmaß von R=0,9243, und nach somit van't Hoff eine gemittelte Reaktionsenthalpie von 84,6 kJ/mol für die Umsetzung von CO<sub>2</sub> in 20m%iger PEI800-Lösung in wässrigem MEG(20/80).

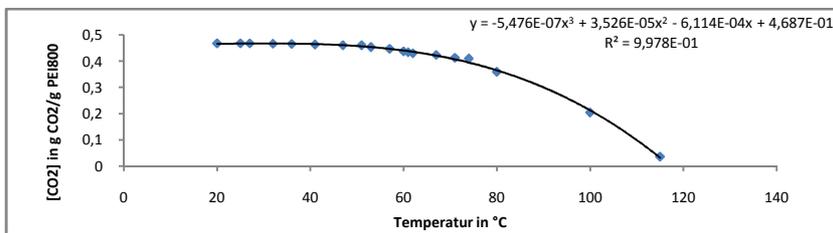


Abbildung 800 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub>

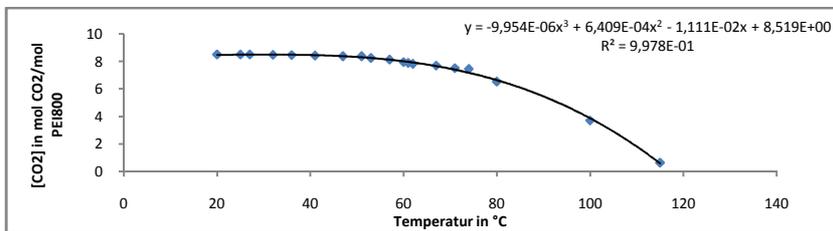


Abbildung 801 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub>

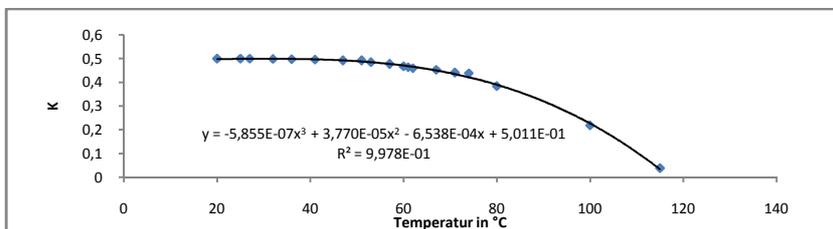


Abbildung 802 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub>

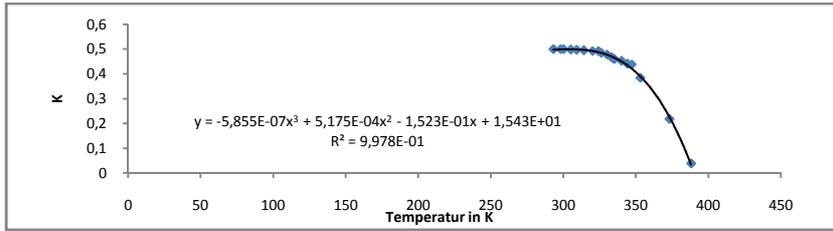


Abbildung 803 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> gegen die Temperatur in K für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub>

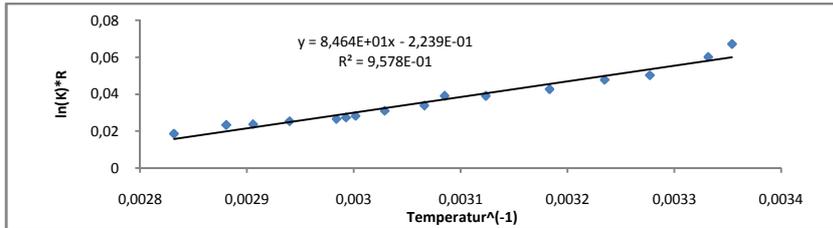


Abbildung 804 Bestimmung der Reaktionsenthalpie für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit CO<sub>2</sub> nach van't Hoff

In vergleichbarer experimenteller Art und Weise wurden für die Behandlung einer 20m%igen rein wässrigen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub> unter isothermen Bedingungen bei Raumdruck und annähernd 1 bar CO<sub>2</sub>-Dampfdruck für den Temperaturbereich zwischen 20°C und 100°C experimentell Gleichgewichtskonstanten ermittelt, und daraus nach van't Hoff eine gemittelte Reaktionsenthalpie von 83,8kJ/mol mit einem Bestimmtheitsmaß von R=0,9552 bestimmt.

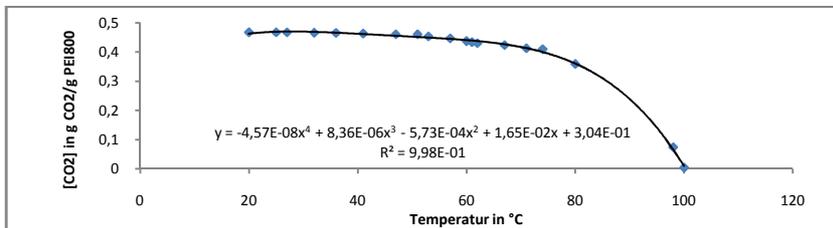


Abbildung 805 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in g CO<sub>2</sub>/g PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

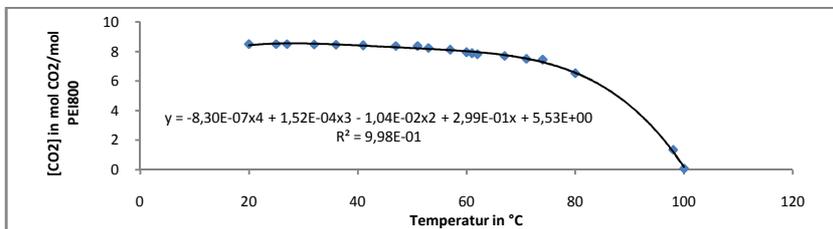


Abbildung 806 Auftragung Gleichgewichtskonzentration CO<sub>2</sub> in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Temperatur in °C für die Behandlung einer wässrigen 20m%igen PEI800-Lösung mit CO<sub>2</sub>

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

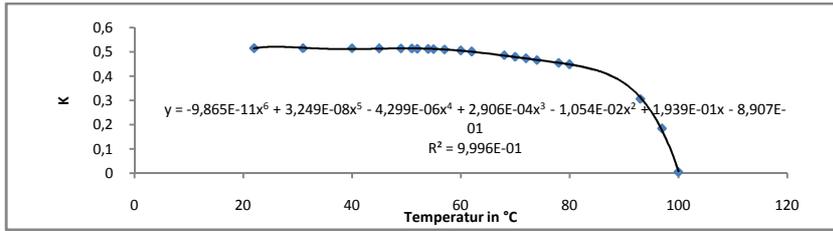


Abbildung 807 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $\text{CO}_2$  in mol  $\text{CO}_2/\text{mol}$  PEI800 gegen die Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  für die Behandlung einer wässrigen 20m%igen PEI800-Lösung mit  $\text{CO}_2$

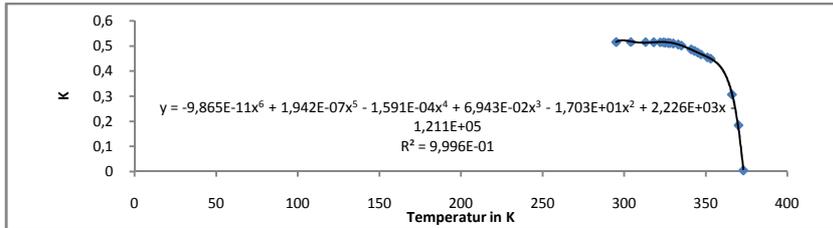


Abbildung 808 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $\text{CO}_2$  gegen die Temperatur in K für die Behandlung einer wässrigen 20m%igen PEI800-Lösung mit  $\text{CO}_2$

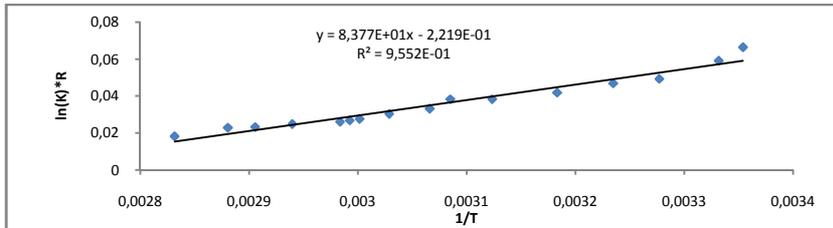
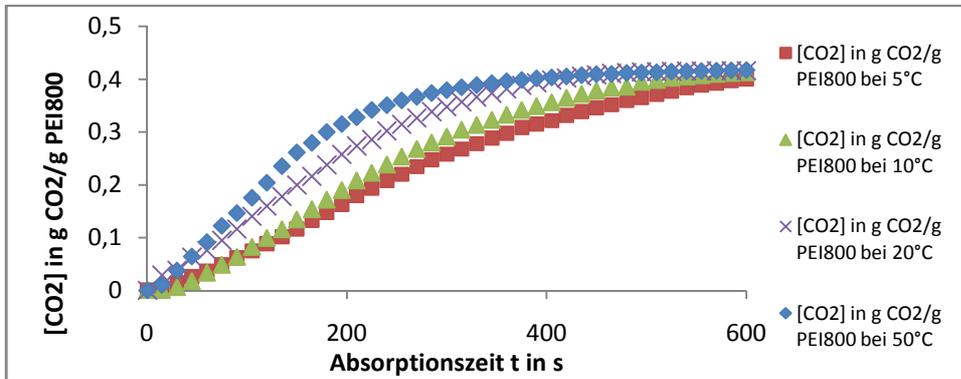
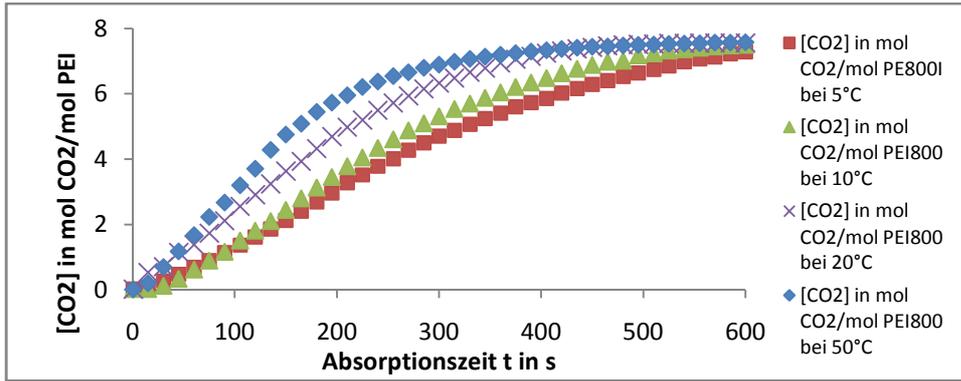


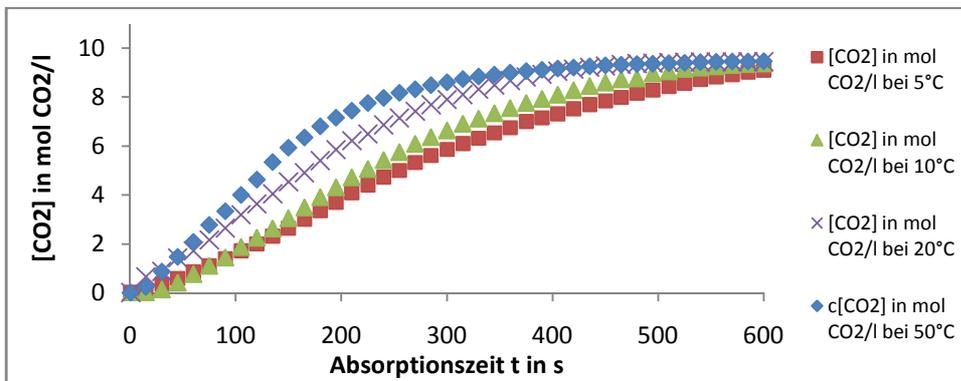
Abbildung 809 Bestimmung der Reaktionsenthalpie für die Behandlung für die Behandlung einer 20m%igen PEI800-Lösung in Wasser mit  $\text{CO}_2$  nach van 't Hoff



Formel 28 Auftragung der  $\text{CO}_2$ -Beladung in  $\text{g CO}_2/\text{g}$  PEI800 gegen die Absorptionszeit für die Behandlung einer 20 m%igen Lösung von PEI800 in MEG/Wasser (80/20) mit  $\text{CO}_2$  für Temperaturen von  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  und  $50^{\circ}\text{C}$  im Gegenstrom Nasswäscher



Formel 29 Auftragung der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/mol PEI800 gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20 m%igen Lösung von PEI800 in MEG/Wasser (80/20) mit CO<sub>2</sub> für Temperaturen von 5 °C, 10 °C, 20 °C und 50 °C im Gegenstrom Nasswäscher



Formel 30 Auftragung der CO<sub>2</sub>-Beladung in mol CO<sub>2</sub>/l Waschflüssigkeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20 m%igen Lösung von PEI800 in MEG/Wasser (80/20) mit CO<sub>2</sub> für Temperaturen von 5 °C, 10 °C, 20 °C und 50 °C im Gegenstrom Nasswäscher

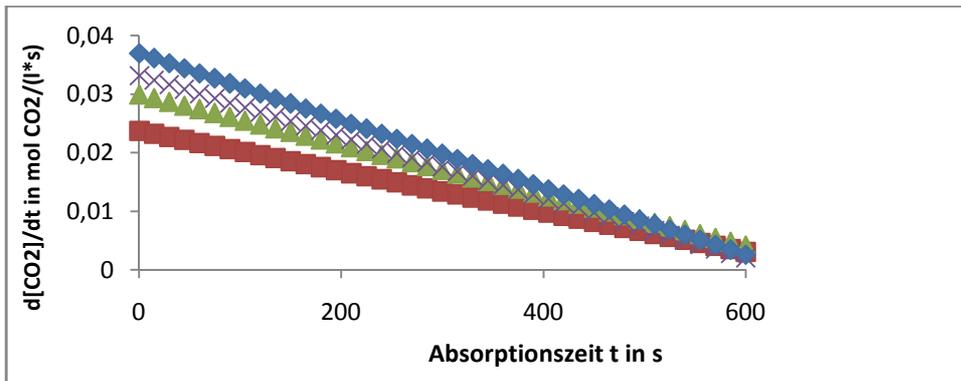


Abbildung 810 Auftragung der Reaktionsgeschwindigkeit  $d[CO_2]/dt$  in mol CO<sub>2</sub>/(l\*s) gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung einer 20 m%igen Lösung von PEI800 in MEG/Wasser (80/20) mit CO<sub>2</sub> für Temperaturen von 5 °C, 10 °C, 20 °C und 50 °C für 600 s Reaktionszeit

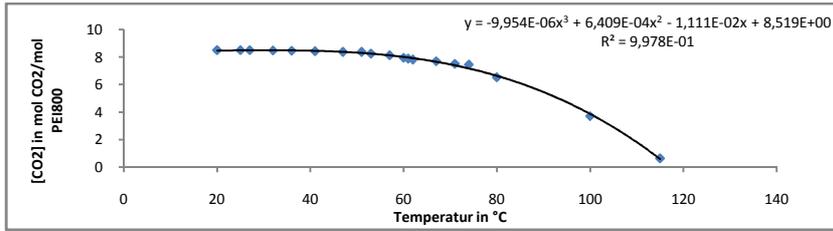


Abb. 811 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $CO_2$  in mol  $CO_2$ /mol PEI800 gegen die Temperatur in  $^{\circ}C$  für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit  $CO_2$

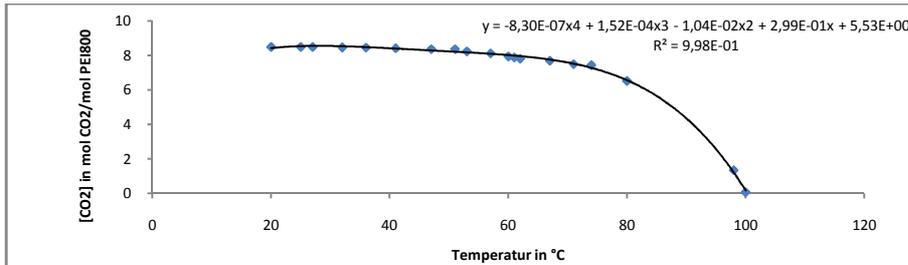


Abb. 812 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $CO_2$  in mol  $CO_2$ /mol PEI800 gegen die Temperatur in  $^{\circ}C$  für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit  $CO_2$

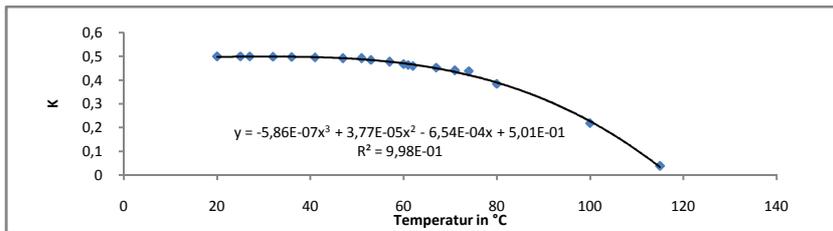


Abb. 813...Auftragung Gleichgewichtskonstante gegen die Temperatur in  $^{\circ}C$  für die Behandlung einer 20 m%igen PEI800-Lösung in wässrigem MEG (20/80) mit  $CO_2$

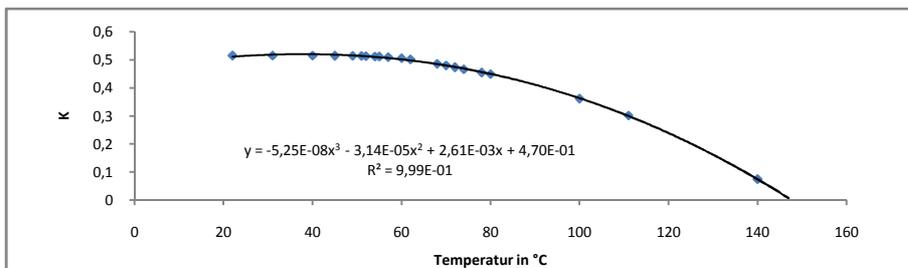


Abbildung 814 Auftragung Gleichgewichtskonstante gegen die Temperatur in  $^{\circ}C$  für die Behandlung wasserfreier 20 m%iger PEI800-Lösung in MEG mit  $CO_2$

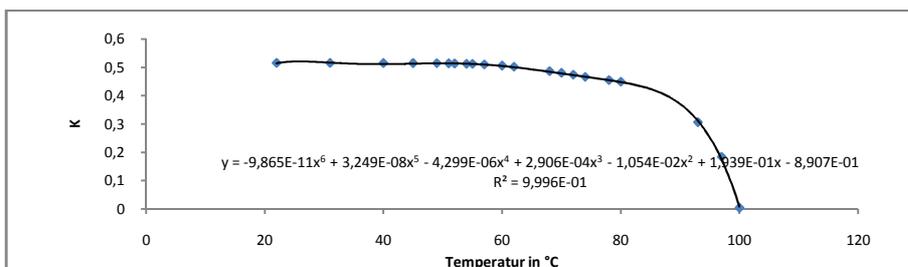


Abb. 815 Auftragung Gleichgewichtskonzentration  $CO_2$  in mol  $CO_2$ /val PEI800 gegen die Temperatur in  $^{\circ}C$  für die Behandlung einer wässrigen 20 m%igen PEI800-Lösung mit  $CO_2$

Tabelle 3 Reaktionsgeschwindigkeitskoeffizienten nach Arrhenius

	Konz. PEI800 in m%		
	2,65	5,84	11,84
Reaktionsordnung	Geschwindigkeitskonstante $k(\text{CO}_2)$		
k(0.te Ordnung)	0,0001992	0,0002971	0,0004483
k(1.te Ordnung)	0,0004784	0,0002936	0,0002101
k(2.te Ordnung)	0,001143	0,0002955	0,00009771
k(3.te Ordnung)	0,005776	0,0006066	0,0004483

## 1.20 PEI800 versus MEA

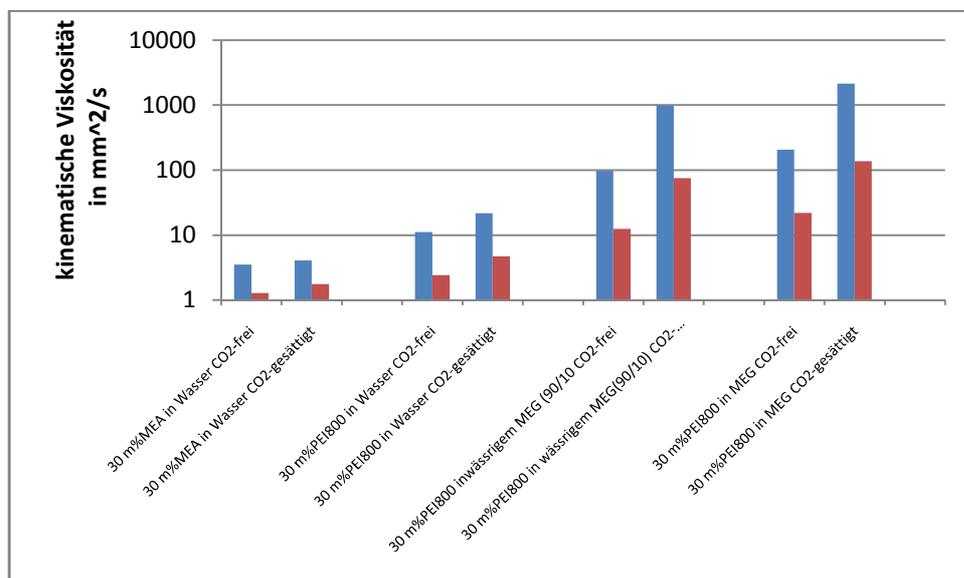


Abbildung 816 Kinematische Viskosität von Aminlösungen vor und nach der Sättigung mit CO<sub>2</sub> bei 20 °C und 80 °C

Tabelle 4 Spezifische Wärmekapazitäten und Verdampfungsenthalpien von Wasser, MEG, MEA und PEI800

28 29 30 31

Stoff	Temperatur in °C	Spezifische Wärmekapazität C <sub>p</sub> in kJ/(kg*K)	Verdampfungsenthalpie ΔH <sub>v</sub> in kJ/kg
Wasser	20	4,182	2453,4
Wasser	25	4,180	2441,7
Wasser	40	4,179	2406,2
Wasser	60	4,179	2357,9
Wasser	80	4,197	2307,8
Wasser	100	4,216	2255,5
MEG	19 exp.	2,39	1092,7
MEG	25	2,42	1087,5
MEG	40	2,49	1074,1
MEG	60	2,59	1054,8
MEG	80	2,68	1033,9
MEG	100	2,77	1011,4
MEG	120	2,85	987,4
MEG	140	2,93	961,8
MEA	25	2,66	1080,3
MEA	40	2,74	1041,8

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

MEA	60	2,85	995,2
MEA	80	2,96	953,9
MEA	100	3,07	918,0
MEA	120	3,18	887,3
MEA	140	3,29	862,0
MEA	16 exp.	2,62	1104,8
PEI800	21	2,46	

**Tabelle 5**      **Thermodynamische Daten**

Stoff	Summenformel	Molmasse in g/mol	Molare Bildungsenthalpie in kJ/mol	Molare Verbrennungsenthalpie in kJ/mol	Verbrennungsenthalpie in kJ/g	Molare Wärmekapazität in J/(mol*K)
EI	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	43,068	-91,9+/-0,59 <sup>32</sup>	1591,36+/-0,57	36,94	
MEDA	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	60,098	-63,01+/-0,54 <sup>33</sup>	1867,3+/-0,5	31,071	
DETA	C <sub>4</sub> H <sub>13</sub> N <sub>3</sub>	103,166	-65,2+/-0,5 <sup>34</sup>	3366,7+/-0,5	32,634	254 (313K)
TETA	C <sub>6</sub> H <sub>18</sub> N <sub>4</sub>	146,24	-73,64	4592,08	31,401	295,1
TEPA	C <sub>8</sub> H <sub>23</sub> N <sub>5</sub>	189,30	-82,42	6356,69	33,58	357,4
PEHA	C <sub>10</sub> H <sub>28</sub> N <sub>6</sub>	232,376		7909,38	34,037	436,2
MEA	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N <sub>1</sub> O <sub>2</sub>	61,08	-507,5			149,95
DEA	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N <sub>1</sub> O <sub>2</sub>	105,14				
CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> O <sub>2</sub>	44,01	-393,52			
H <sub>2</sub> O		18,01	-285,83(l) -241,83(g)			75,64

NO <sub>2</sub>		46,06	33,10			
NH <sub>3</sub>		17,03	-45,9	317,56	18,647	
PEI800	C <sub>36,394</sub> H <sub>93,98</sub> 5N <sub>19,179</sub>	800	-194	27275	34,094	2008
PEI800-Carbamat	C <sub>44,895</sub> H <sub>93,98</sub> 4N <sub>19,179</sub> O <sub>17</sub>	1173	-3427	30045	25,614	2008

Tabelle 6 Absorptionenthalpien für MEA, DEA und MDEA bei 20 °C und 80 °C

Absorptionstemperatur	Absorptionenthalpie $\Delta H_{r(\text{Absorption}) \text{MEA}}$ kJ/kg (CO <sub>2</sub> ) kJ/mol (CO <sub>2</sub> )	Absorptionenthalpie $\Delta H_{r(\text{Absorption}) \text{DEA}}$ kJ/kg (CO <sub>2</sub> ) kJ/mol (CO <sub>2</sub> )	Absorptionenthalpie $\Delta H_{r(\text{Absorption}) \text{MDEA}}$ kJ/kg (CO <sub>2</sub> ) kJ/mol (CO <sub>2</sub> )
(20 °C)	1900 83,62	1600 70,42	1100 48,41
(80 °C)	2100 92,42	1700 74,82	1200 52,81

### 1.20.1 Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

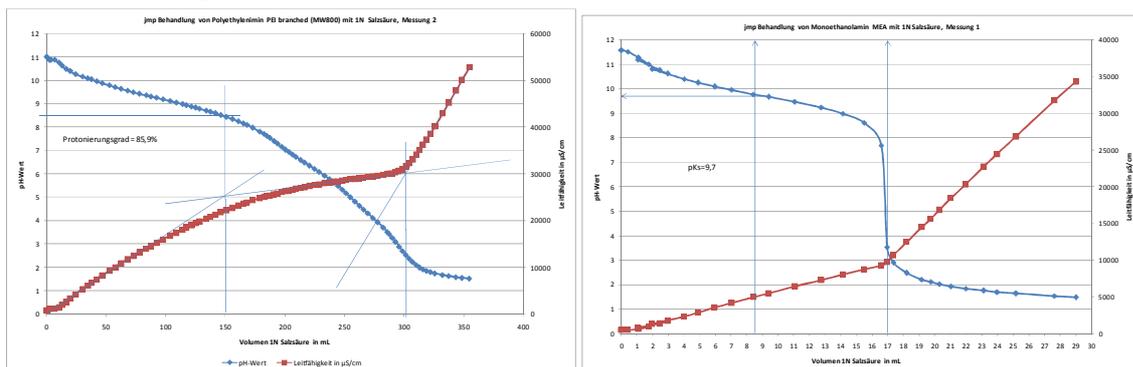


Abb. 817...Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen das Volumen 1N Salzsäure bei der Behandlung von  $1,225 \cdot 10^{-3}$  mol PEI800 und  $1,699 \cdot 10^{-2}$  mol MEA in verdünnten wässrigen Lösungen mit 1N Salzsäure

# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

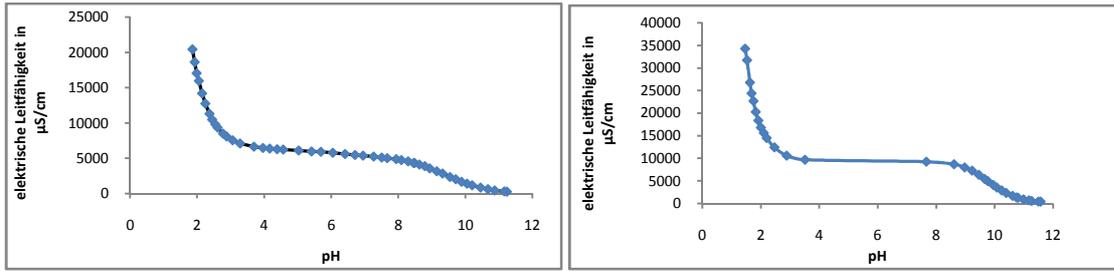


Abb. 818...Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gegen den pH bei der Behandlung von  $1,225 \cdot 10^{-3}$  mol PEI800 und  $1,699 \cdot 10^{-2}$  mol MEA in verdünnten wässrigen Lösung mit 1N Salzsäure

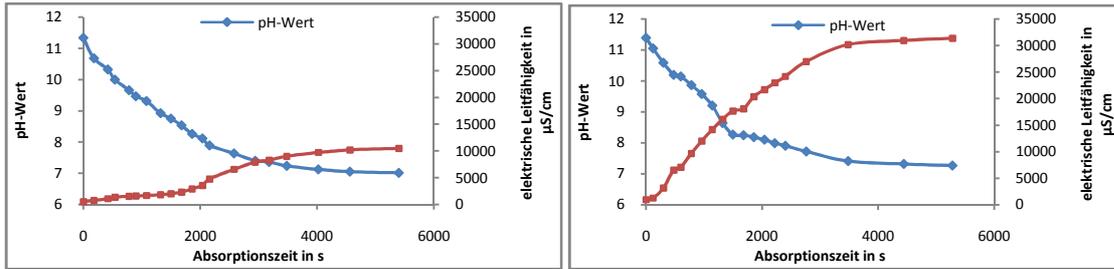
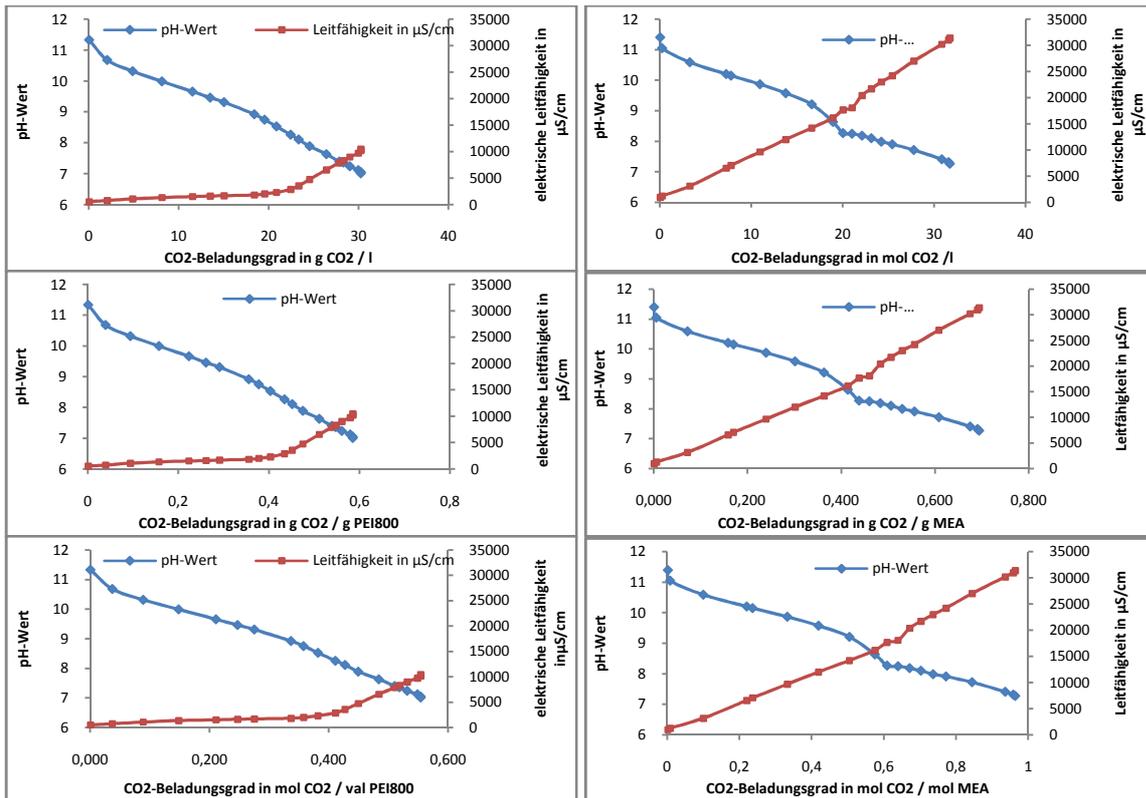


Abb. 819...Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Reaktionszeit in bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit  $\text{CO}_2$



## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

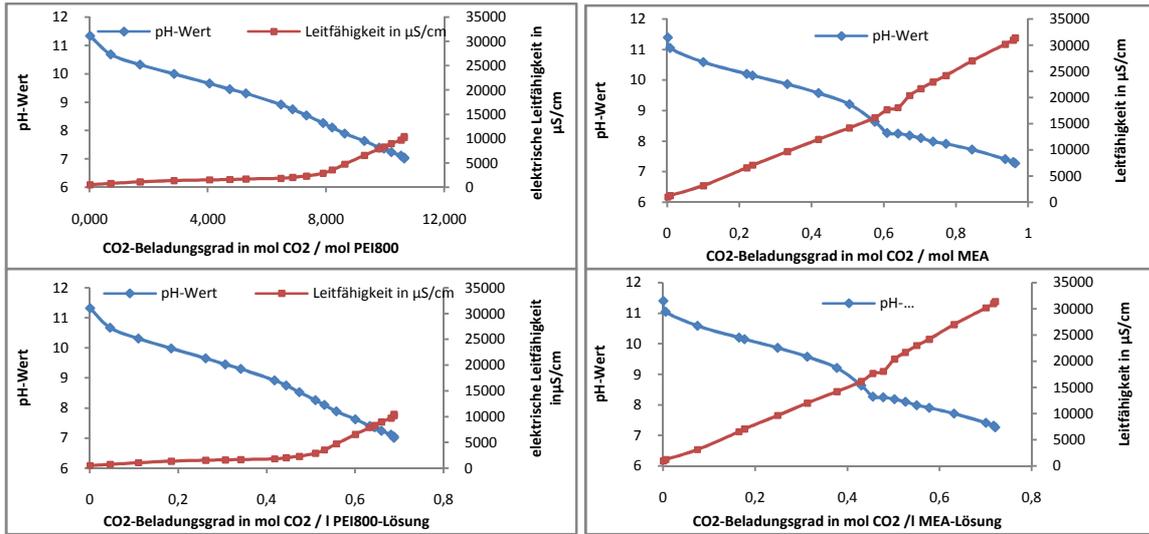


Abb. 820 Verlauf des pH und der elektrischen Leitfähigkeit gegen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme in unterschiedlichen Konzentrationsmaßen bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

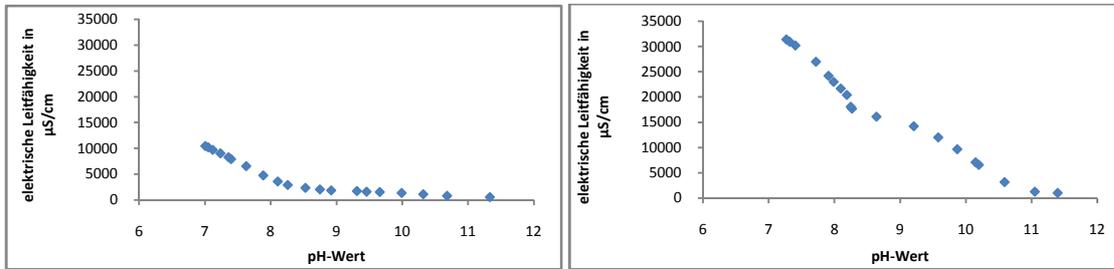


Abb. 821 Korrelation von pH und elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

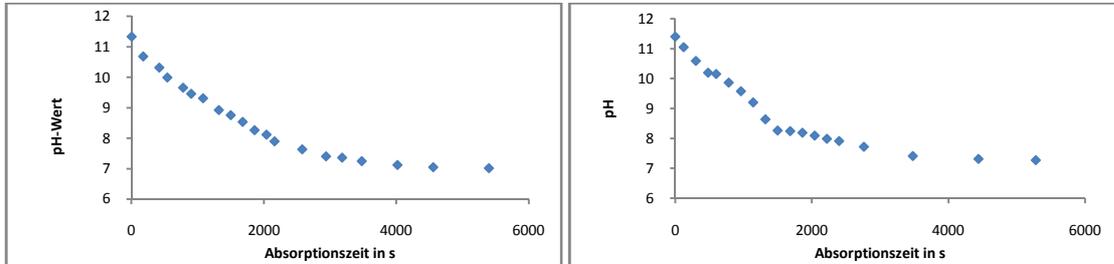


Abb. 822 Auftragung des pH gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

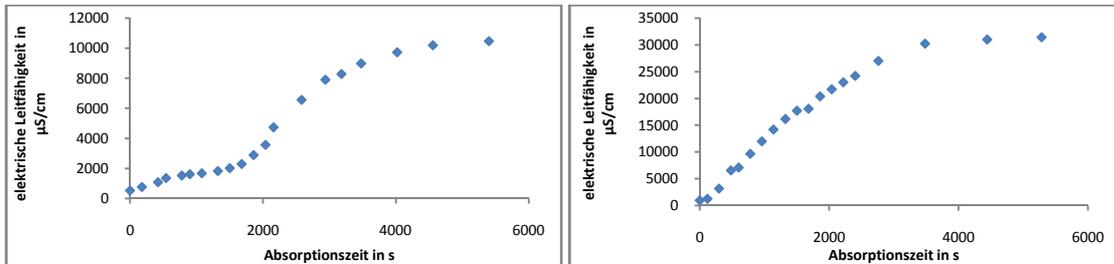


Abb. 823 Auftragung der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

# Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

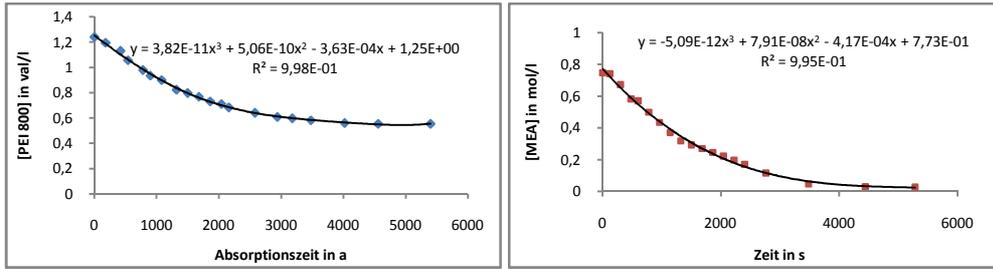


Abb. 824 Konzentration der Aminkomponenten in val/l bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

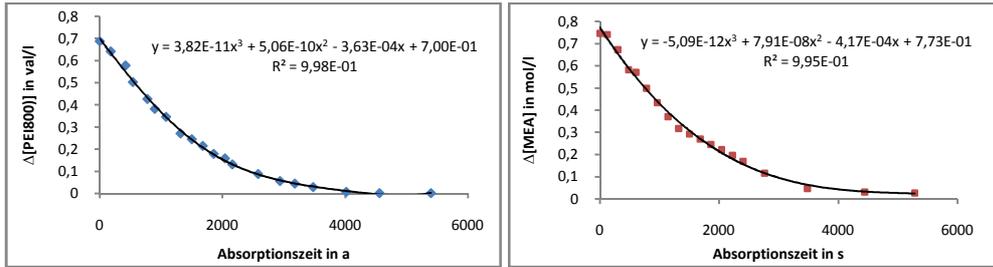


Abb. 825 Umsatz der Aminkomponenten in Δval/l bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

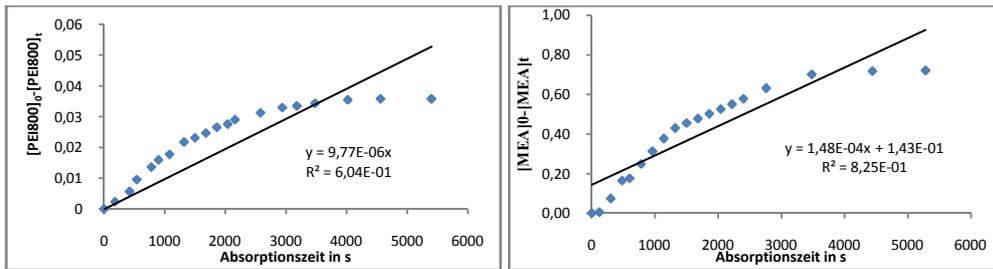


Abb. 826 Arrhenius-Plot 0.ter Ordnung für die Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub>

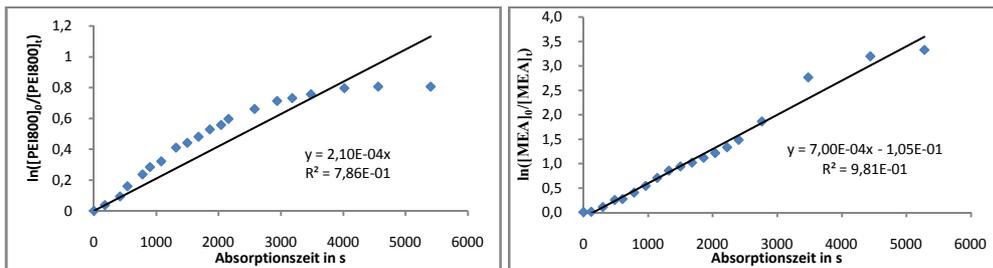


Abb. 827 Arrhenius-Plot 1.ter Ordnung für die Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub>

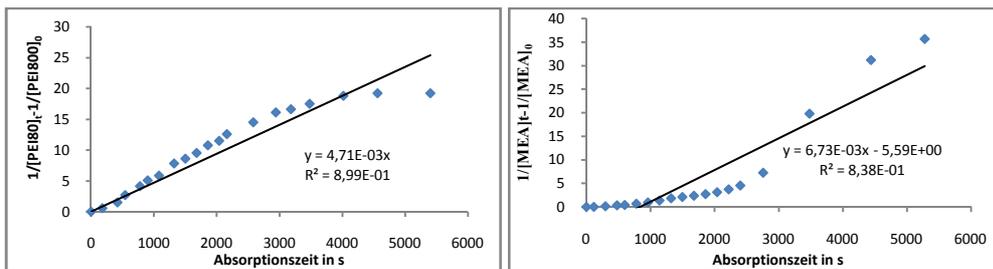


Abb. 828 Arrhenius-Plot 2.ter Ordnung für die Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub>

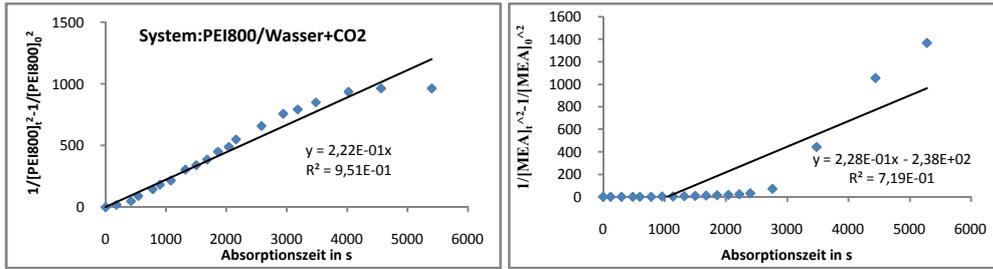


Abb. 829 Arrhenius-Plot 3.ter Ordnung für die Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub>

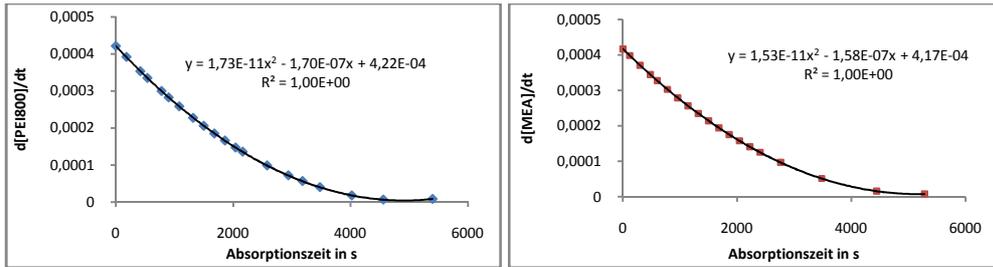


Abb. 830 Auftragung d[Aminkomponente]/dt gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

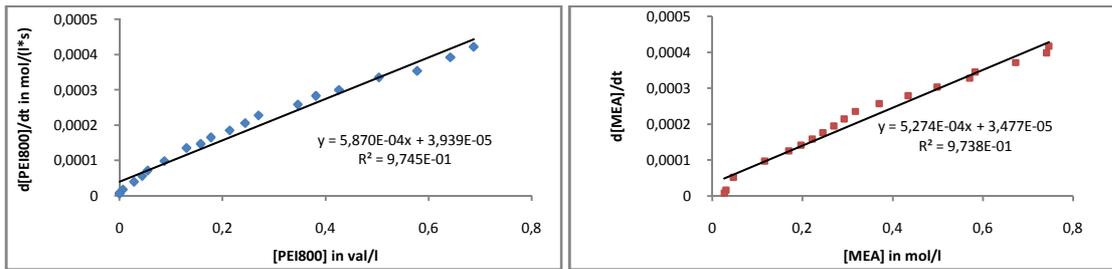


Abb. 831 Auftragung d[Aminkomponente]/dt gegen [Aminkomponente] in val/l bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

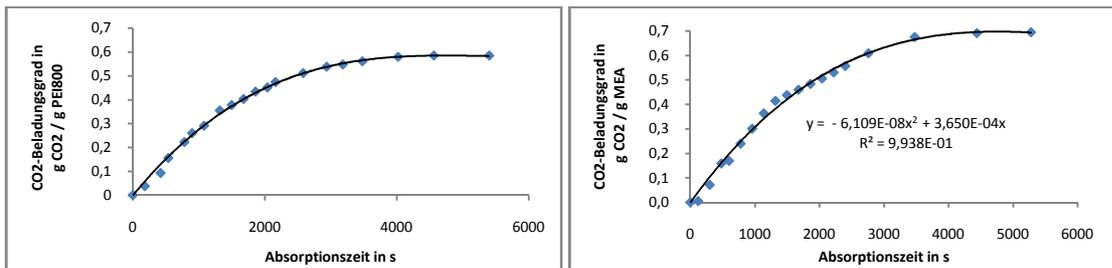


Abb. 832 Auftragung CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in g CO<sub>2</sub>/g Aminkomponente gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

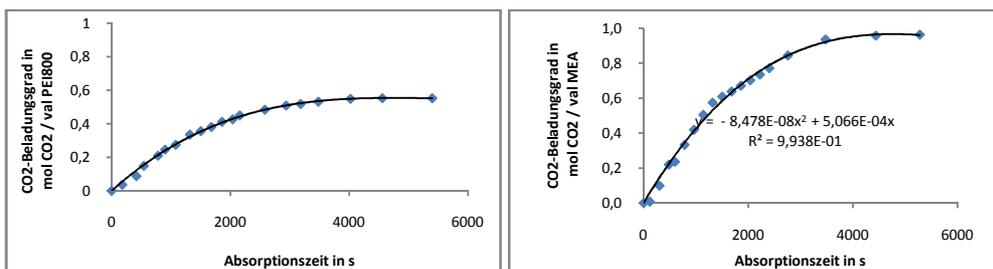


Abb. 833 Auftragung CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in mol CO<sub>2</sub>/val Aminkomponente gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

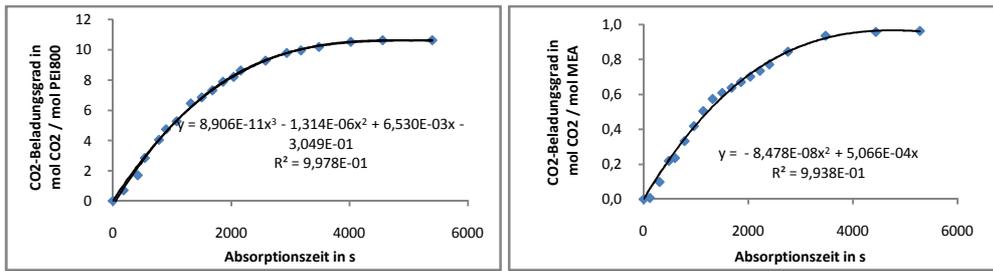


Abb. 834 Auftragung CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in mol CO<sub>2</sub>/mol Aminkomponente gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

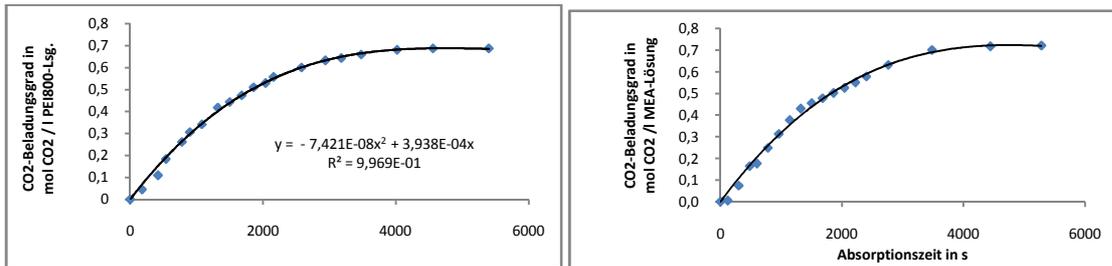


Abb. 835 Auftragung CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in mol CO<sub>2</sub>/l Amin-Lösung gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

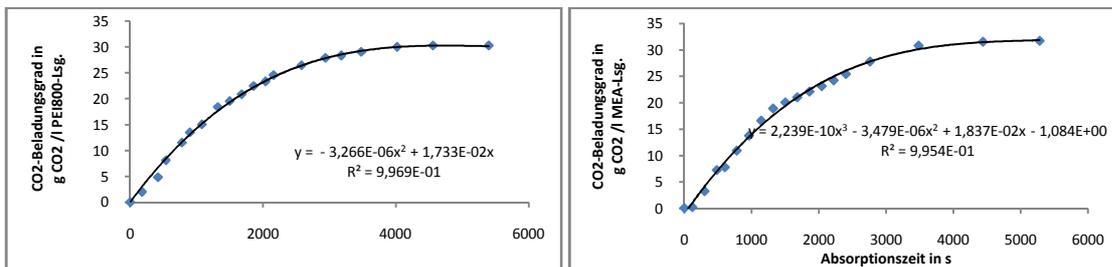


Abb. 836 Auftragung d[CO<sub>2</sub>]/dt gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

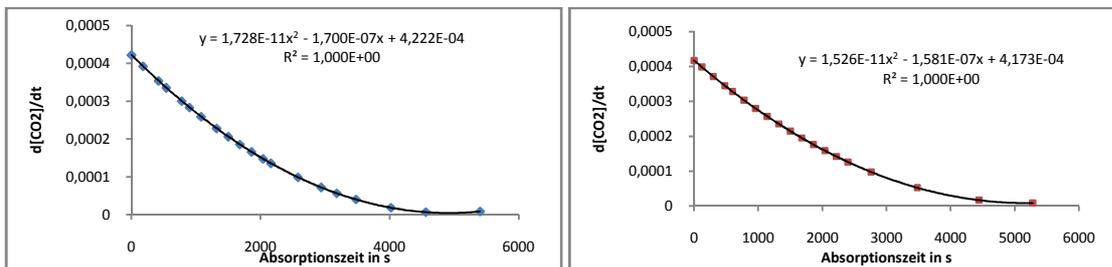


Abb. 837 Auftragung d[CO<sub>2</sub>]/dt gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

## Anhang zur Dissertation Jürgen Kurt Josef Müller

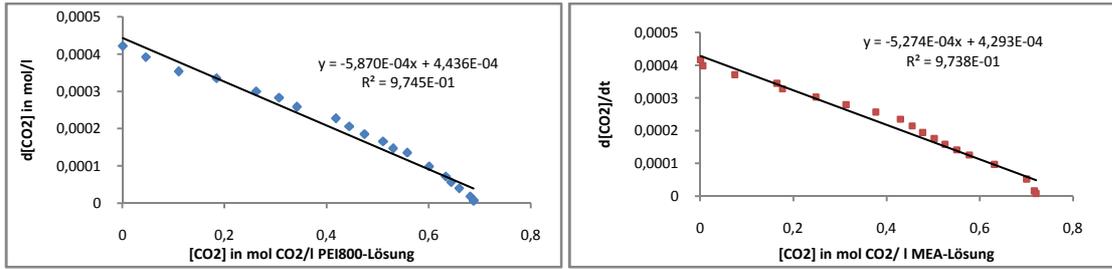


Abb. 838 Auftragung  $d[CO_2]/dt$  gegen  $[CO_2]$  bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

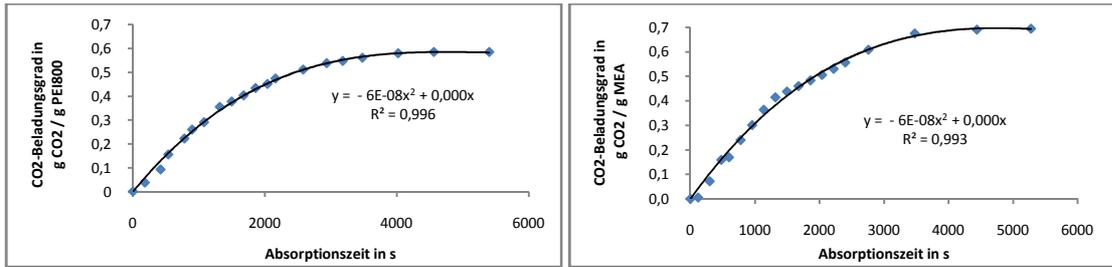


Abb. 839 Auftragung CO<sub>2</sub>-Beladungsgrad in g CO<sub>2</sub>/g Aminkomponente gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

Bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck erschöpft sich in beiden Systemen die Umsetzung von CO<sub>2</sub> bei pH 7,2

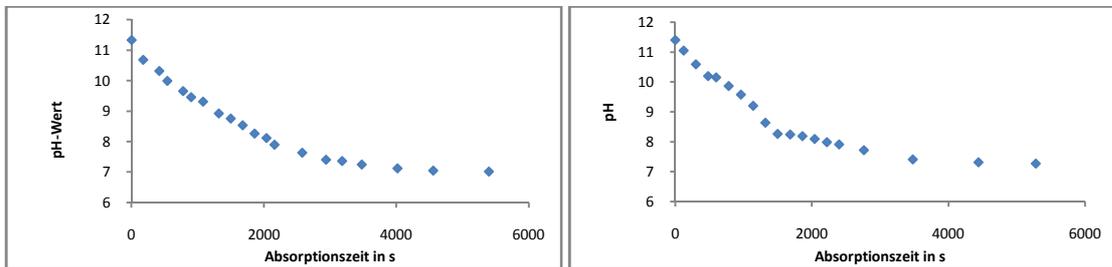


Abb. 840...Auftragung des pH gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

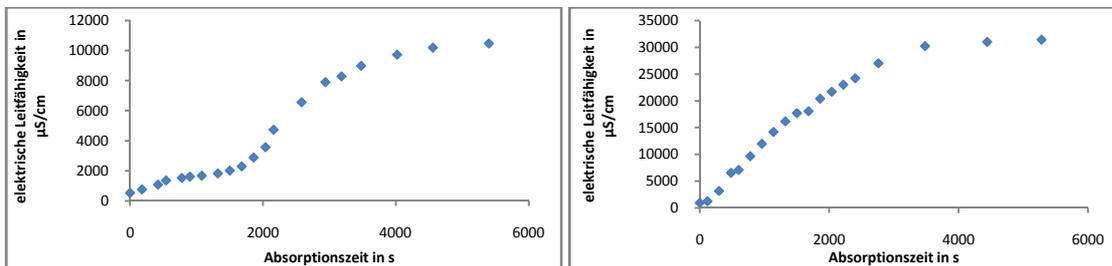


Abb. 841...Auftragung der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Absorptionszeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

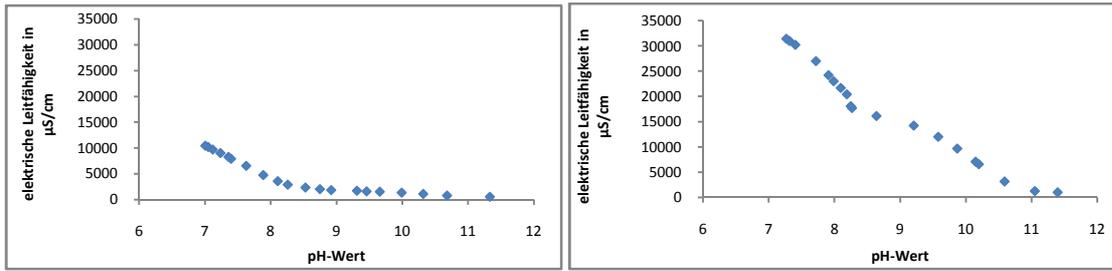


Abb. 842...Korrelation von pH und elektrischer Leitfähigkeit bei der Behandlung wässriger 5,84 m%iger PEI800- und 4,65 m%iger MEA-Lösung mit CO<sub>2</sub>

## 1.21 Energetische Bilanzierung

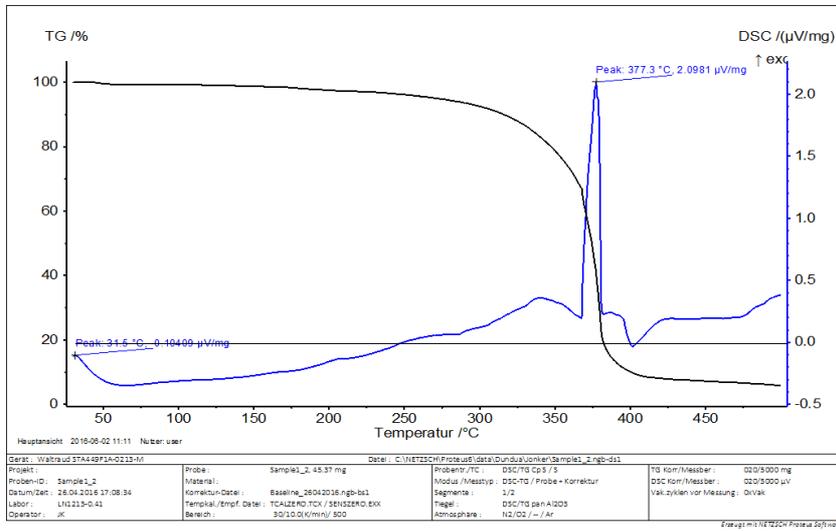


Abbildung 843 TGA und DSC von PEI800

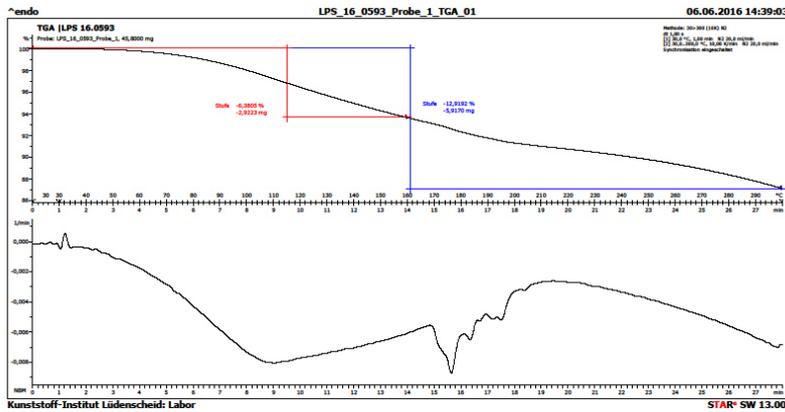


Abbildung 844 TGA von PEI800



Abbildung 847 TGA und DSC von Ethylenglykol MEG

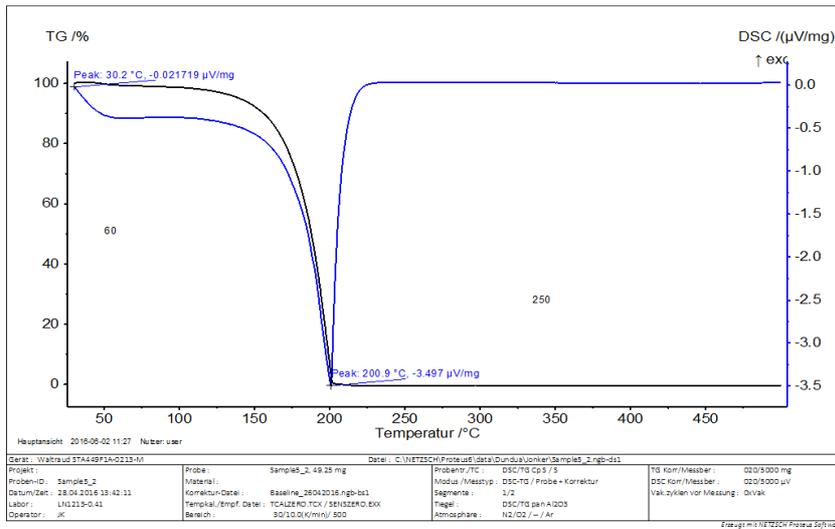


Abbildung 848 TGA und DSC von Monoethanolamin MEA

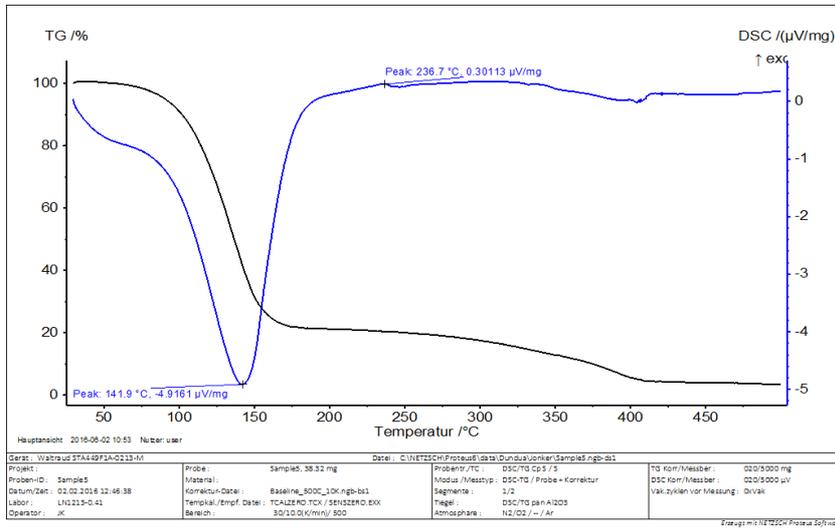


Abbildung 849 TGA und DSC von 20m%iger PEI800-Lösung in Wasser

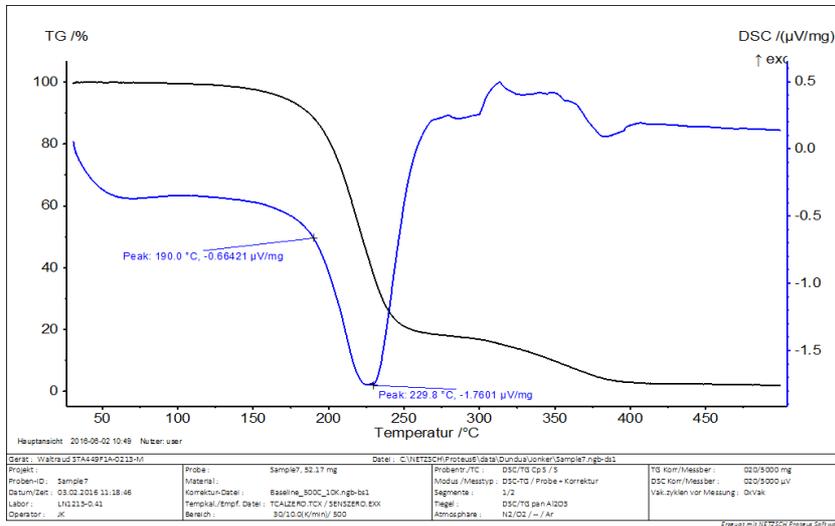


Abbildung 850 TGA und DSC von 20m%iger PEI800-Lösung in Ethylenglykol

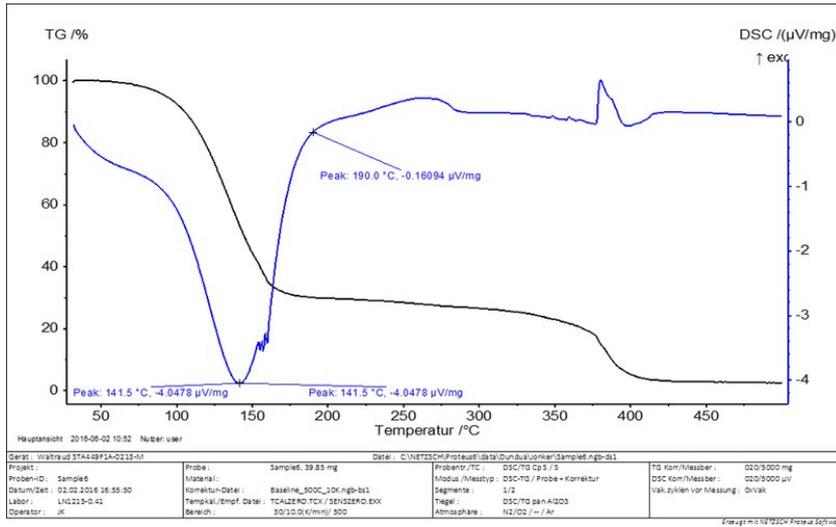


Abbildung 851 TGA und DSC von 29,5m%iger PEI800-Lösung in Wasser

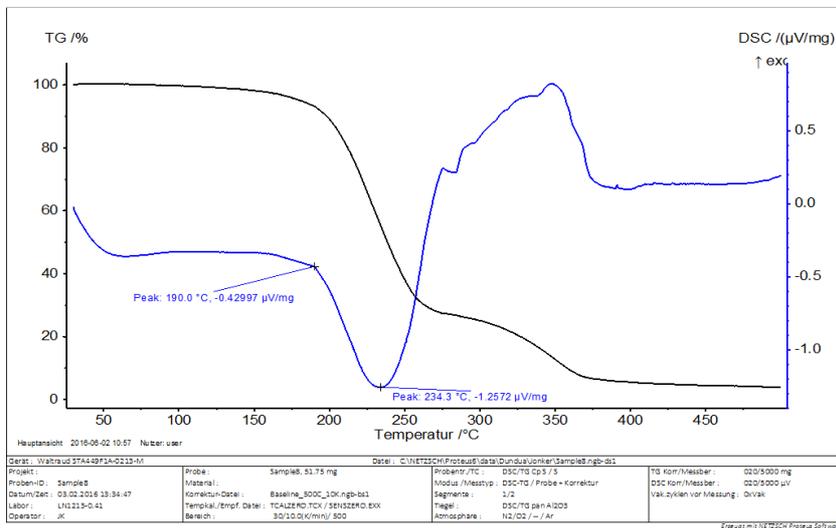


Abbildung 852 TGA und DSC von 29,5 m%iger PEI800-Lösung in Ethylenglykol

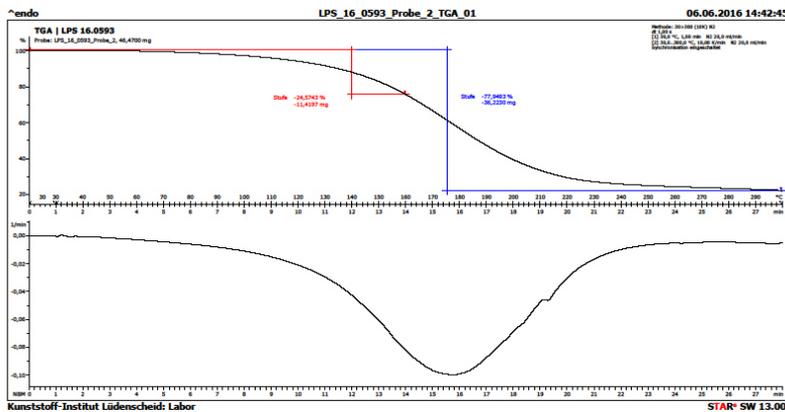


Abbildung 853 TGA und DSC von 30m%iger PEI branched(MW800)-Lösung in Ethylenglykol

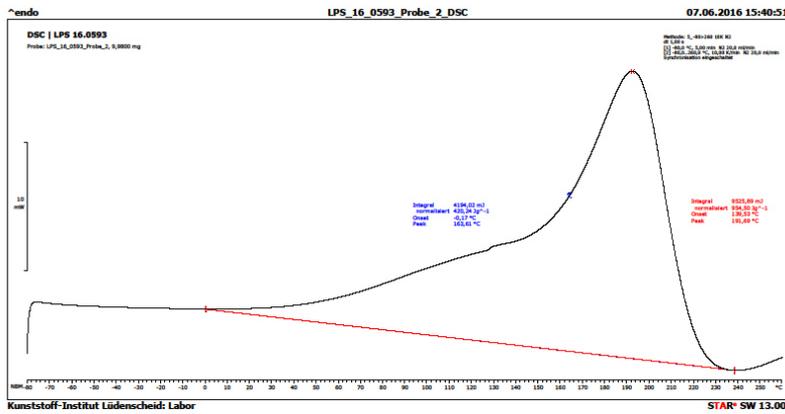


Abbildung 854 TGA und DSC von 30m%iger PEI branched(MW800)-Lösung in Ethylenglykol

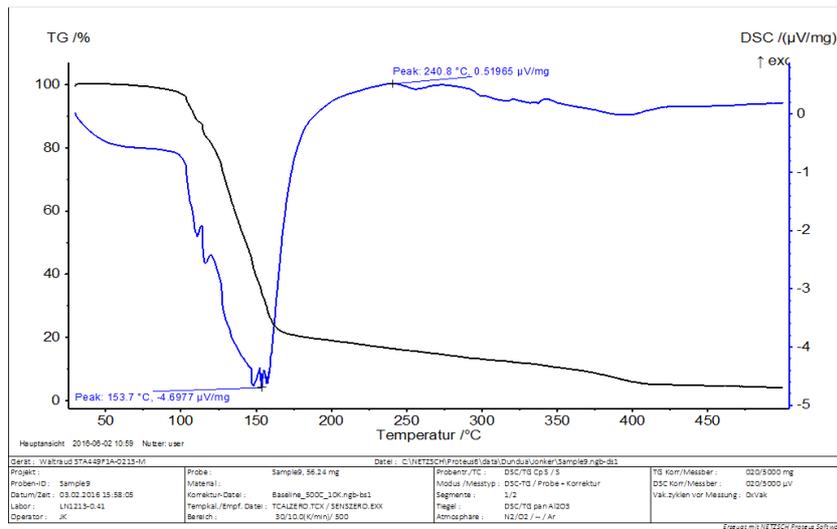


Abbildung 855 TGA und DSC von 24,79m%iger PE-Ammonium-Carbamatlösung in Wasser, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 20m%igen PEI800-Lösung in Wasser

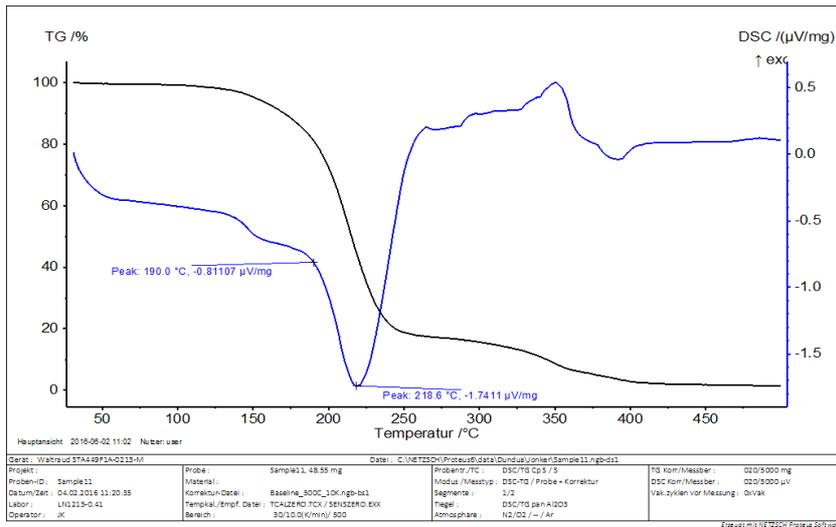


Abbildung 856 TGA und DSC von 24,79m%iger PE-Ammonium-Carbamatlösung in MEG, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 20m%igen PEI800-Lösung in Ethylenglykol

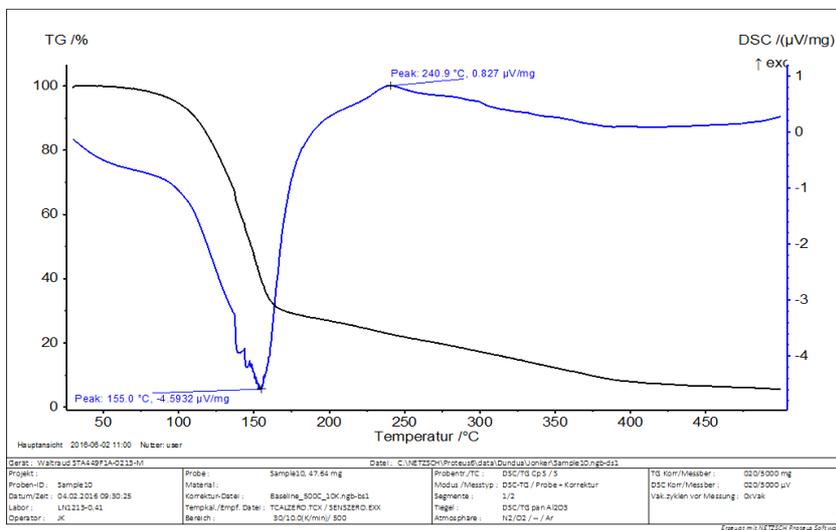


Abbildung 857 TGA und DSC von 35,55m%iger PEI-Carbamatlösung in Wasser, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 29,5m%igen PEI800-Lösung in Wasser

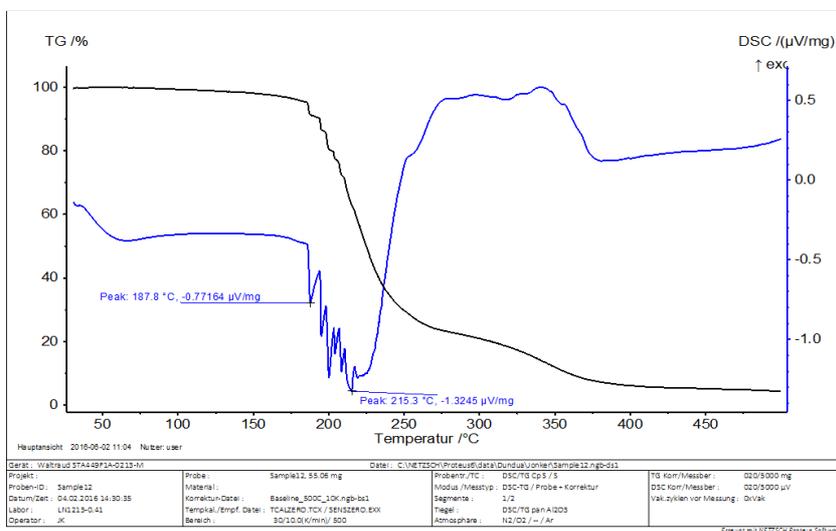


Abbildung 858 TGA und DSC von 35,55m%iger PEI-Carbamatlösung in MEG, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 29,5m%igen PEI800-Lösung in Ethylenglykol

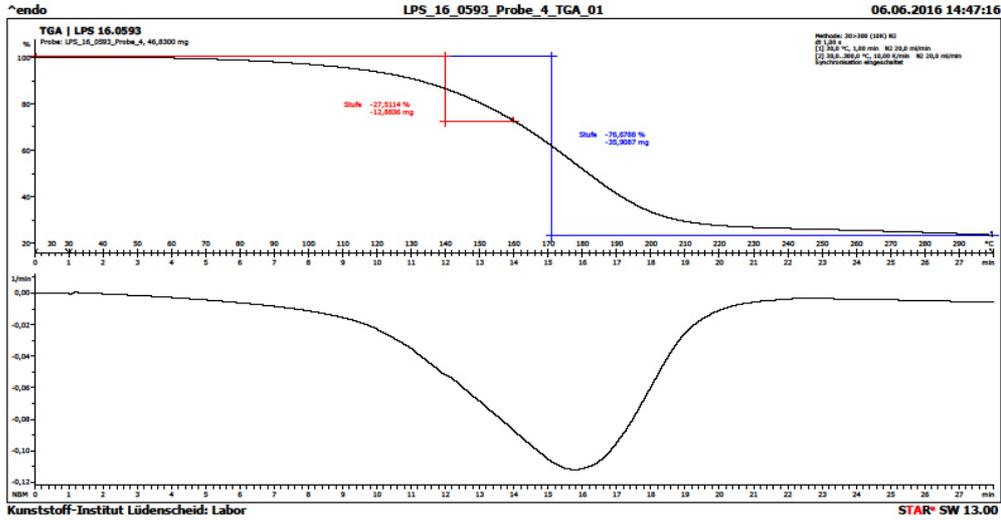


Abbildung 859 TGA von 35,55m%iger PEI-Carbamatlösung in MEG, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 29,5m%igen PEI800-Lösung in Ethylenglykol

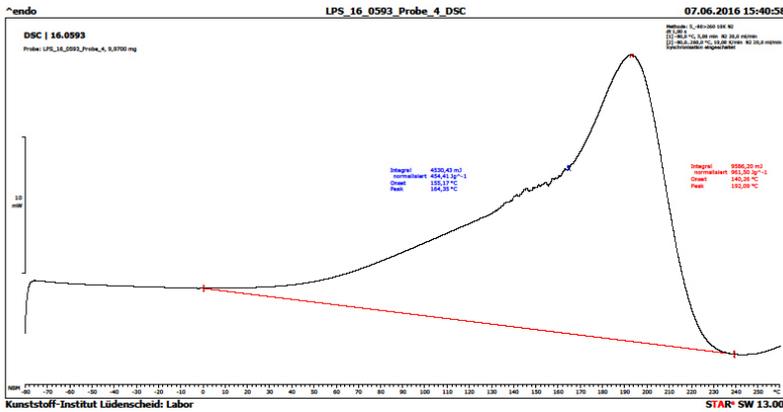


Abbildung 860 DSC von 35,55m%iger PEI-Carbamatlösung in MEG, aus einer mit CO<sub>2</sub> bis zur chemischen Sättigung behandelten 29,5m%igen PEI800-Lösung in Ethylenglykol

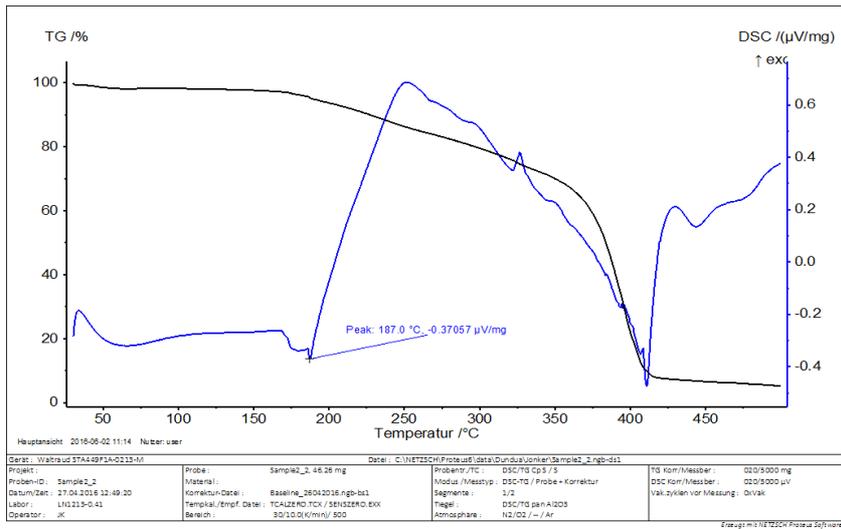


Abbildung 861 TGA und DSC von PEI-Carbamat

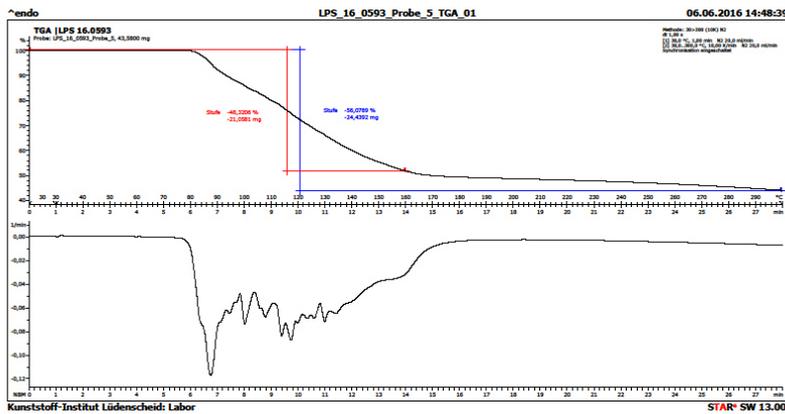


Abbildung 862 TGA von mit 10 m% Wasser konditioniertem PEI-Carbamat

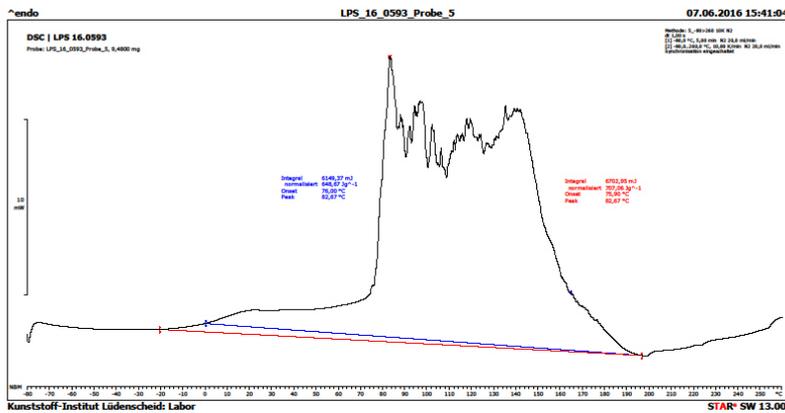


Abbildung 863 DSC von mit 10 m% Wasser konditioniertem PEI-Carbat

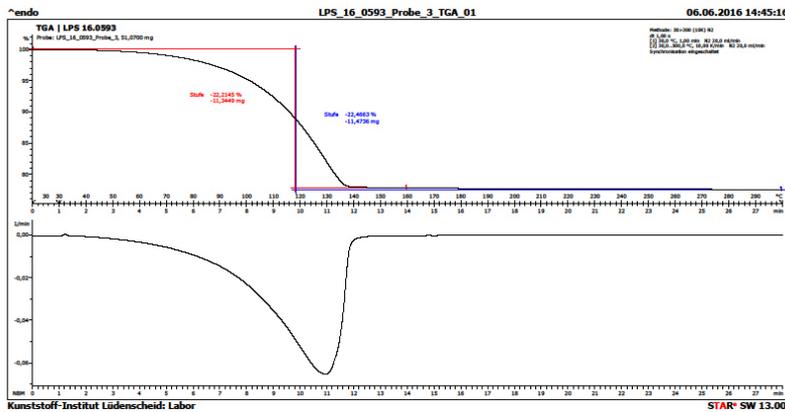


Abbildung 864 TGA von MEA-Carbat

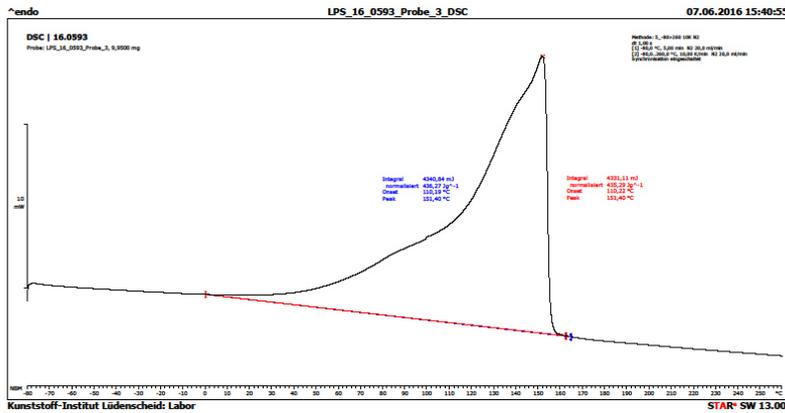


Abbildung 865 DSC von MEA-Carbat

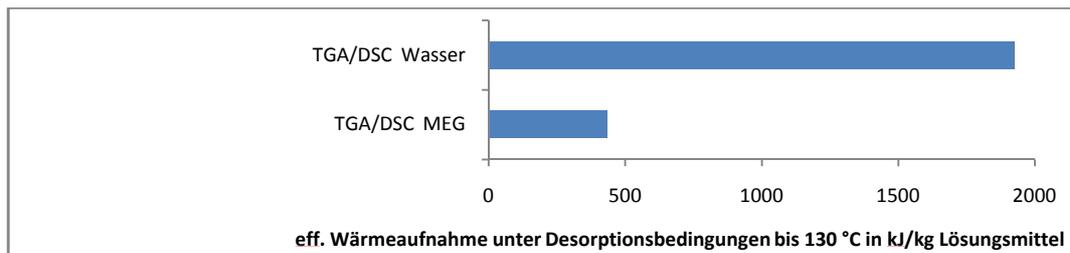


Abbildung 866 Effektive Wärmeaufnahme bei Erwärmung und partieller Verdampfung unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C der Lösungsmittel Wasser und Ethylenglykol

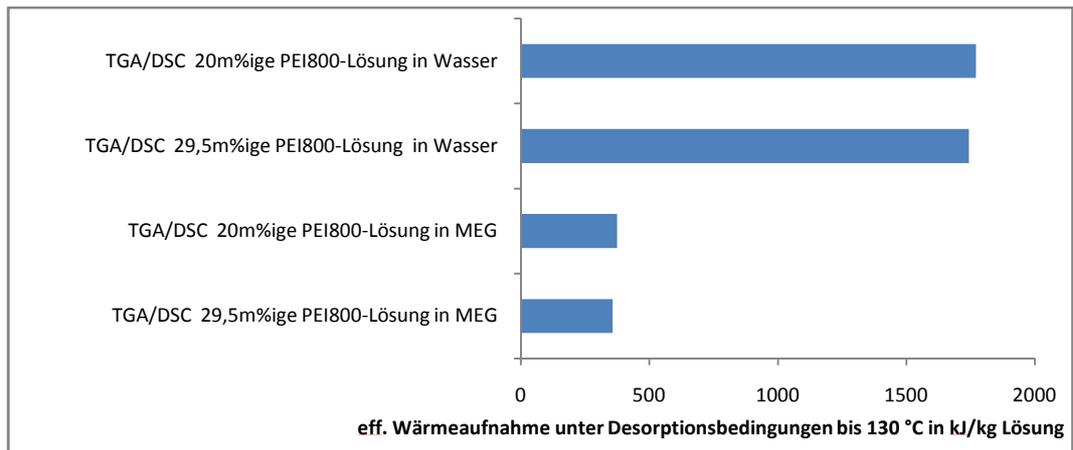


Abbildung 867 Effektive Wärmeaufnahme bei Erwärmung und partieller Verdampfung unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C von PEI800-Lösungen in Wasser und Ethylenglykol

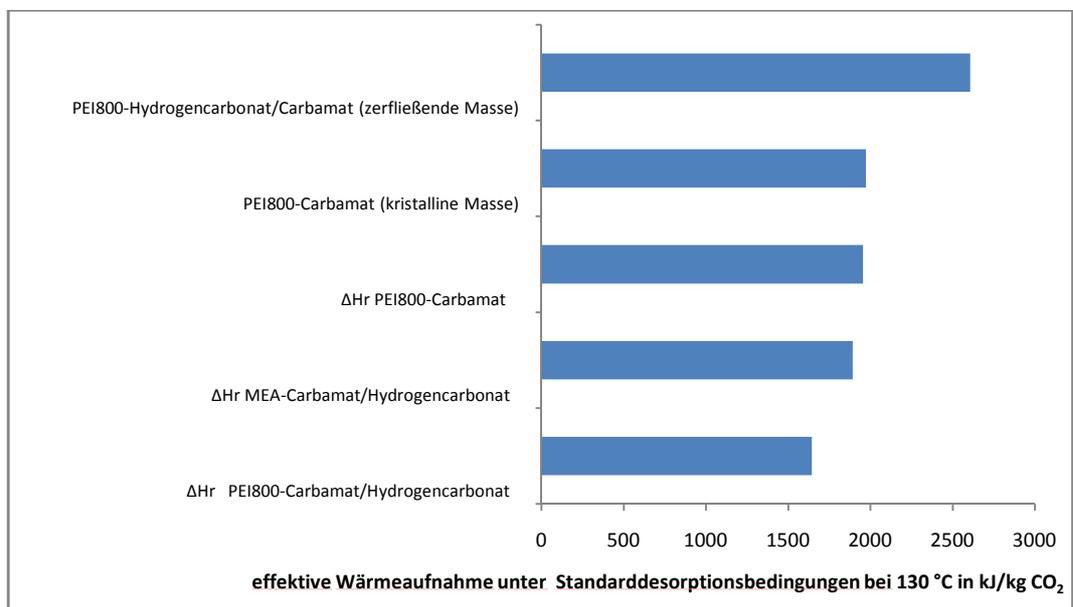


Abbildung 868 Effektive Wärmeaufnahme für die Freisetzung von CO<sub>2</sub> unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C aus MEA Hydrogencarbonat/Carbamat, PEI800-Carbamat/Hydrogencarbonat und PEI800-Carbamat

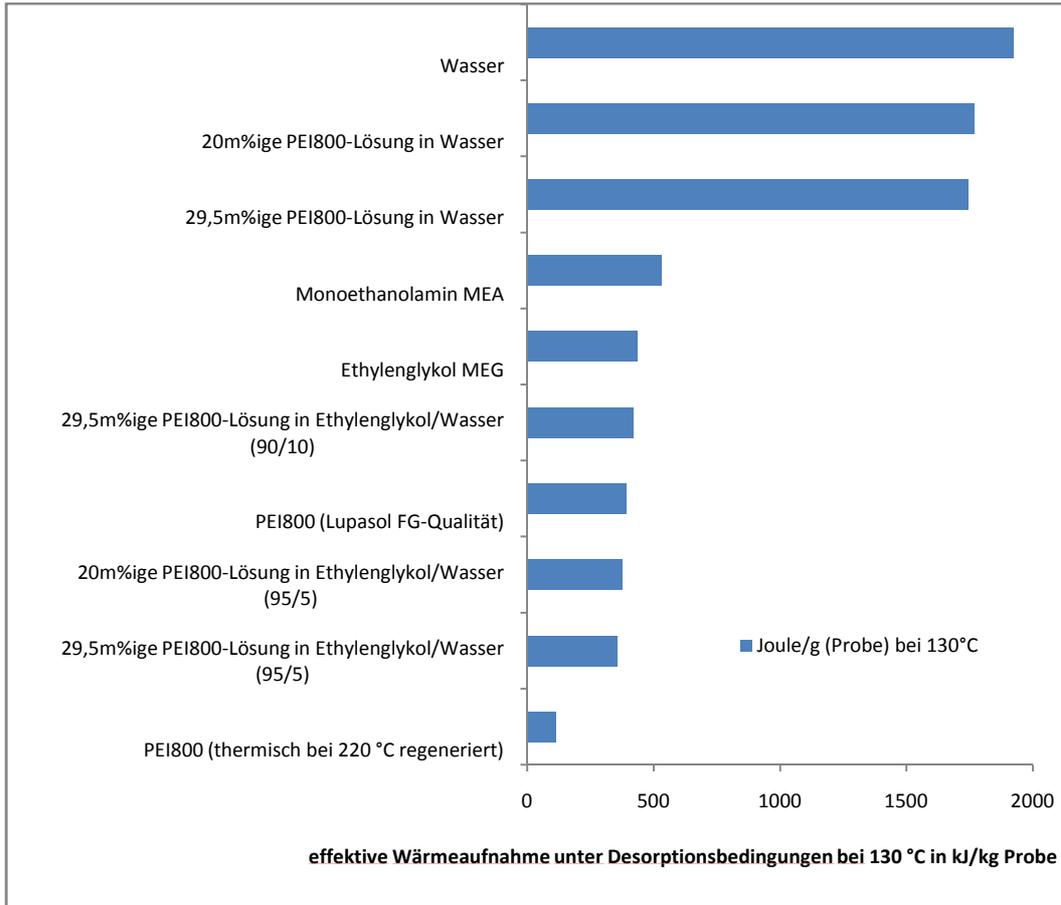


Abbildung 869 Effektive Wärmeaufnahme bei Erwärmung und partieller Verdampfung unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C von Lösungsmitteln, Aminen und Aminlösungen

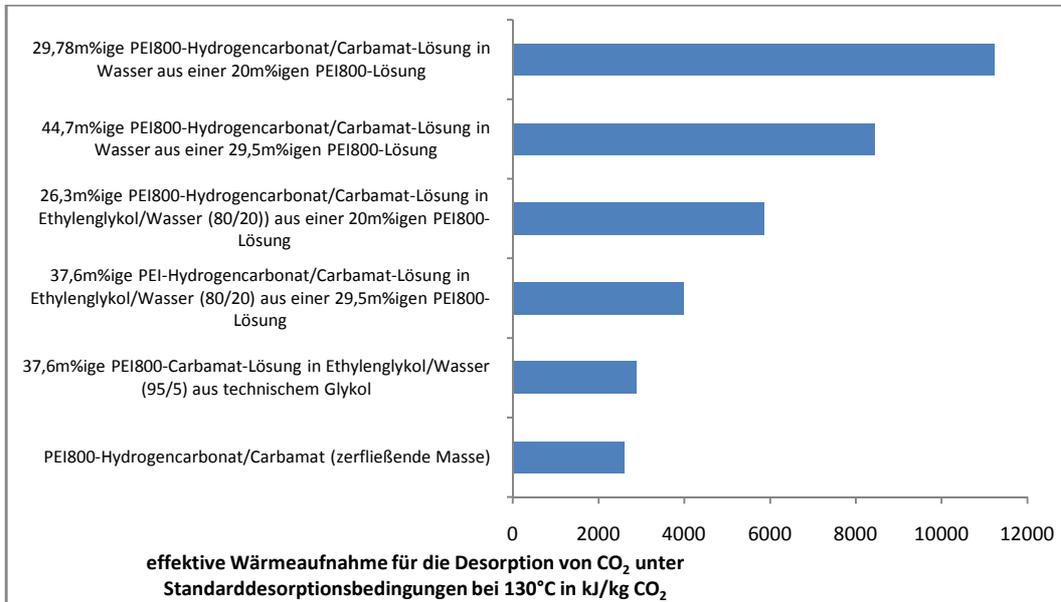


Abbildung 870 Effektive Wärmeaufnahme für die Freisetzung von CO<sub>2</sub> unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C aus CO<sub>2</sub>-gesättigten Lösungen von PEI800 in Wasser und Ethylenglykol

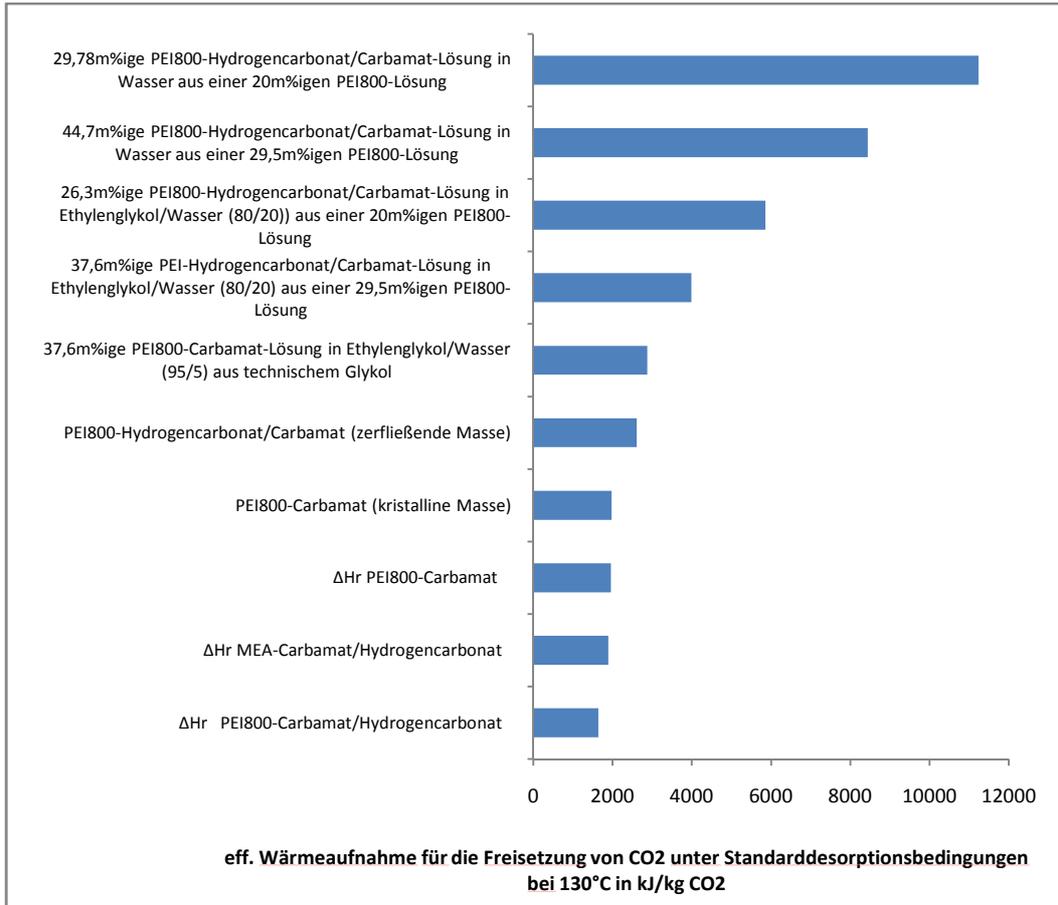


Abbildung 871 Effektive Wärmeaufnahme für die Freisetzung von CO<sub>2</sub> unter Desorptionsbedingungen bis 130 °C aus MEA Hydrogencarbonat/Carbamat, PEI800-Carbamat/Hydrogencarbonat und PEI800-Carbamat, sowie aus Lösungen dieser CO<sub>2</sub>-Adduke in Wasser und Ethylenglykol

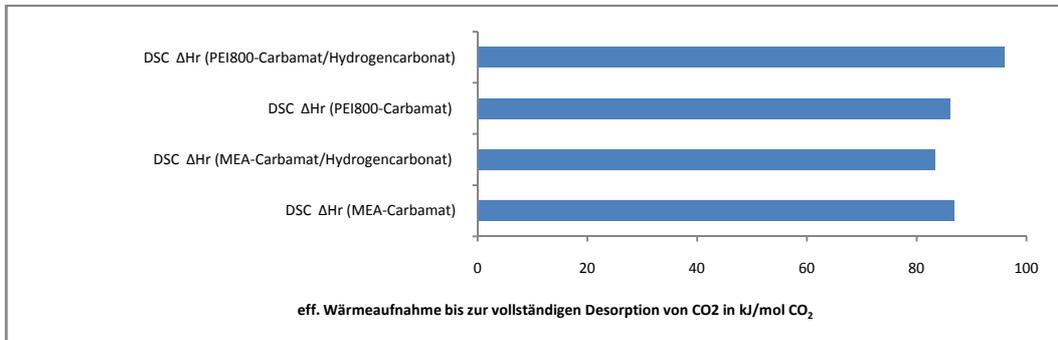


Abb. 872 DSC-Wärmeaufnahme bis zur vollständigen Desorption von CO<sub>2</sub> in kJ/mol CO<sub>2</sub>

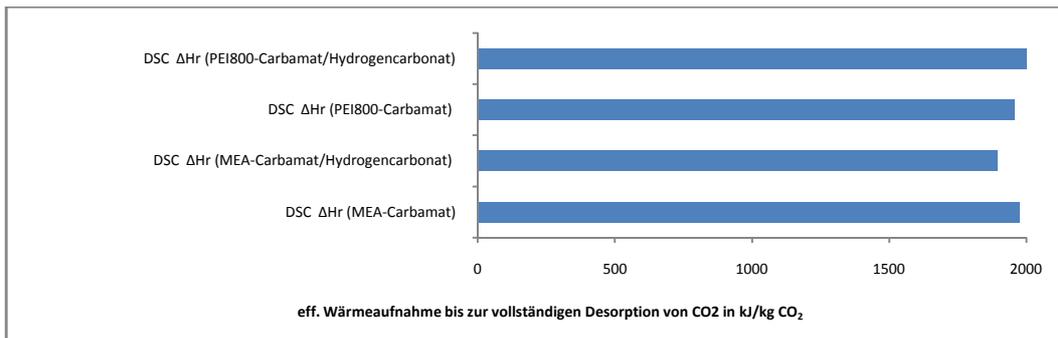


Abb. 873 DSC-Wärmeaufnahme bis zur vollständigen Desorption von CO<sub>2</sub> in kJ/kg CO<sub>2</sub>

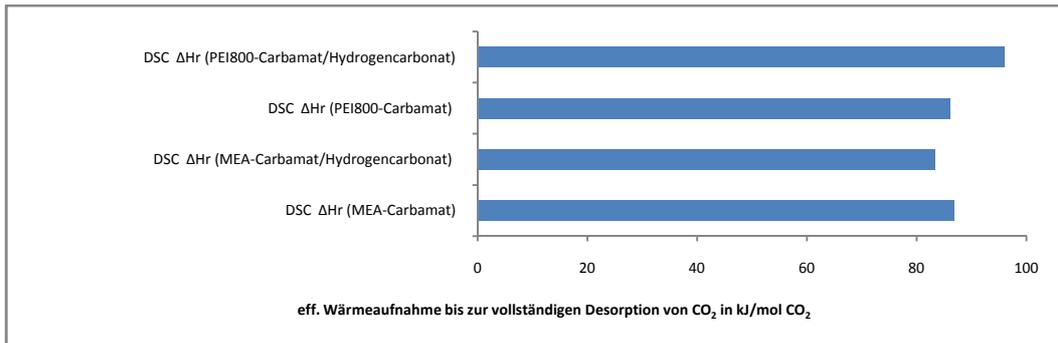


Abb. 874...Effektive DSC-Wärmeaufnahme bis zur vollständigen Desorption von CO<sub>2</sub> in kJ/mol CO<sub>2</sub>

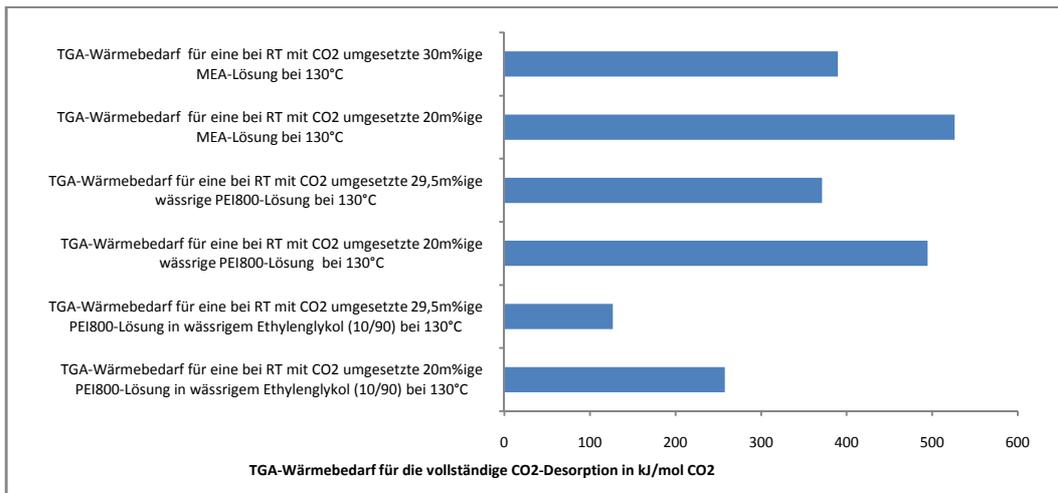


Abb. 875 Wärmebedarf für die vollständige CO<sub>2</sub>-Desorption aus mit 0,6 g CO<sub>2</sub>/g Amin beladenen 20 und 30 m%ige Amin-Lösungen in Wasser oder wässrigem MEG

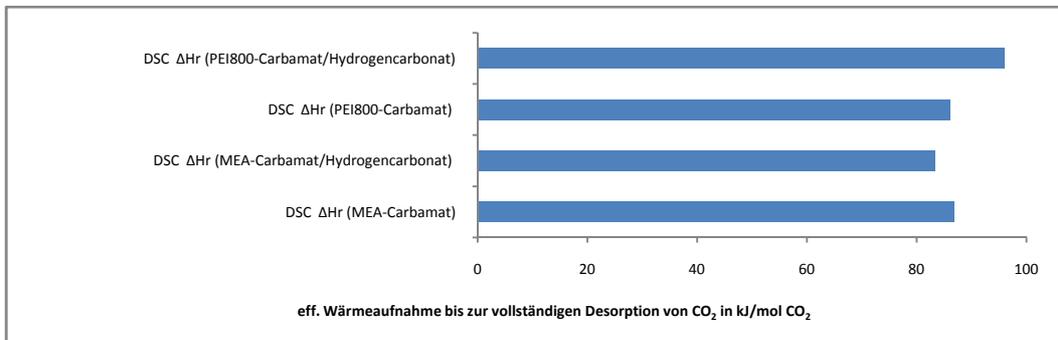


Abbildung 876 Effektive DSC-Wärmeaufnahme bis zur vollständigen Desorption von CO<sub>2</sub> in kJ/mol CO<sub>2</sub>

## 2 Literaturverzeichnis

---

- 1 Internetquelle: <http://www.chemieunterricht.de/dc2/os/os-herstellung.htm>
- 2 Internetquelle: <http://www.chemie.de/lexikon/Methanhydrat.html>
- 3 Mukhamedzyanov G.Kh. / Ein Gerät zur Bestimmung der Dichte und der Viskosität von flüssigen organischen Verbindungen bei Drücken bis 250 MPa und Temperaturen bis 473 K / *Oniitekchim* / (1982) 1-30
- 4 Shakhparonov M.I./ Akustische Relaxation in Ethylenglykol-n-Hexanol-Lösungen / *Vestn.Mosk.Univ.Ser.2 Khim.* / (1973) 14, 296-298]
- 5 Singh W. / Speeds of Sound and Viscosities in Aqueous Poly(ethylene glycol) Solutions at 303.15 and 308.15 K / *J.Chem.Eng.Data* / (1997) 42, 234-237]
- 6 Usmanov A.G. / Molekulardiffusionskoeffizienten und andere Eigenschaften binärer Lösungen von einigen flüssigen organischen Verbindungen / *Izv.Vyssh.Uchebn.Zaved.Khim.Khim.Tekhnol.* / (1982) 25, 182-186
- 7 D'Ans-Lax / Taschenbuch für Chemiker und Physiker / Bd.1, 3.Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg, 1967
- 8 Shakhparonov M.I. / Akustische Relaxation in tert-Butanol und binärer tert-Butanol-Ethylenglykol-Lösungen / *Akust.Zh.* / (1973) 19, 448-450]
- 9 Ernsting N.P. / Competition between Geminate Recombination and Solvation of Polar Radicals Following Ultrafast Photodissociation of bis(p-Aminophenyl)Disulfide / *J.Phys.Chem.* / (1996) 100, 19417-19424
- 10 Kharitonov G.V. / Dichte und Viskosität von binären Ethylenglykol - N,N-Dimethylformamid- und Ethylenglykol - gamma-Butyrolacton-Mischungen. *Izv.Vyssh.Uchebn.Zaved.Khim.Khim.Tekhnol.* / (1987) 30, 35-38
- 11 [Kharitonov G.V.: Dichte und Viskosität der binärer Systeme N,N-Dimethylacetamid mit Ethylenglykol und gamma-Butyrolacton. *Oniitekchim* (1985) 1-9
- 12 Internetquelle / [http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser\\_eigenschaften.html](http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html)
- 13 [www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf)
- 14 Internetquelle: <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf> · PDF Datei,
- 15 Internetquelle: [http://www.glykol-sole.de/Downloaddateien/Glykosol\\_N\\_20seiten\\_deu.pdf](http://www.glykol-sole.de/Downloaddateien/Glykosol_N_20seiten_deu.pdf).09.03.2017
- 16 Hayduk W., Malik V. K. /Density, Viscosity, and Carbon Dioxide Solubility and Diffusivity in Aqueous Ethylene Glycol Solutions/*Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 16, (1971)No. 2
- 17 Villamanan M.A., Gonzales C., van Ness H.C. / Excess Thermodynamic Properties for Water/Ethylene Glycol / *Chemical and Environmental Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute/ Journal Chem. Eng. Data* (1984) 29, p 427-429

- 18 Popov A.A. / Gleichgewicht in flüssigen Mischungen und Lösungen. I. Siedetemperaturen und Dampfzusammensetzung wässriger Ethylenglykol-Lösungen. Zh.Prikl.Khim. 7 (1934) 489-494
- 19 Binary Vapor-Liquid Equilibrium Data / Chemical Engineering Research Information Center. Retrieved 8 June 2007
- 20 Tan Z. / Calorimetric investigation of excess molar heat capacities for water + ethylene glycol from  $T = 273.15$  to  $T = 373.15$  K / J.Chem.Thermodyn. 34 (2002) 915-926
- 21 Bohne D., Fischer S., Obermeier E. / Thermal Conductivity, Density, Viscosity, and Prandtl-Number of Ethylene Glycol-Water Mixtures / Ber. Bunsenges. Phys. Chem. (1984) 88, 739-742
- 22 Fogg E. D., Hixson A. N., Thompson A. R. / Densities and Refractive Indexes for Ethylene Glycol-Water Solutions / Analytical Chemistry, Volume 27, No. 10, (Oktober 1955) pp 1609 – 1611
- 23 Arachchige U. S. P. R., Aryal N., Eimer D. A., Melaaen M. C. / Telemark University College, Porsgrunn, 3901, Norway / Viscosities of Pure and Aqueous Solutions of Monoethanolamine (MEA), Diethanolamine (DEA) and N-Methyldiethanolamine (MDEA) / Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, (2013) Vol. 21
- 24 Internetquelle: <https://www.dow.com/amines/prod/ethano.htm>
- 25 Zhenyun C., Rongjing X., Zhaoli W. / Binary Isobaric Vapor-Liquid Equilibria of Ethanolamines AND Water / Department of Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, P. R. China / J. Chem. Eng. Data (1996), 41, 1101-1103
- 26 Kim I., Svendsen H. F., Børresen E. / Ebulliometric Determination of Vapor-Liquid Equilibria for Pure Water, Monoethanolamine, N -Methyldiethanolamine, 3-(Methylamino)-propylamine, and Their Binary and Ternary Solutions / J. Chem. Eng. Data, 53 (2008), 11, 2521-2531
- 27 Haynes, W. M. (ed.). / CRC Handbook of Chemistry and Physics / 95th Edition. CRC Press LLC, Boca Raton: FL 2014-2015, p. 6-137
- 28 Internetquelle: <https://www.dow.com/amines/prod/ethano.htm> / DOW Ethanolamines Overview Brochure (PDF)
- 29 Nelson R. A., Jessup R. S. / Heats of combustion and formation of liquid ethylenimine / J. Res. NB (1952) 48, 206-208
- 30 Good W. D., Moore R. T. / Enthalpies of formation of ethylenediamine, 1,2,-propanediamine, 1,2,-butanediamine, 2-methyl-1,2-propanediamine, and isobutylamine C-N and N-F Thermochemical bond energies / J. Chem. Eng. Data (1970) 15, 150-154
- 31 Gutner N. M., Lebedeva N. D., Kiseleva N. N. / Enthalpies of combustion and formation of some acyl-substituted diamines / Termodin. Org. Soedin. (1979) 97-98

