

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Entwicklung und Aufgabenstellung der Technischen Umweltchemie | 1 |
| 1.1 | Geschichte der Umweltchemie | 1 |
| 1.1.1 | Chemie als Quelle umweltwissenschaftlicher Erkenntnisse | 2 |
| 1.1.2 | Chemisch-physikalische Analytik, Modellbau und ökotoxikologische Verfahren in den integrativen Umweltwissenschaften | 7 |
| 1.1.3 | Stoffe und Quellen | 14 |
| 1.1.4 | Transport und Umwandlung von Umweltchemikalien | 20 |
| 1.1.5 | Reaktion und Wirkung | 22 |
| 1.1.5.1 | Geschichte der QSAR-Ansätze | 24 |
| 1.1.5.2 | Lipophilie, Anreicherung und Toxizität: Wirkprinzip und Schadensursache bei Organozinnverbindungen | 24 |
| 1.1.5.3 | Der Schwermetallbegriff und seine chemisch-toxikologischen Folgerungen | 25 |
| 1.1.5.4 | QSAR, Pharmakologie und umweltchemische Anwendungen der Reaktionsprinzipien | 26 |
| 1.1.6 | Biogeochemie und Umweltwissenschaften | 27 |
| 1.1.6.1 | Leben als determinierender Faktor geochemischer Prozesse | 27 |
| 1.1.6.2 | Bedingungen und Essentialität | 32 |
| 1.1.7 | Von der Spurenanalytik zum Prozessverständnis | 36 |
| 1.1.8 | Kybernetische Modellkonzepte in Chemie und Ökologie | 38 |
| 1.1.9 | Ausblick für zukünftige Lehre und Forschung in den Umweltwissenschaften | 40 |
| 1.2 | Aufgabenstellung der Technischen Umweltchemie | 41 |
| 2 | Struktur und Funktion der irdischen Umweltkompartimente | 45 |
| 2.1 | Die Erde im Vergleich zu anderen Körpern des Sonnensystems | 45 |
| 2.2 | Eigenschaften und Reinigungsoptionen der irdischen Umweltkompartimente | 48 |
| 2.2.1 | Luft | 49 |
| 2.2.1.1 | Reaktorkonzept und Atmosphäre | 49 |
| 2.2.1.2 | Struktur und Schichtung der Atmosphäre | 52 |
| 2.2.1.3 | Das Reaktorprinzip der Atmosphäre: die Rolle hoch reaktiver Spezies | 55 |
| 2.2.1.4 | Chemische Besonderheiten: saure und gut wasserlösliche Atmosphäregase | 56 |
| 2.2.1.5 | Luft als Mehrphasensystem | 59 |
| 2.2.1.6 | Katalytische Prozesse in der Atmosphäre | 60 |
| 2.2.1.7 | Chemische Reaktivität, Partikelwachstum und Fällung aus der Atmosphäre | 63 |
| 2.2.1.8 | Schlussfolgerungen der Luftreinhaltung | 63 |
| 2.2.2 | Wasser | 64 |
| 2.2.2.1 | Wasser als Medium: Dichte, optische und thermische Eigenschaften und Einflüsse auf die Biologie | 65 |
| 2.2.2.2 | Chemische Eigenschaften und deren Varianz | 67 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.2.3 | Wasser als Mehrphasensystem | 68 |
| 2.2.2.4 | Süßwasser, Meerwasser, osmotischer Druck, Redoxzustände und Biologie | 69 |
| 2.2.2.5 | Nichtgleichgewichtszustände zwischen unterschiedlichen Wasserzonen oder -schichten als Triebkraft für Chemie, Biologie und Stoffabscheidung | 72 |
| 2.2.2.6 | Biogeochemische Kreisläufe in Wasser, Stöchiometrische Ökologie und Auslegung/Prozessführung biotechnologischer Wasserreinigungssysteme | 73 |
| 2.2.3 | Boden und Grundwasserleiter | 75 |
| 2.2.3.1 | Boden als Mehrphasensystem | 77 |
| 2.2.3.2 | Wichtige chemische Eigenschaften von Böden | 78 |
| 2.2.3.3 | Boden als Bioreaktor | 79 |
| 2.2.3.4 | Gradientenbildung im Boden | 79 |
| 2.2.3.5 | Störungen der Bodenentwicklung | 81 |
| 2.2.3.6 | Schlussfolgerungen für die Bodensanierung | 82 |
| 2.2.4 | Vergleich der Umweltkompartimente: Phasenzusammensetzung, Mischbarkeit mit bestimmten Reaktanden oder Kontaminanten, Lichtdurchlässigkeit, biologische Aktivität | 86 |

3 Grundlagen und Konzepte der Technischen Umweltchemie

91

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1 | Was heißt Abbau von Schadstoffen? | 91 |
| 3.2 | Chemische Basiskonzepte | 98 |
| 3.2.1 | Fällung, Adsorption, Immobilisierung | 99 |
| 3.2.2.1 | Fällung | 100 |
| 3.2.1.2 | Adsorption | 102 |
| 3.2.1.3 | Immobilisierung | 103 |
| 3.2.2 | Redoxpotenzial, Pourbaix-Diagramme und Speziation | 104 |
| 3.2.3 | Reaktionskinetik, Hammett-Gleichung | 113 |
| 3.2.3.1 | Voraussetzungen für Beziehungen zwischen Ladungseffekten und der Reaktionskinetik ganzer Moleküle | 113 |
| 3.2.3.2 | Chemische Eigenschaften von Aromaten | 114 |
| 3.2.3.3 | Kinetische Modellansätze für Reaktionen gesättigter Kohlenwasserstoffe: die Taft-Gleichung | 120 |
| 3.2.3.4 | Praxisbeispiele aus der Technischen Umweltchemie: Verteilung der Reaktionen von Aromaten und ihrer Folgeprodukte zwischen Luft und Wasser | 120 |
| 3.2.4 | Aktivierungsbarriere und Katalyse | 122 |
| 3.2.4.1 | Abstoßung zwischen Molekülen und Reaktionskinetik | 122 |
| 3.2.4.2 | Kinetik, Katalyse, Gleichgewicht | 123 |
| 3.2.4.3 | Homogene und heterogene Katalyse | 125 |
| 3.2.5 | Fließgleichgewicht und Prozessführung | 128 |
| 3.2.5.1 | Gleichgewicht, Gleichgewichtskonstante und Reaktionskinetik | 128 |
| 3.2.5.2 | Vom Gleichgewicht zum Fließgleichgewicht: Folgen der Stoffzu- und -abfuhr | 128 |
| 3.2.5.3 | Nichtlineare Kinetik in Durchflusssystemen | 130 |
| 3.2.5.4 | Fließgleichgewichte in der Biologie, Biomimetik | 130 |
| 3.2.5.5 | Der schwere Weg zum Fließgleichgewicht | 132 |
| 3.3 | Implikationen der chemischen Prinzipien | 132 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.4 | Verfahren der Technischen Umweltchemie | 135 |
| 3.4.1 | Prozesse als Funktion von Redoxpotenzial und Anregungsenergie | 135 |
| 3.4.2 | Reduktionsprozesse | 142 |
| 3.4.2.1 | Reduktionen mit niedrigerer Aktivierungsenergie (thermochemisch) | 142 |
| 3.4.2.1.1 | Reduktionen mit solvatisierten Elektronen | 142 |
| 3.4.2.1.2 | Adsorptive und heterogenkatalytische Verfahren in der Rauchgasreinigung | 143 |
| 3.4.2.2 | Katalytische Reduktion | 143 |
| 3.4.2.2.1 | Neue Wege katalytischer Denitrifizierung/Entschwefelung | 143 |
| 3.4.2.2.2 | Katalytische Enthalogenerung mit kathodisch gebildetem Wasserstoff an Platinmetallen oder Raney-Nickel | 144 |
| 3.4.2.3 | Reduzierende Prozesse mit hoher Aktivierungsenergie | 145 |
| 3.4.3 | Oxidationsvorgänge | 145 |
| 3.4.3.1 | Das Fenton-System: reduziertes Metallion [Fe(II), Ti(III)] in Kombination mit Wasserstoffperoxid | 145 |
| 3.4.3.2 | Oxidation mit/in überkritischem Wasserdampf | 146 |
| 3.4.3.3 | Elektrochemische Oxidation organischer Substrate an bestimmten Oxidelektroden („elektrochemische Verbrennung“) und in Schlämmen (Abbau von Organozinnverbindungen) | 147 |
| 3.4.3.4 | Katalytische Oxidationen durch Oxide in Kombination mit Wasserstoffperoxid oder Sauerstoff | 148 |
| 3.4.4 | Oxidationen mit hoher Energiezufuhr: photochemische und andere Prozesse, Advanced Oxidation Procedures | 148 |
| 3.4.4.1 | AOPs mit wässrigem Ozon | 149 |
| 3.4.4.2 | Photohydrolyse von halogenierten Aromaten | 149 |
| 3.4.4.3 | Photochemische Oxidation von Schadstoffen durch $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^{2+}$ | 150 |
| 3.4.4.4 | Direktphotolyse von Wasser im extremen UV | 151 |
| 3.4.4.5 | Glimmentladungselektrolyse | 152 |
| 3.4.4.6 | Photolyse bioinert organischer Substanz nach Koordination (EDTA, Pestizide) | 152 |
| 3.4.4.7 | Photoelektrochemie | 153 |
| 3.4.5 | Reaktionen ohne Redoxprozesse | 154 |
| 3.4.5.1 | Fällungsreaktionen | 154 |
| 3.4.5.1.1 | Mitfällung und Seensanierung | 154 |
| 3.4.5.1.2 | Suspensionsbildung und Koagulation | 155 |
| 3.4.5.1.3 | Bindung an Biomasse | 155 |
| 3.4.5.2 | Nichtchemische elektrische Verfahren | 156 |
| 3.4.6 | Praxisbeispiele aus der Technischen Umweltchemie | 156 |
| 3.4.6.1 | Praxisbeispiel 1: Dreiwegekatalysator in Ottomotor-Kfz | 156 |
| 3.4.6.2 | Praxisbeispiel 2: Funktionsweise einer Kläranlage | 159 |
| 3.4.6.3 | Praxisbeispiel 3: Nutzung nichtklassischer Energiequellen in der umwelttechnischen Praxis. Sonochemische Verdichtung von Schlämmen | 163 |
| 3.4.6.4 | Praxisbeispiel 4: Wasserreinigung durch Glimmentladungselektrolyse | 164 |
| 4 | Fallstudien | 167 |
| 4.1 | Reaktive Wände | 168 |
| 4.1.1 | Problemstellung | 168 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.1.2 | Wirkprinzipien und Lösungen | 168 |
| 4.1.2.1 | Zementation | 169 |
| 4.1.1.2 | Redoxbedingte Alkalifällung | 173 |
| 4.1.2.3 | Defunktionalisierung durch Reduktion | 174 |
| 4.1.3 | Praxisbeispiel | 174 |
| 4.1.4 | Fazit | 178 |
| 4.2 | Fernhaltung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre nach Verbrennungsprozessen | 178 |
| 4.2.1 | Problemstellung | 178 |
| 4.2.2 | Wirkprinzipien und Lösungen | 181 |
| 4.2.3 | Praxisbeispiel | 186 |
| 4.2.4 | Fazit | 189 |
| 4.3 | Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) – Stoffeigenschaften, Persistenz und Beseitigung | 190 |
| 4.3.1 | Problemstellung | 190 |
| 4.3.1.1 | Anwendungsbereiche und -mengen von EDTA | 190 |
| 4.3.1.2 | Der Stoff und seine Eigenschaften: ein Komplexbildner als ökotoxikologisches Problem | 192 |
| 4.3.2 | Wirkprinzipien und Lösungen | 194 |
| 4.3.3 | Praxisbeispiel | 200 |
| 4.3.4 | Fazit | 200 |
| 4.4 | Reinigung der festen Bodenphase: Bodenwäsche | 201 |
| 4.4.1 | Problemstellung | 201 |
| 4.4.1.1 | Anwendungskriterien der Bodenwäsche | 201 |
| 4.4.1.2 | Indikationen der Bodenwäsche: Emissionen aus dem Untergrund in Siedlungsbereiche | 202 |
| 4.4.2 | Wirkungsprinzipien und Lösungen | 203 |
| 4.4.2.1 | Vergleich zwischen Boden- und Textilwäsche und deren Wirkprinzipien | 203 |
| 4.4.2.2 | Extraktion mit Tensidlösungen | 205 |
| 4.4.2.3 | Extraktion mit unpolaren oder unkonventionellen Lösungsmitteln | 205 |
| 4.4.2.4 | Extraktion metallhaltiger Fraktionen mithilfe von Komplexbildnern | 207 |
| 4.4.2.5 | Oxidative Bodenwäsche: Abbau organischer Kontaminanten mit Reagenzien wie Wasserstoffperoxid | 207 |
| 4.4.2.6 | Enzymatische/biotechnologische Reinigungsvorgänge und „natural attenuation“ | 207 |
| 4.4.2.7 | Kontrollierte Sorption in Zeolithen und Tonmineralien | 208 |
| 4.4.2.8 | Aufarbeitung der belasteten Waschlauge | 208 |
| 4.4.2.9 | Nebenwirkungen und -reaktionen: Zerstörung der Bodenhorizontschichtung und dadurch bedingter chemischer Gradienten | 209 |
| 4.4.3 | Praxisbeispiel | 209 |
| 4.4.4 | Fazit | 210 |
| 4.5 | Metadatenbanken und GIS als technische Unterstützung der stofflichen Expositions- und Wirkungsanalyse in der Umweltbeobachtung | 211 |
| 4.5.1 | Problemstellung | 211 |
| 4.5.1.1 | Räumliche Differenzierung bedingt umweltchemische Effekte und erschwert ihre Analyse | 211 |
| 4.5.1.2 | Historische Entwicklung und offene Probleme: mangelnde Koordination und Datenkohärenz | 212 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4.5.2 | Methodik und Lösungsansatz | 212 |
| 4.5.2.1 | Gliederung der einschlägigen Umweltwissenschaften, Art und Gewinnung der Basisdaten | 212 |
| 4.5.2.2 | Landschaftsökologische Raumlagerung | 214 |
| 4.5.2.3 | Erhebung und Analyse von Metadaten über Umweltmessnetze in Baden-Württemberg | 215 |
| 4.5.2.4 | Landschaftsrepräsentanz der Messstellen | 218 |
| 4.5.2.5 | Geostatistische Messdatenanalyse | 219 |
| 4.5.3 | Praxisbeispiele | 220 |
| 4.5.3.1 | Praxisbeispiel 1: Medienübergreifende Umweltbeobachtung in Baden-Württemberg | 220 |
| 4.5.3.2 | Praxisbeispiel 2: Lokalisierung von Flächen mit hohem Metallein- und -austrag | 223 |
| 4.5.4 | Fazit | 224 |
| 4.6 | Phytoremediation – Möglichkeiten zur Entfernung von Mikroschadstoffen mit Verfahren der naturnahen Abwasserreinigung | 227 |
| 4.6.1 | Problemstellung | 227 |
| 4.6.2 | Der Bio-Park Föhlinger See | 229 |
| 4.6.2.1 | Struktur des „Bio-Park Föhlinger See“ | 230 |
| 4.6.2.2 | Funktion der Pilot-Anlage | 231 |
| 4.6.3 | Bepflanzter Bodenfilter im Ablaufbereich der Abwasserteichanlage der Gemeinde Berg, Ortsteil Mörlbach | 234 |
| 4.6.4 | Phytoremediation – Neue Aufgaben für alte Stoffwechsellvorgänge | 237 |
| 5 | Literatur | 241 |
| 6 | Glossar | 251 |
| 7 | Stichwortverzeichnis | 253 |