

Vorlesung Modul OC3, Elektrosynthese

(ab SS 2006) 12-14 Stunden

1. Einleitung

Veranstaltung, Einordnung in das Studium, Themenübersicht, Literaturliste

2. Grundlagen elektrochemischer Synthesemethoden

Elektrolyse, Aufbau einer elektrochemischen Zelle, Elektroden, heterogene Prozesse: Vor/Nachteile; Teilschritte: Transport, Elektronentransfer, chemische Reaktionen, Adsorption; Strom- und Materialausbeute

3. Apparative Voraussetzungen und Experimentelles

Zellkonstruktionen, Elektroden, Elektrolyte: Lösungsmittel, Leitsalze; Strom/Spannungsquellen, potentio/galvanostatische Elektrolysen; cyclische Voltammetrie

4. Elektrochemische Synthesereaktionen

4.1. Elektrochemische Bindungsknüpfung

Kolbe-Elektrolyse: Anwendungen, Nebenreaktionen, gemischte Kolbe-Elektrolyse, Brown-Walker-Reaktion; Keton-Reduktion, Elektrohydrodimerisierung

4.2. Elektrochemische Bindungsspaltung

Spaltung der C-Halogen-Bindung, schrittweiser und konzentrierter Verlauf

4.3. Elektrochemisch induzierte Substitution

Ringschluss von Dihaloalkanen; elektrochemisch induzierte nukleophile aromatische Substitution ($S_{RN}1$ -Mechanismus)

5. Weiterführende Aspekte

5.1. Elektrochemische Schutzgruppentechniken

1,3-Dithian als Carbonylschutzgruppe; elektrochemische Schützung und Entschützung des N-Terminus eines Peptids mit der PChd-Schutzgruppen

5.2. Stereochemische Aspekte elektrochemischer Synthesen

Stereokontrolle bei Elektrosynthesen; asymmetrische Induktion in der Elektrosynthese; elektrochemische Isomerisierungen

5.3. Elektrochemisch generierte Basen

Probasen und Erzeugung von Basen durch Reduktion; Synthesebeispiele

6. Spezielle Verfahren und fortgeschrittene Anwendungen

6.1. Mediierte Elektrosynthese

Prinzip, Redoxkatalyse/chemische Katalyse; anorganische, metallorganische, organische Mediatoren, Beispiele, mehrfach medierte Reaktionen

6.2. Elektroenzymatische Reaktionen

Oxidoreduktasen, Co-Faktoren, Regeneration, Beispiele

- 6.3. Gepaarte Elektrosynthese
Definition; sequentiell, divergent und konvergent gepaarte Elektrosynthese mit Beispielen
- 6.4. Industrielle Elektrosynthese
Übergang Labor-Industrie, up-scaling, ökologische/ökonomische Überlegungen; Anwendungstechnik: Zellkonstruktionen; Monsanto-Prozess, Nalco-Prozess
- 6.5. Kombinatorische Elektrosynthese
Kombinatorische Chemie, elektrochemische Robotik und Automatisierung, Beispiel Anilinoxidation

7. Zusammenfassung

Literaturliste, Modul OC3, Elektrosynthese

1. Allgemeine Lehrbücher zur Elektrochemie

- C.H. Hamann und W. Vielstich, Elektrochemie, Wiley-VCH, Weinheim, 3. Auflage, 1998
- C.H. Hamann, A. Hammett und W. Vielstich, Electrochemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 1998
- R. Holze, Leitfaden der Elektrochemie, Teubner, Stuttgart, 1998
- A.J. Bard und L.R. Faulkner, Electrochemical Methods, 2. Auflage, Wiley, New York, 2001

2. Lehrbücher und Übersichtsartikel zur Elektrosynthese

- F. Beck, Elektroorganische Chemie. Grundlagen und Anwendungen, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 1974
- T. Shono, Electroorganic Chemistry as a New Tool in Organic Synthesis, Band 20, Reactivity and Structure Concepts in Organic Chemistry, Springer, Berlin, 1984
- A.J. Fry, Synthetic Organic Electrochemistry, Wiley, New York, 2. Auflage, 1989
- J. Grimshaw, Electrochemical Reactions and Mechanisms in Organic Chemistry, Elsevier, Amsterdam, 2000
- H. Lund und M.M. Baizer (Hrsg.), Organic Electrochemistry. An Introduction and a Guide, Marcel Dekker, New York, 3. Auflage, 1991
- H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), Organic Electrochemistry, Marcel Dekker, New York, 2001
- H. Schäfer (Hrsg.), Encyclopedia of Electrochemistry, Vol. 8, Organic Electrochemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 2004
- R.D. Little und N.L. Weinberg (Hrsg.), Electroorganic Synthesis. Festschrift for Manuel M. Baizer, Marcel Dekker, New York, 1991
- J.F. Rusling und A.J. Fry, Electro-organic Reactions and Redox Active Biomolecules: A Student Diary, Interface 15(1), 59-61 (2006)

3. Spezialliteratur zu einzelnen Kapiteln der Vorlesung

Zu Kapitel 5.1.:

- M.H. Khalifa, G. Jung und A. Rieker, Angew. Chem. 92, 739-740 (1980)
- M.H. Khalifa, G. Jung und A. Rieker, Liebigs Ann. Chem. 1982, 1068-1090

Zu Kapitel 5.2.:

- T. Nonaka und T. Fuchigami, in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), Organic Electrochemistry, Marcel Dekker, New York, 2001, S. 1051-1102
- G. Kardassis, P. Brungs und E. Steckhan, Tetrahedron 54, 3471-3478 (1998)

Zu Kapitel 5.3.:

- J.H.P. Utley und M.F. Nielsen, in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), *Organic Electrochemistry*, Marcel Dekker, New York, 2001, S. 1227-1257

Zu Kapitel 6.1.:

- E. Steckhan, *Angew. Chem.* *98*, 681-699 (1986)
- J. Simonet und J.F. Pilard, in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), *Organic Electrochemistry*, Marcel Dekker, New York, 2001, S. 1163-1225

Zu Kapitel 6.2.:

- E. Steckhan, in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), *Organic Electrochemistry*, Marcel Dekker, New York, 2001, S. 1103-1146

Zu Kapitel 6.3.:

- X. Wei und B. Speiser, *Electrochim. Acta* *40*, 2477-2482 (1995)
- X. Wei und B. Speiser, *Electrochim. Acta* *42*, 73-79 (1996)
- M.M. Baizer, in H. Lund und M.M. Baizer (Hrsg.), *Organic Electrochemistry. An Introduction and a Guide*, Marcel Dekker, New York, 3. Auflage, 1991

Zu Kapitel 6.4.:

- H. Pütter, in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), *Organic Electrochemistry*, Marcel Dekker, New York, 2001, S. 1259-1307
- D.E. Danly und C.J.H. King, in H. Lund und M.M. Baizer (Hrsg.), *Organic Electrochemistry. An Introduction and a Guide*, Marcel Dekker, New York, 3. Auflage, 1991, S. 1285-1336

Zu Kapitel 6.5.:

- W. Märkle, B. Speiser, C. Tittel und M. Vollmer, *Electrochim. Acta* *50*, 2753-2762 (2005)
- T. Erichsen, S. Reiter, W. Märkle, C. Tittel, V. Ryabova, E.M. Bensen, G. Jung, B. Speiser und W. Schuhmann, *Rev. Sci. Instrum.* *76*, 062204-1-062204-11 (2005)

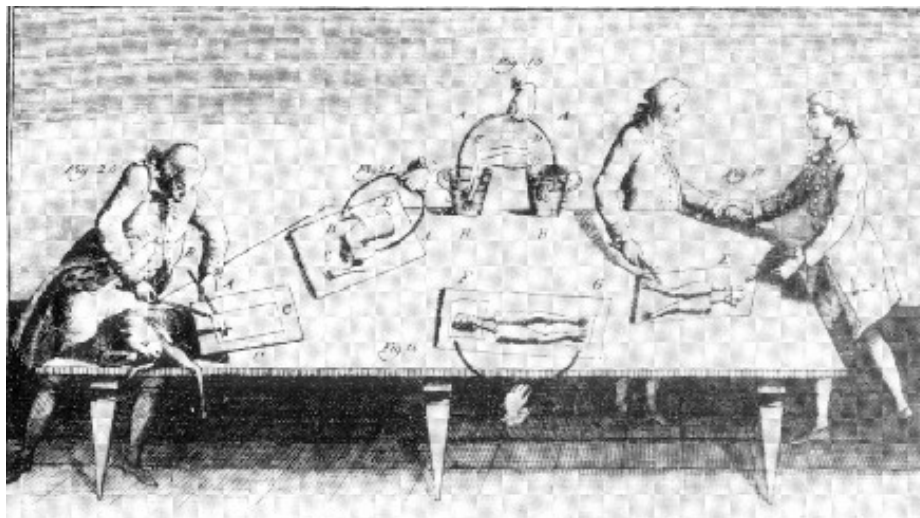
- (1) Einleitung
- (2) Grundlagen elektrochemischer Synthesemethoden
- (3) Apparative Voraussetzungen und Experimentelles
- (4) Elektrochemische Synthesereaktionen
- (5) Weiterführende Aspekte
- (6) Spezielle Verfahren und fortgeschrittene Anwendungen
- (7) Zusammenfassung

Begründer der Elektrochemie

Volta



Galvani

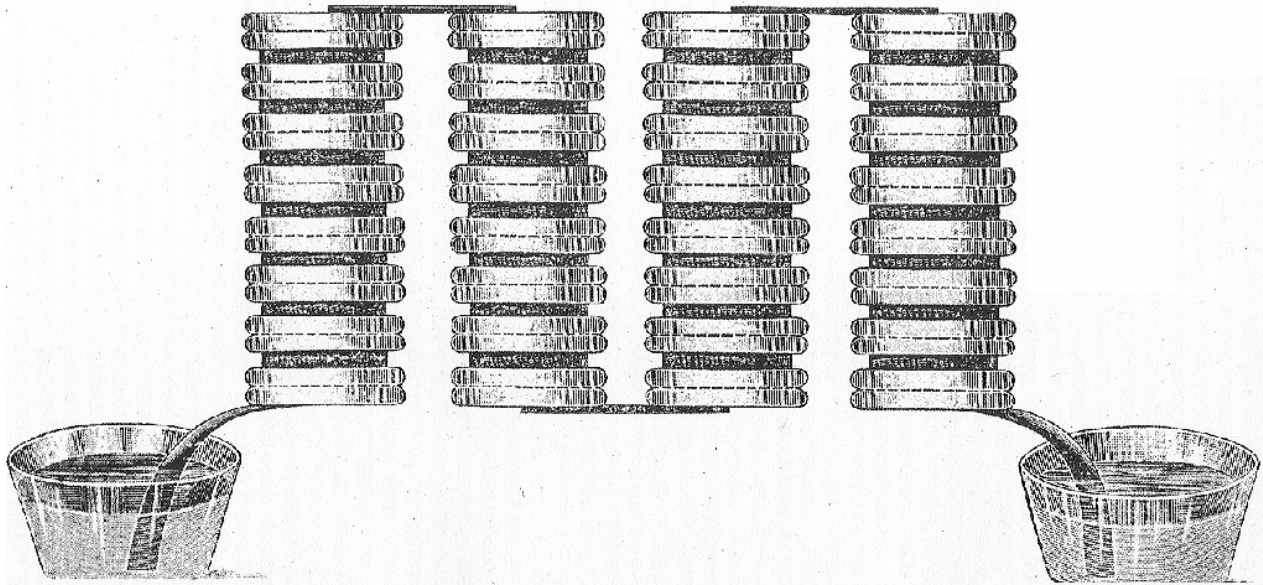


Faraday



Ritter

Voltasche Säule

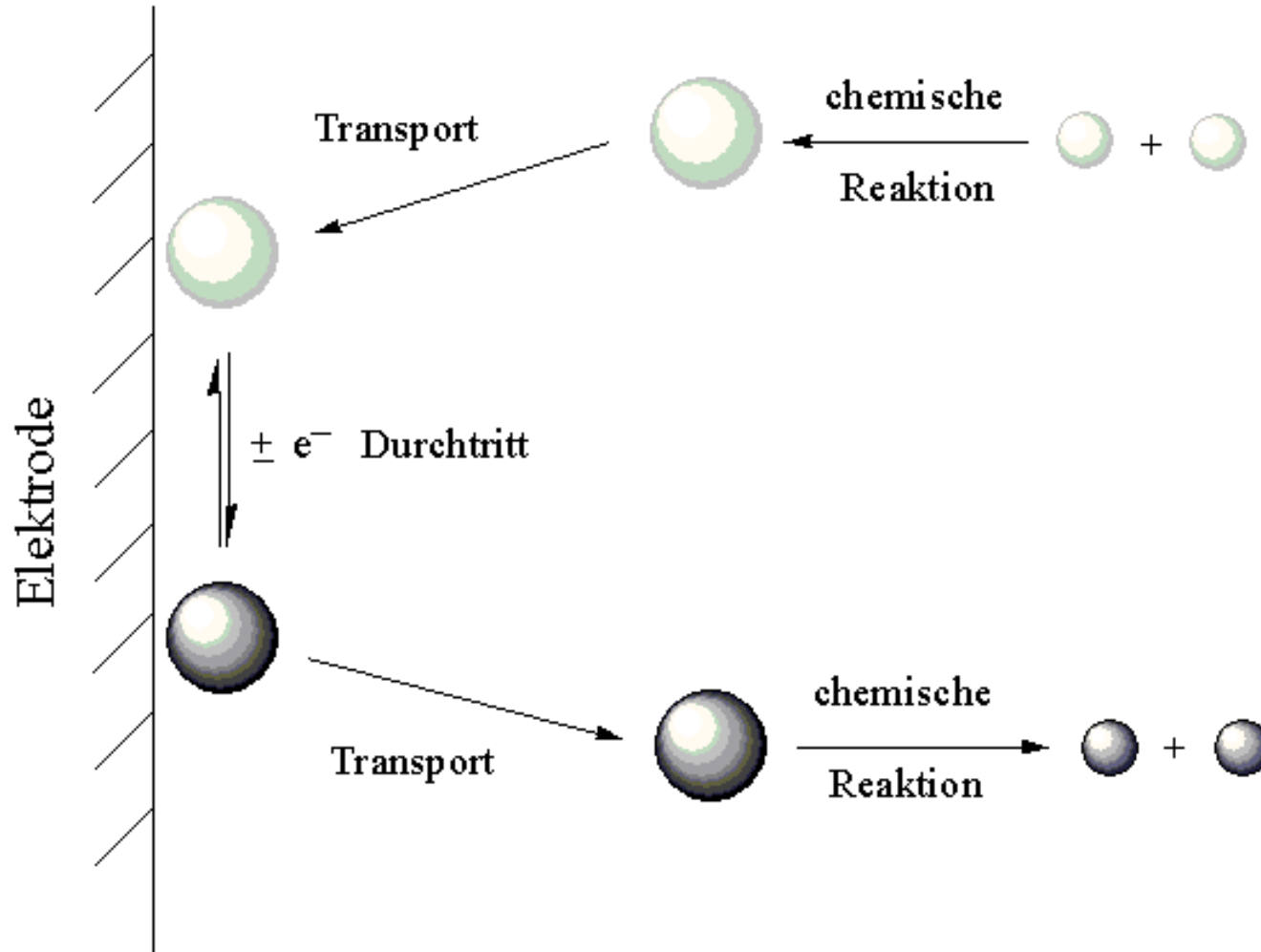


Während die Elektrolyse anorganischer Verbindungen bereits in Wissenschaft und Technik sich einen festen Platz erworben hat, ist es fast noch nicht gelungen, die Einwirkung des elektrischen Stroms auf organische Körper zu einer ausgiebigen Hilfsquelle für Synthese und Abbau zu gestalten.

Diese Erscheinung hat ihre Ursache in der großen Schwierigkeit, welche ... durch das Auftreten sekundärer komplizierter Prozesse in der Zelle bedingt ist. ... In der anorganischen Elektrolyse schliesst sich eine Untersuchung als Fortsetzung der andern an; die späteren Forscher stehen auf den Schultern der Vorgänger; es zeigt sich bei ihr eine glatte, regelmässig fortlaufende Entwicklung. Anders in der organischen Elektrolyse ... ihre Geschichte ist nicht die einer stetigen Entwicklung, sondern besteht aus vielen, grossenteils zusammenhanglosen Thatsachen.

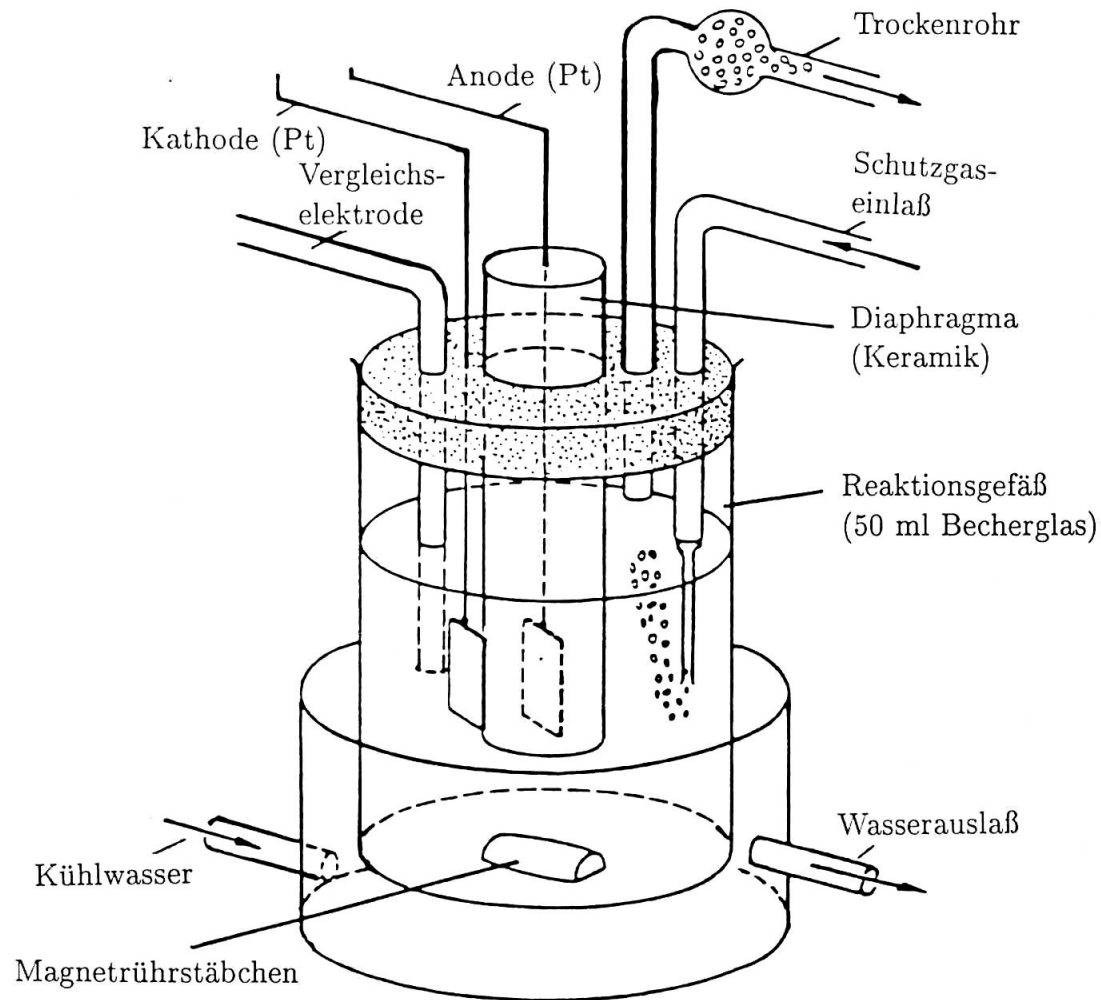
W. Löb, Z. Elektrochem. 2, 293-308 (1895)

Teilschritte einer Elektrodenreaktion

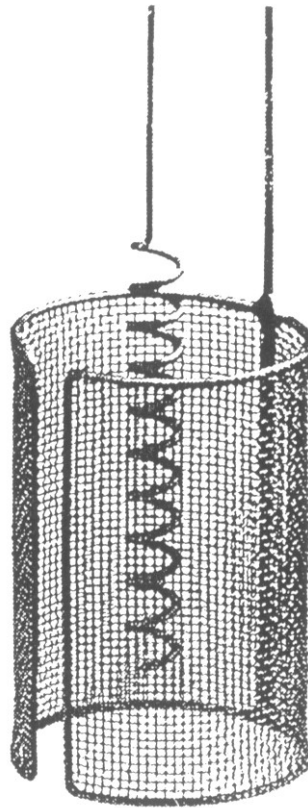


Grundprinzip der Elektrosynthese

In der Elektrosynthese werden an der Elektrodenoberfläche durch Elektronentransfer reaktive Zwischenstufen im Grund-zustand erzeugt, deren Folgereaktionen zu stabilen Produkten führen.



Elektrochemische Laborzelle für Synthese nach Shono

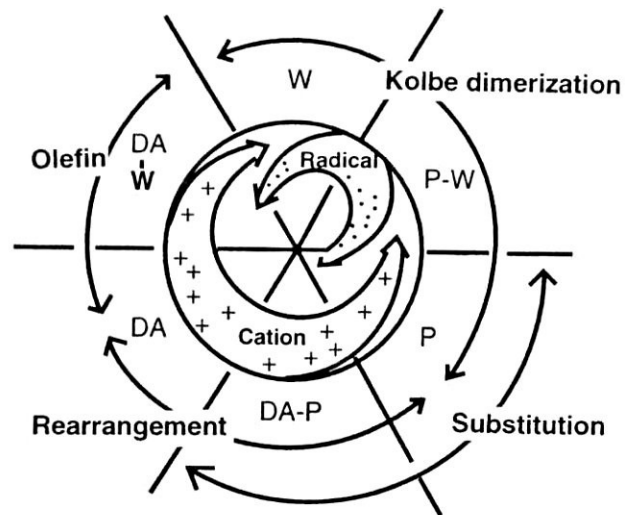


Elektrodenkonstruktion für Elektrosynthesen

The electrode material is an important factor in directing the course of an electrode reaction, but the influence of the electrode material is one of the least understood points in organic electrolysis.

(Zur Auswahl des Elektrodenmaterials)

H. Lund in H. Lund und O. Hammerich (Hrsg.), Organic Chemistry, M. Dekker, New York, 2001, S. 239



Correlation between reaction type, solvent, and reactive intermediate: W, water; P, protic solvent; DA, dipolar aprotic solvent.

Effect of Experimental Variables on Electrodecarboxylation

Variable	One-electron process	Two-electron process
Current	High current density	Low current density
Electrode material	Pt electrode	Carbon electrode
Reaction media	Acidic Neutral	Basic
	Water (W)	Dipolar aprotic (DA)
	Protic (P)	DA-W
	W-P	P
Additive	None	ClO_4^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and others
Temperature	$<50^\circ\text{C}$	Not critical

Selektivität bei der Kolbe-Elektrolyse aus: S. Torii und H. Tanaka, in Lund/Hammerich, S. 499

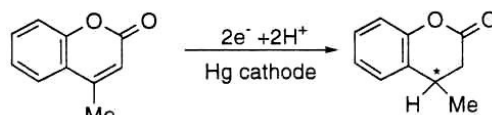
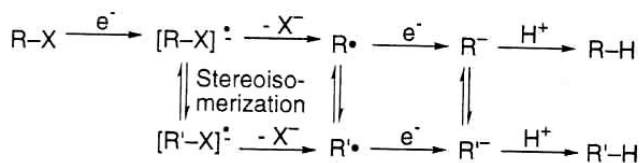
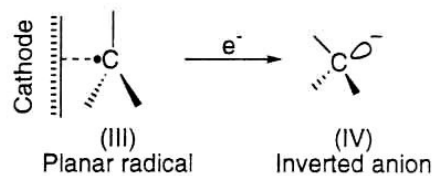
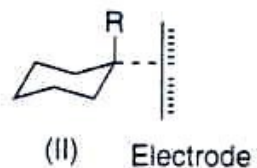
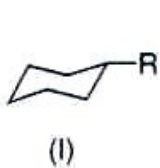
Pinacols from the Reduction of Aromatic Carbonyl Compounds in Protic Solvents

Substrate	Conditions: Solvent–Electrolyte–Cathode	Yield of pinacols (%)
Benzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	
4-Methylbenzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	100
4-Isopropylbenzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	
4-Methoxybenzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	100
4-Chlorobenzaldehyde	EtOH–KOH–Cu	
Salicylaldehyde	EtOH–KOH–Ni	70
2,4-Dimethylbenzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	60
3,5-Dimethylbenzaldehyde	EtOH–KOH–Ni	95
Vanillin	EtOH–KOH–Ni	45
Piperonal	EtOH–KOH–Ni	100
Furfural	Water–phosphate pH 9–Cd	
Acetophenone	EtOH–KOAc–Hg	86
4-Hydroxyacetophenone	Water–NaOH–Pb	
Benzophenone	EtOH–H ₂ SO ₄ –Pb	
4-Methylbenzophenone	EtOH–H ₂ SO ₄ –Pb	87

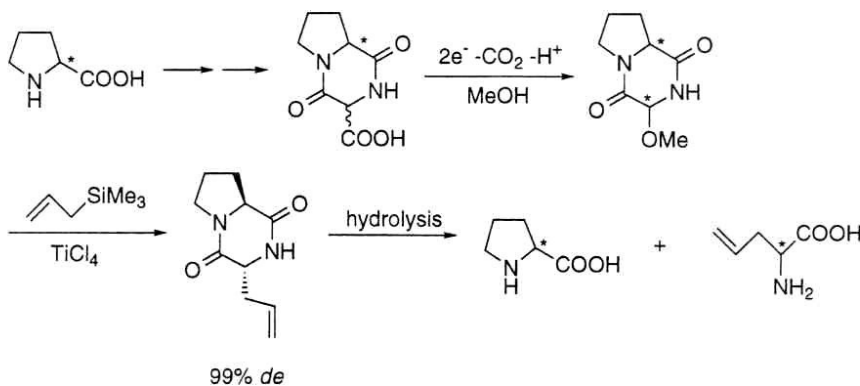
Alcohols from the Reduction of Aliphatic Carbonyl Compounds in Protic Solvents.

Substrate	Conditions: Solvent–Electrolyte–Cathode	Yield (%)
Acetone	Water–H ₂ SO ₄ –Hg	100
Butan-2-one	Water–NaOAc–Pb	poor
3-Methylpentan-4-ol-2-one	Water–NaHCO ₃ + CO ₂ –Hg	66
2-Methylhept-2-en-6-one	EtOH–H ₂ SO ₄ –Pb	45
Menthol	EtOH–H ₂ SO ₄ –Pb	82
Camphor	EtOH–H ₂ SO ₄ –Pb	45
Glucose	Water–various buffers–Hg	81

Reduktion von Ketonen zu Pinakolen und Alkoholen aus: J. Grimshaw in Lund/Hammerich, S. 411



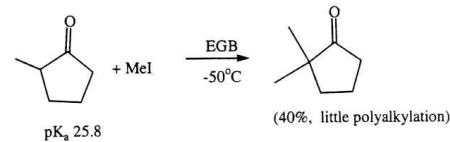
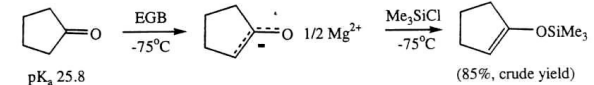
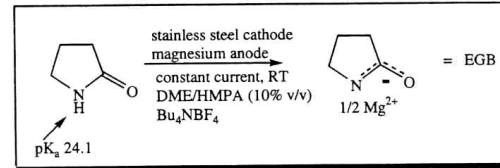
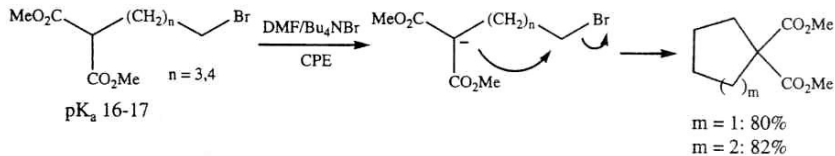
alkaloid = sparteine (0.07 equiv); pH = 5.4: 17% ee (*R*)
 alkaloid = yohimbine (0.01-0.05 equiv); pH = 2-3: 47-67% ee (*R*)



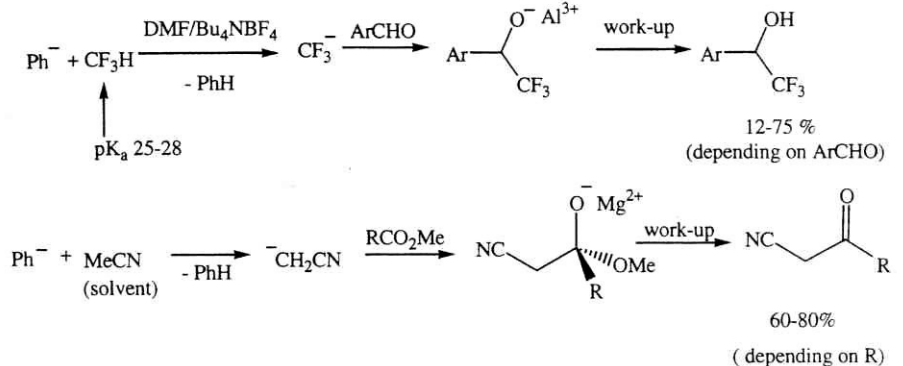
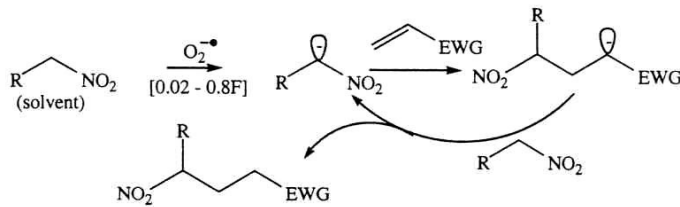
G. Kardassis et al., *Tetrahedron* 54, 3471 - 3478 (1998)

Stereochemie von Elektrosynthesen aus T. Nonaka, T. Fuchigami in Lund/Hammerich, S. 1051

EGB : $\text{PhN}=\text{NPh}^{\bullet-}$ generated *in situ*



EGB: Ph^- generated *in situ* by direct reduction of PhXat at a Cd-coated Ni-cathode in an undivided cell, using an Mg or Al anode



Reaktionen von elektrochemisch generierten Basen aus J.H.P. Utley, M.F. Nielsen in Lund/Hammerich, S. 1227

Heterogeneous Electrochemical Reaction		Redox potential ^a (V)	Examples of indirect electrochemical reactions → products (working electrode material)	
$Ce^{4+} + e^-$	\rightleftharpoons	Ce^{3+}	1.44	Oxidation of substituted methylbenzenes → corresponding monoaldehyde and carboxylic acid ^b Electrochemical synthesis of saccharin from <i>o</i> -toluene sulfamide
$Mn^{3+} + e^-$	\rightleftharpoons	Mn^{2+}	1.51	Oxidation of tetralin → α -tetralone
$Tl^{3+} + 2e^-$	\rightleftharpoons	Tl^+	1.25	Mild oxidation of propylene → acetone
$Pd^{2+} + 2e^-$	\rightleftharpoons	Pd^0	0.83	Oxidation of olefins ^b → carbonyl compounds and degradation
$OsO_4 + 8H^+ + 8e^-$	\rightleftharpoons	$Os + 4H_2O$	0.85	Oxidation of acetylene → oxalic acid Oxidation of olefins → 1,2-glycols
$2AgO + H_2O + 2e^-$	\rightleftharpoons	$Ag_2O + 2OH^-$	0.60 ^c	Oxidation of aliphatic amines → nitriles
$2Hg^{2+} + 2e^-$	\rightleftharpoons	Hg_2^{2+}	0.90	Oxidation of propylene → acrolein
$Cu^{2+} + e^-$	\rightleftharpoons	Cu^+	0.16	Hydroxylation of aromatic rings in the presence of oxygen Oxidation of alkenyl stannates → copper mediated homocoupling [56]
$Sn^{4+} + 2e^-$	\rightleftharpoons	Sn^{2+}	0.15	Reduction of nitrobenzene → aminophenol
$Ti^{3+} + e^-$	\rightleftharpoons	Ti^{2+}	- 2.0	Electrochemical formation of Ti^{2+} allowing the reduction of hydroxylamines, sulfoxides, nitroso [60]
$Cr^{3+} + e^-$	\rightleftharpoons	Cr^{2+}	- 0.41	Reduction of acetylene → ethylene Reduction of aromatic and polyethylenic ketones → pinacols Cleavage of carbon-halogen bonds
$[Fe^{3+}, TEA]$ complex	\rightleftharpoons	$[Fe^{2+}, TEA]$	- 1.05 ^b	Reduction of indigo dyestuff to its alkaline soluble leuco-form

^a Referred to NHE/^b Referred to Ag/AgCl, KCl 3M.

^b Preferably according to a two-stage process.

^c In this case, the electron transfer takes place at the anode interface, probably through an electrocatalytic mechanism.

^d Also using cobaltic, manganic ions, or insoluble oxides, such as lead or manganese dioxides.


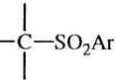
Medierte Elektrosynthese mit anorganischen Mediatoren aus J. Simonet, J.-F. Pilard in Lund/Hammerich, S. 1163 (Tabelle 1)

Type of organic substrate	Basic catalyst / electrolyte	Electrode material	Reaction
ArH	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{H}_2\text{SO}_4$	Pt	Anthracene \rightarrow Anthraquinone
ArCH ₃	$\text{Mn}^{3+}/\text{H}_2\text{SO}_4$	PbO_2	Aniline \rightarrow Benzoquinone
	$\text{Mn}^{3+}/\text{H}_2\text{SO}_4$	PbO_2	Toluene \rightarrow Benzaldehyde
	$\text{Ce}^{4+}/\text{HClO}_4$	TiPt	Toluene \rightarrow Benzaldehyde
	$\text{Pb}^0/\text{Pb}^{2+}$	Pb, Bi	"Barbier type" alkylation
	$\text{Ce}^{4+}/\text{CF}_3\text{COOH}$	Pt	Substituted Toluene \rightarrow Substituted Benzaldehyde
	Chromic acid	PbO_2	Oxidation of p-nitrotoluene, Toluene, Xylenes \rightarrow ArCOOH
	$\text{MnO}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$	MnO_2	Tetralin \rightarrow α -Tetralone
$>\text{NCH}_3$	$\text{RuO}_2/\text{aq. NaCl} + \text{CCl}_4$ (double mediator system)	Pt or Ni (two phase process)	Amine \rightarrow Amide
$\begin{array}{c} \\ -\text{C}-\text{OH} \\ \end{array}$	Same	Same	Primary Alcohols \rightarrow Acids Secondary Alcohols \rightarrow Ketones
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{EWG} \quad \text{EWG} \end{array}$	Ce^{4+} salts $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$	Pt ganze	C—C formation in high yield
Phenyldiazomethanes	Cu^{2+}	Pt electrode	[PhCHN ₂ \rightarrow predominantly cis stilbene]

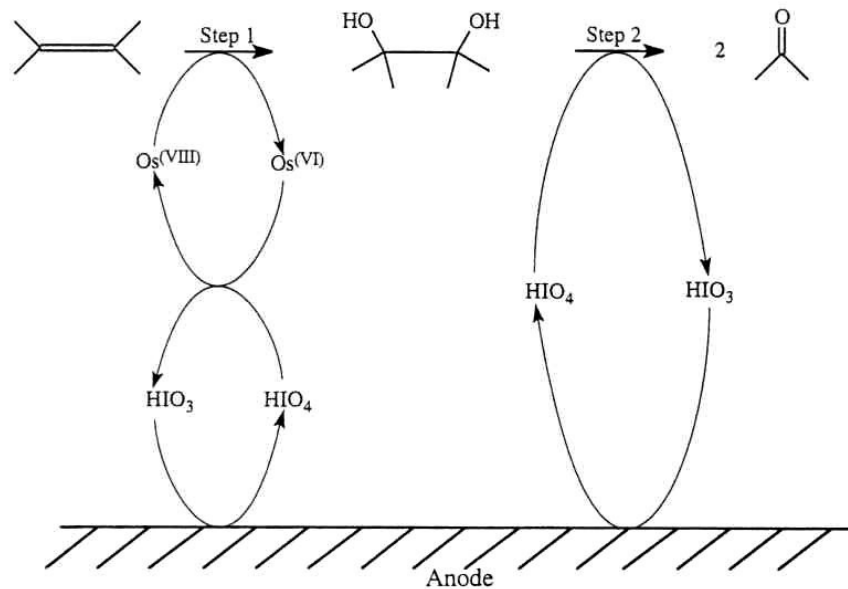
Mediierte Elektrosynthese mit anorganischen Mediatoren aus J. Simonet, J.-F. Pilard in Lund/Hammerich, S. 1163 (Tabelle 2)

Type of Substrate	Mediator A used	Nature of the driving force of the catalysis (interest in synthesis)
Benzylic ethers	Tris (p-bromophenyl)amine	Fast deprotonation of radical cation in the presence of a soluble base
Activated thioethers	Triarylamines	Oxidative cleavage of the C—S bond
<u>Gem</u> -dithioacetals $\begin{array}{c} \text{R}^1 \quad \text{SR} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{R} \quad \text{SR} \end{array}$	9, 10-Diphenylanthracene and triarylamines	Rapid decomposition of radical cation by cleavage (R = aromatic) or nucleophilic attack (R = aliphatic); (oxidative deprotection of carbonyl compounds)
Carboxylate ions	Appropriate triarylamines	Possibility to achieve the Kolbe reaction in homogeneous phase
10-methylacridan (and aromatic amines)	Ferrocene/ferrocenium	Fast deprotonation of the radical cation by non-nucleophilic bases

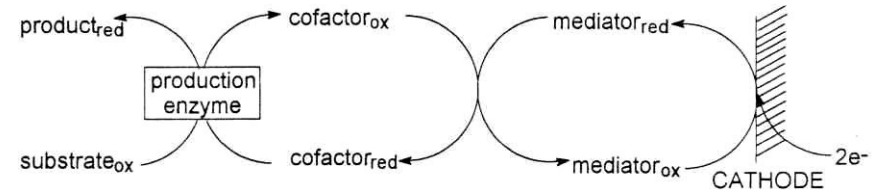
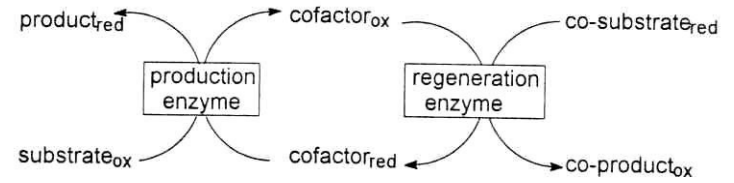
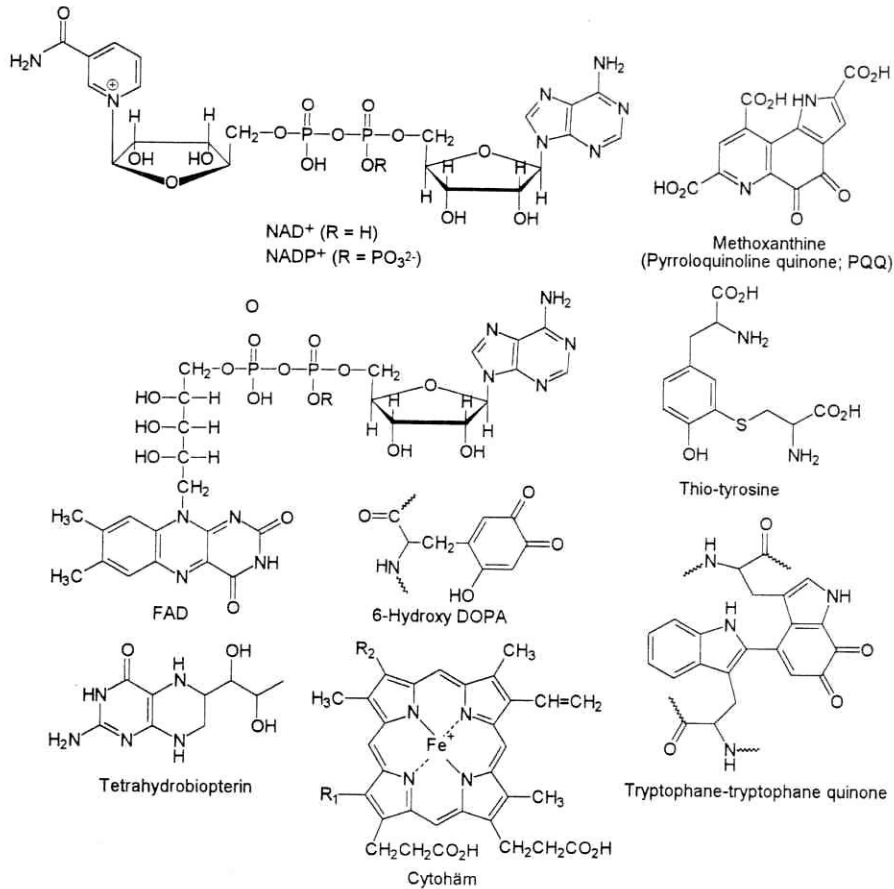
Mediierte Elektrosynthese mit organischen Mediatoren aus J. Simonet, J.-F. Pilard in Lund/Hammerich, S. 1163 (Tabelle 3)

Type of Substrate	Mediator A used	Nature of the driving force of the catalysis (interest in synthesis)
Aromatic halides ArX and strongly activated RX	Benzonitrile or anthracene (depending on X)	Fast cleavage of the C-X bond (the indirect formation of Ar [•] is useful in some S _N R1 reactions)
Activated olefins 	Anthracene	Fast coupling of radical anion or enone or unsaturated nitrile (indirect dimerizations)
Aromatic sulfones 	Anthracene, pyrene	Cleavage of C—S bond (hydrocarbon deprotection)
Aromatic sulfonamides	Pyrene	Cleavage of N—S bond (deprotection of amines: synthesis of polyamines as macro ligands)
R ¹ R ² NSO ₂ Ar and R ¹ N(SO ₂ Ar) ₂	Deposited polythiophenes	Chemical synthesis at solid interfaces with convenient and selective regeneration of amines
Bianthrone	Quinone	Fast rotation of the radical anion into the thermodynamically more stable form
Small rings (epoxides, cyclopropanes) onium cations of moderate acidity	Biphenyl	Fast opening of the anion radical
Activated fluoromethylarenes ArCH ₂ F and ArCF ₃	Naphthalene	Fast cleavage of C—N and C—S bonds
$\overset{\dagger}{\text{N}}\text{R}_4\text{X}^-$ or $\overset{\dagger}{\text{S}}\text{R}_3\text{X}^-$	Benzonitrile bipyridine Acenaphthylene	Easy breaking of C—F bonds
α,α' -Dihalide derivatives	Aromatic hydrocarbons chosen as a function of more easily cleaved C—X bond	Convenient formation of R [•] radicals in solution
Polyenes (dienes and trienes)	Naphthalene, anthracene	Cathodic elimination in solution
Vic-dihalides and perfluoroalkyl halides	C ₆₀	Fast protonation of basic radical anions by residual acidic impurities
		Fast cleavage of C—X bond(s)

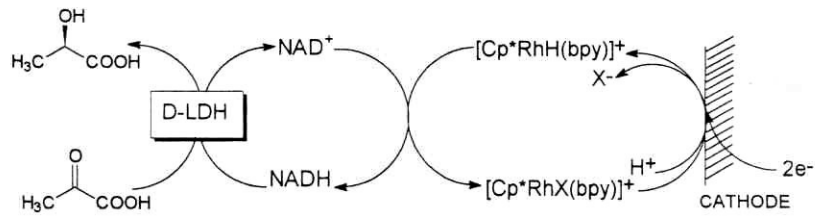
Mediierte Elektrosynthese mit organischen Mediatoren aus J. Simonet, J.-F. Pilard in Lund/Hammerich, S. 1163 (Tabelle 4)



Doppelt medierte elektrochemische Spaltung von Alkenen in Carbonylverbindungen aus J. Simonet, J.-F. Pilard in Lund/Hammerich, S. 1163

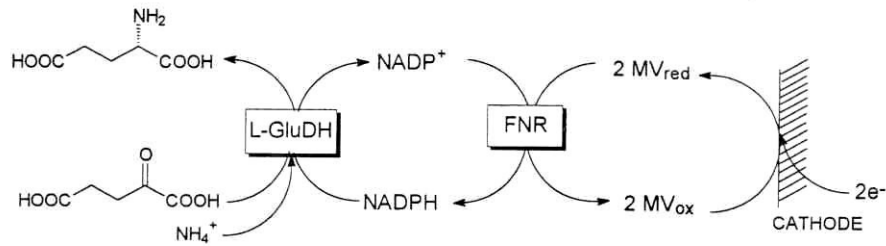
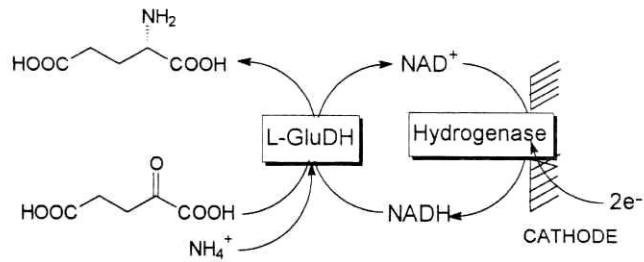


Elektroenzymatische Reaktionen, Grundlagen aus E. Steckhan in Lund/Hammerich, S. 1103

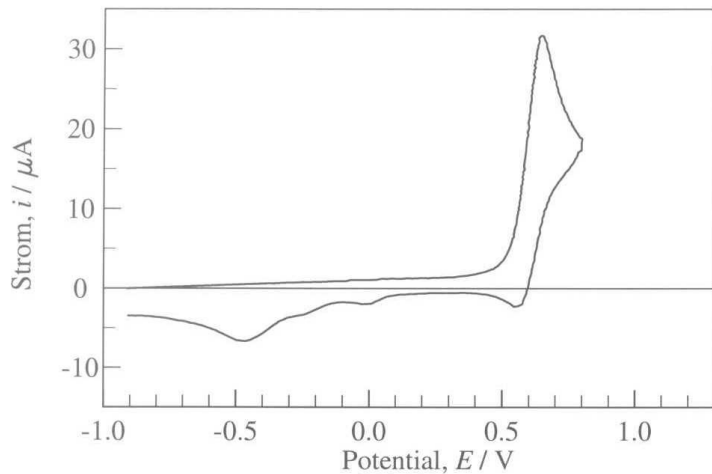


Reaktionsbedingungen:

Kohlelektrode
 -0.6 V vs Ag/AgCl
 pH 7.5
 3 h, ee 93.5%
 70% Ausbeute
 67% Stromausbeute



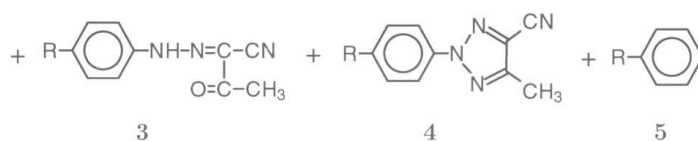
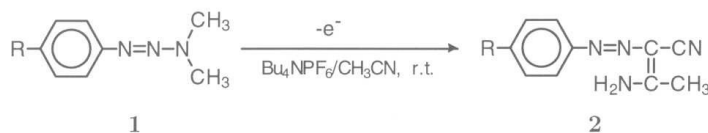
Elektroenzymatische Reaktionen, Beispiele aus E. Steckhan in Lund/Hammerich, S. 1103



R = OCH₃

Potential gegen Ag/0.01 M Ag⁺

R =	Oxidations- potential E (V) ^[a]	übertragene Ladung Q (C) ^[b]	n ^[c]	Ausbeuten (%) ^[d]			
				2	3	4	5
C ₂ H ₅ O	0.84	390	2.0	25	15	8	Spur
CH ₃ O	0.84	346	1.8	30	10	8	Spur
CH ₃	1.00	422	2.2	29	5	4	—
H	1.04	408	2.1	25	5	5	—
Br	1.14	440	2.3	35	0	0	—
CF ₃	1.29	480	2.5	30	0	0	Spur
NO ₂	1.39	405	2.1	12	0	0	≈ 30 % ^[e]



^[a] Potentiale bezogen auf E⁰ des Ferrocen/Ferricinium-Standardredoxpaars,

^[b] für die Oxidation von 2 mmol **1**,

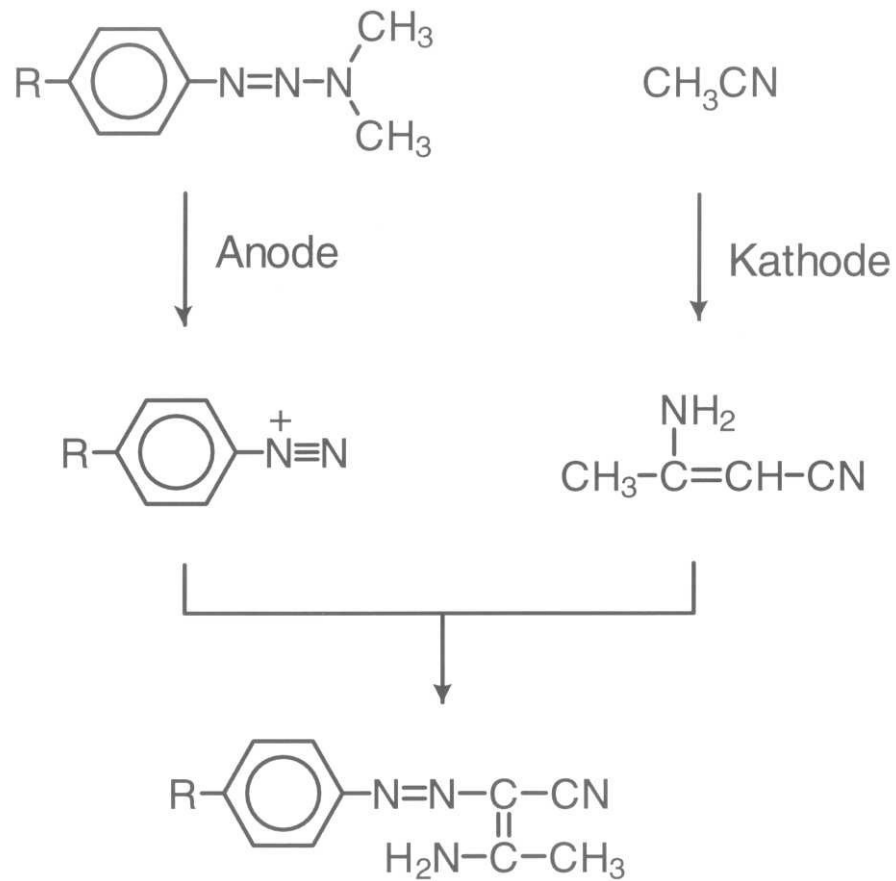
^[c] Zahl der übertragenen Elektronen pro Molekül,

^[d] isolierte Ausbeuten nach Säulenchromatographie,

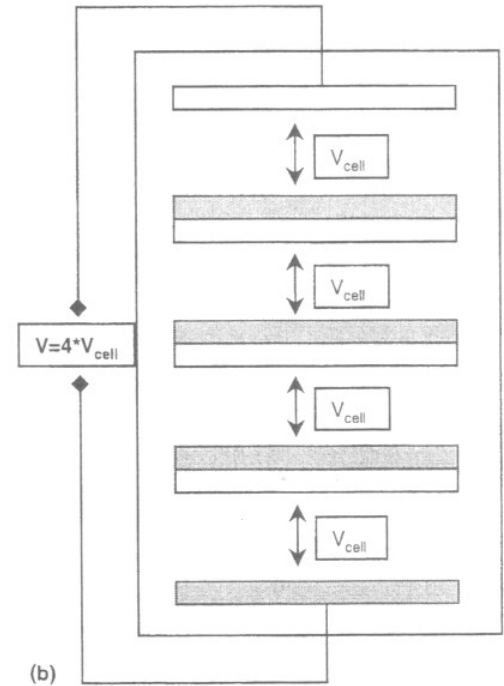
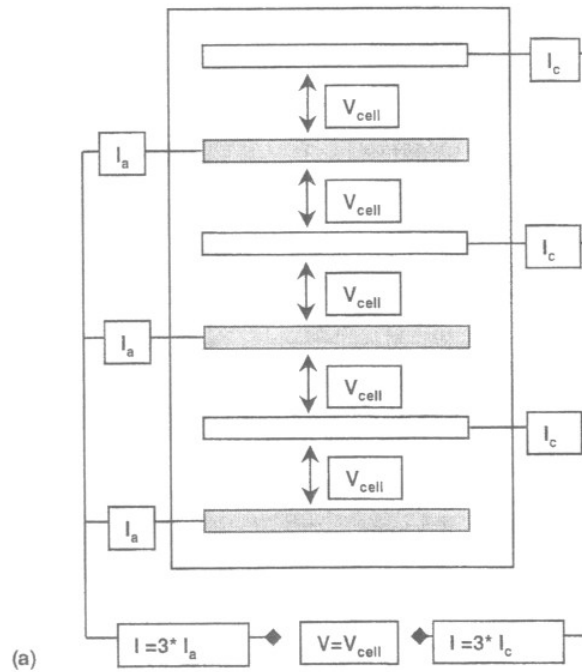
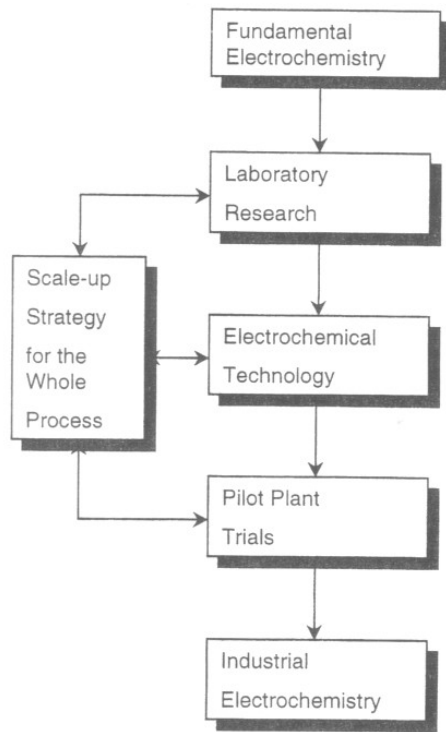
^[e] ungefähre Ausbeute nach DC.

Anodische Oxidation von 1-Aryl-3,3-dimethyltriazenen

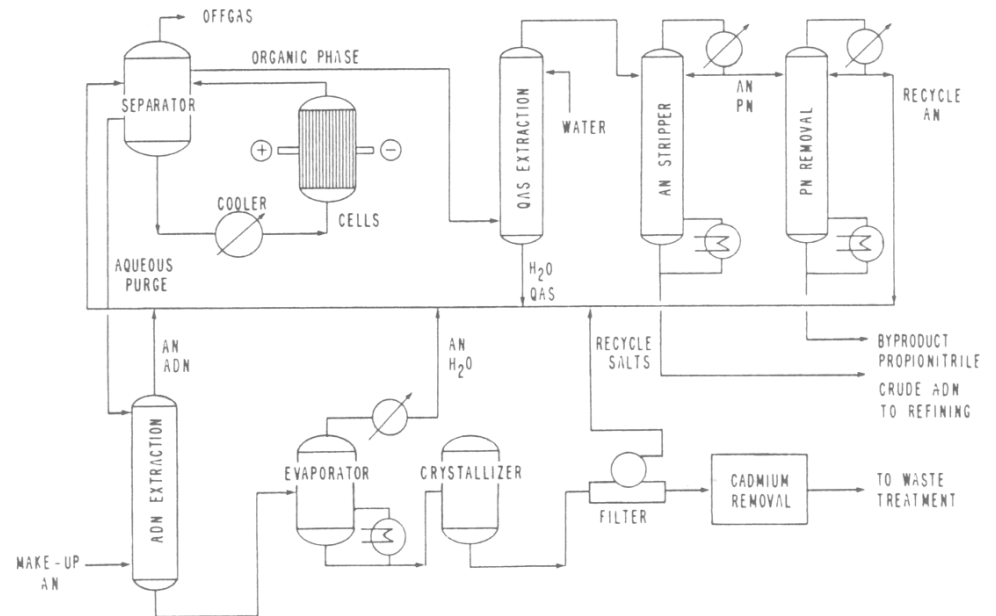
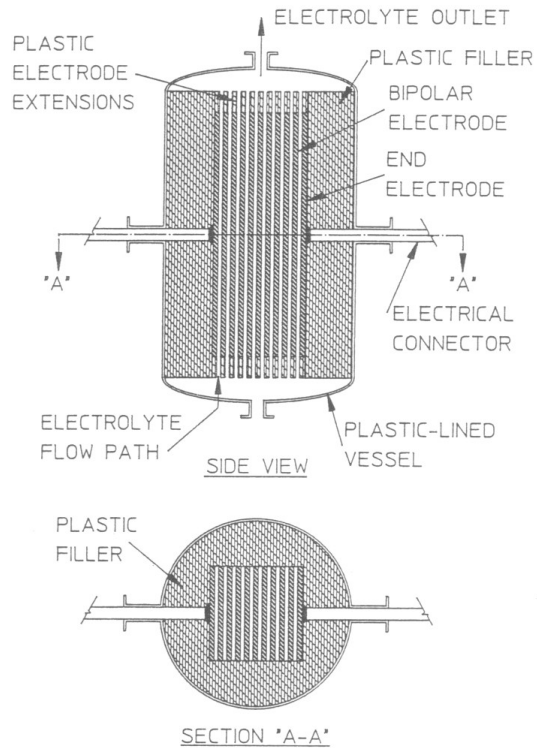
L. Dunsch et al., Chem. Ber. 127, 2423 (1994)



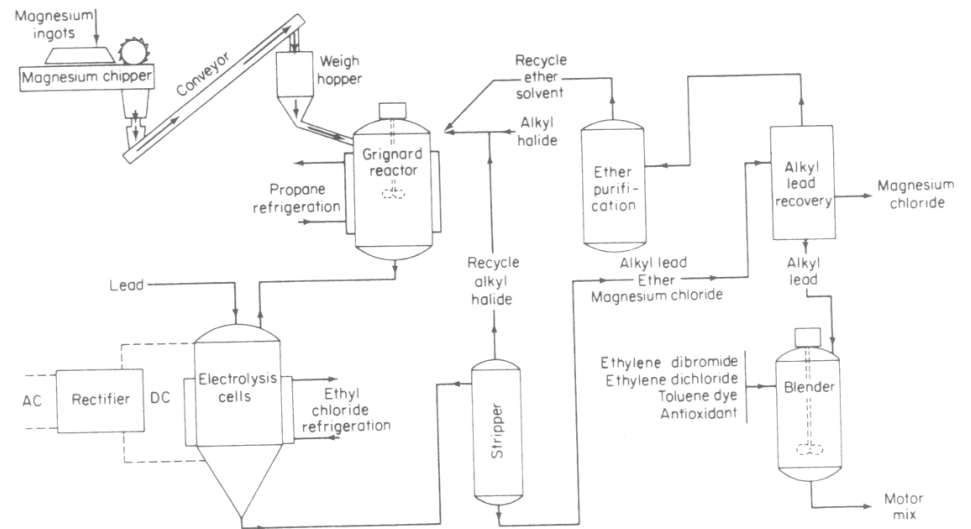
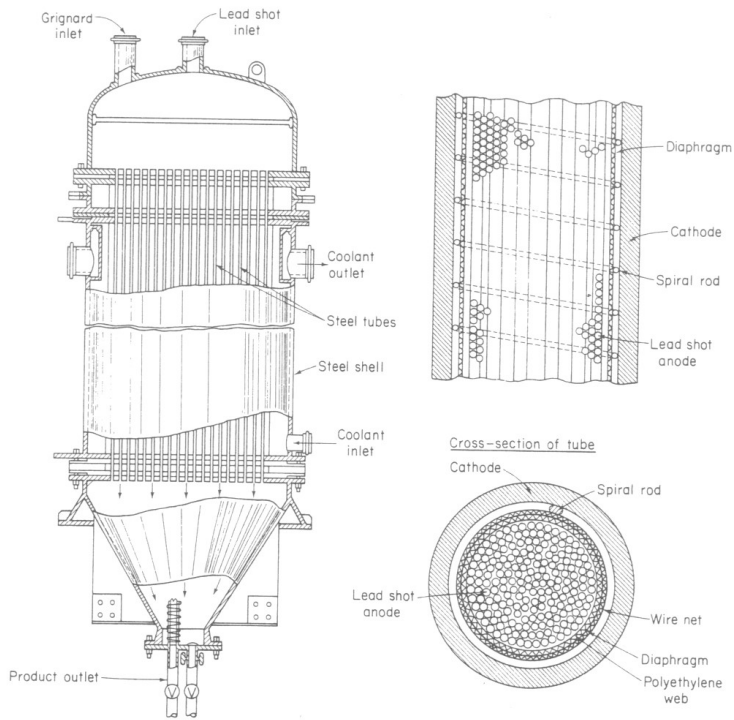
Konvergent gepaarte Elektrolyse von Triazenen



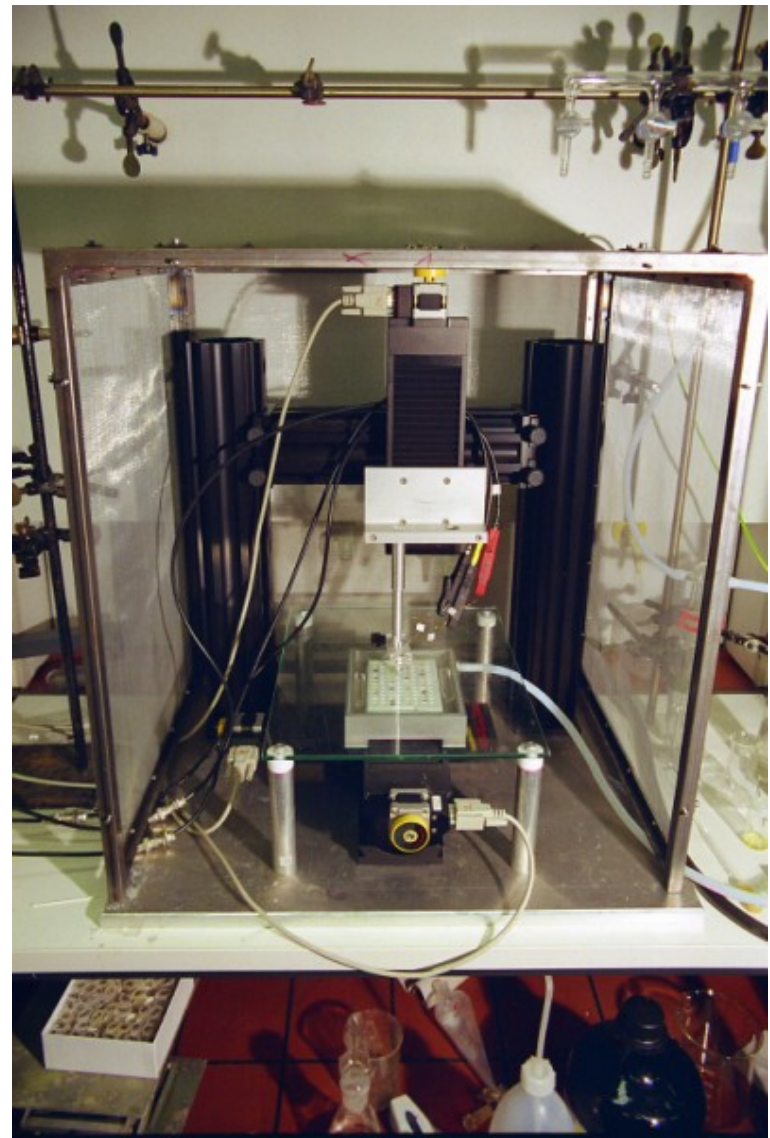
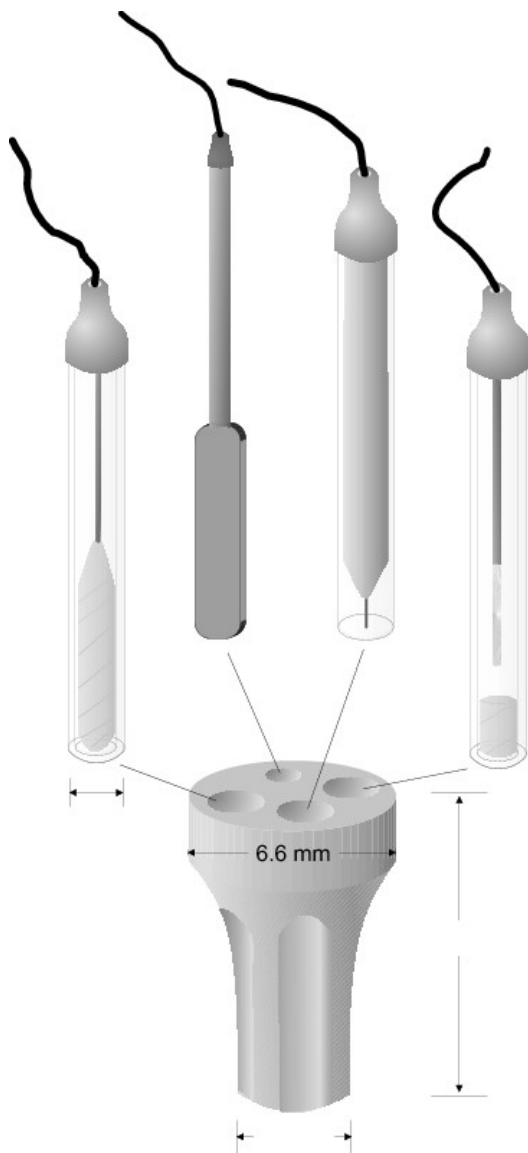
Industrielle Elektrosynthese, Grundlagen aus H. Pütter in Lund/Hammerich, S. 1259



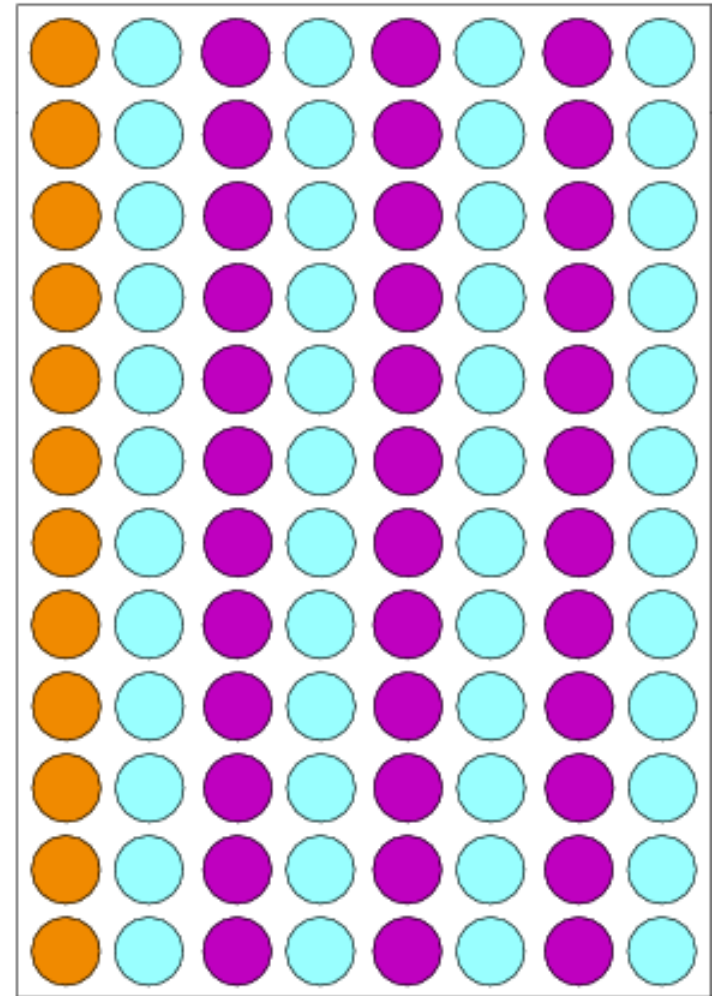
Industrielle Elektrosynthese, Monsanto-Adipodinitril-Prozess
 aus D.E. Danly und C.J.H. King in Baizer/Lund, S. 1285



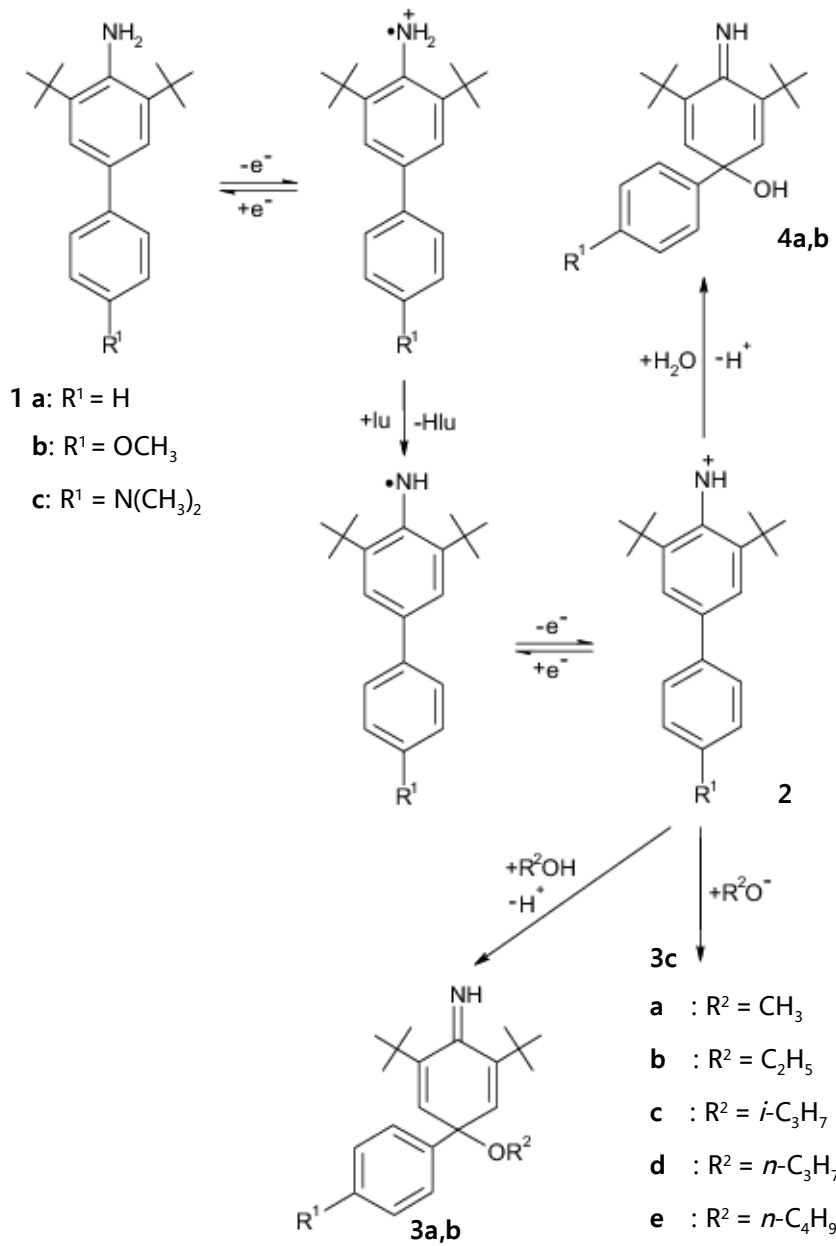
Industrielle Elektrosynthese, Nalco-Prozess aus D.E. Dally und C.J.H. King in Baizer/Lund, S. 1285



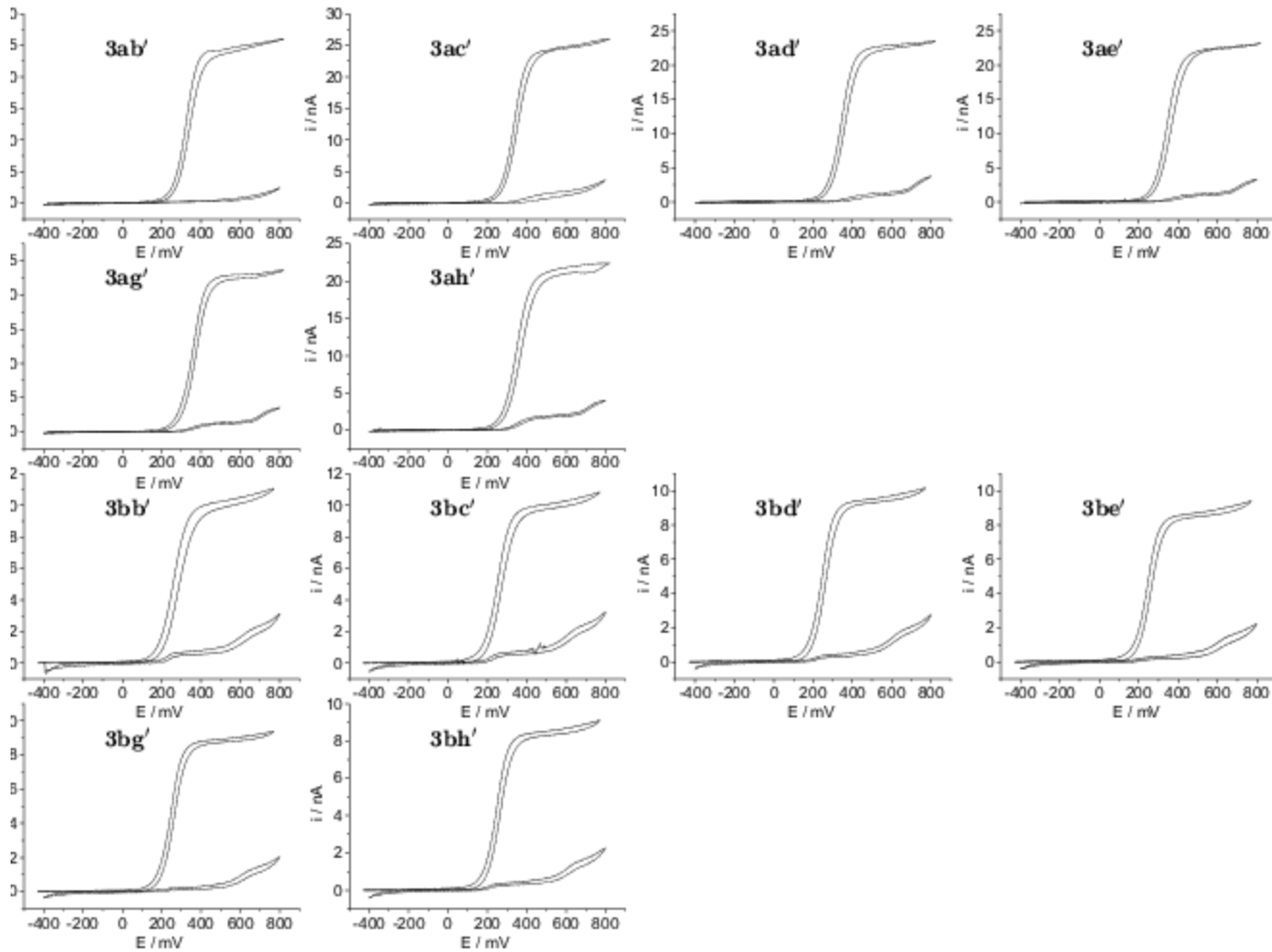
Kombinatorische Elektrosynthese, Elektrodenbündel und Gesamtansicht



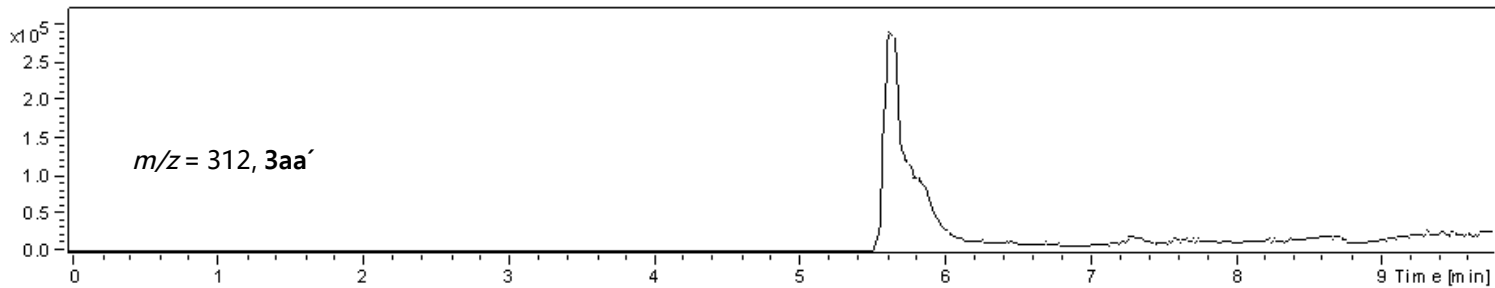
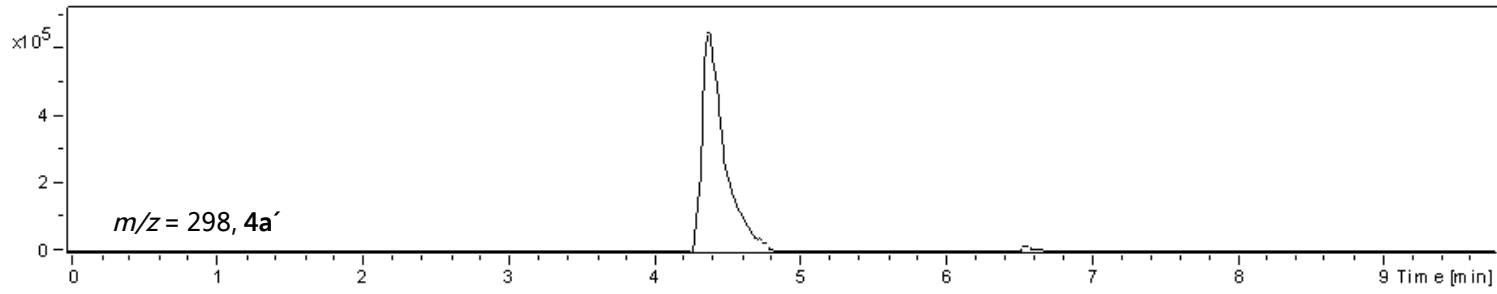
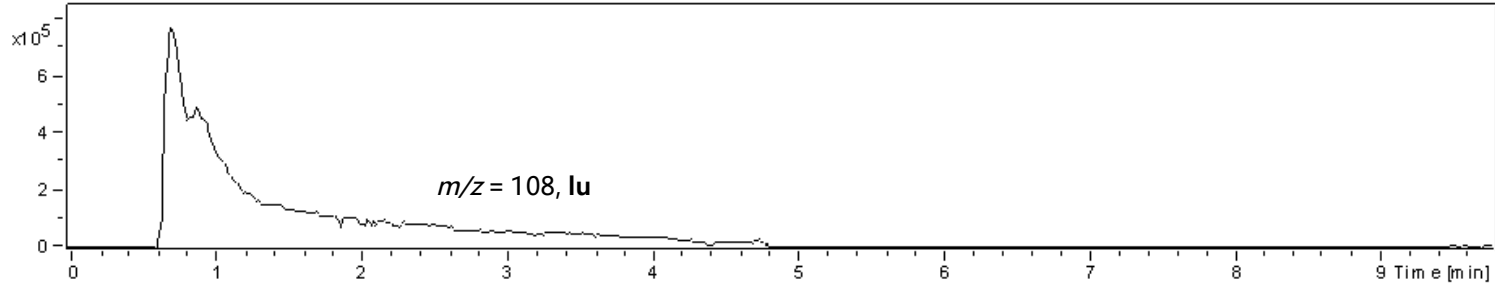
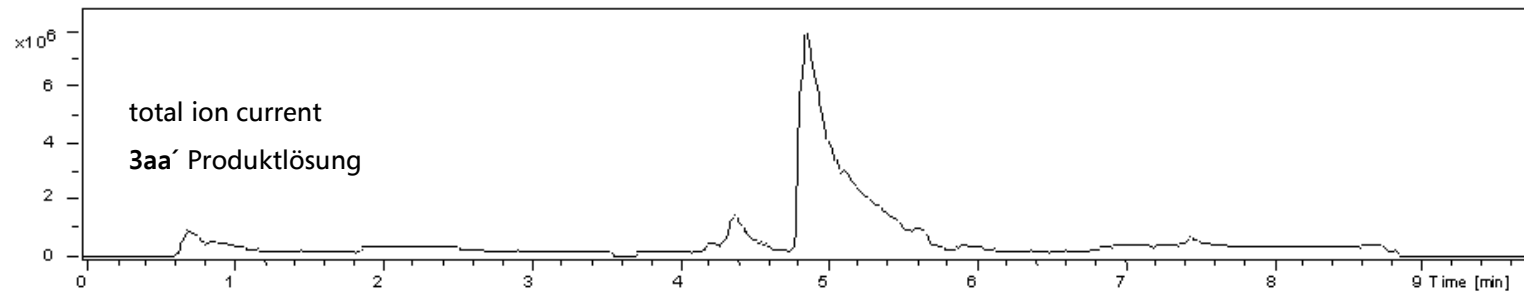
Kombinatorische Elektrosynthese, Nutzung von Mikrotiterplatten



Kombinatorische Elektrosynthese, Anilinoxidations-Mechanismus



Kombinatorische Elektrosynthese, Anilinoxidation, Cyclische Voltammogramme



Kombinatorische Elektrosynthese, Anilinoxidation, HPLC/MS-Analytik