

Über die elektronischen Energieniveaus des N-Isopropylcarbazols und seiner Radikalionen

1. Teil: Ionisierungsenergie, Elektronenaffinität und Radikalionenspektren

WALTER KLÖPFFER

Battelle-Institut e. V., Frankfurt (Main)

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1923—1930 [1969]; eingegangen am 20. September 1969)

The first two ionization energies of N-isopropyl carbazole (NIPCA) have been determined to be 7.4 and 8.0 eV. The electron affinity amounts to 0 eV. The energy gap of solid NIPCA is estimated to be about 4.4 eV. Positive and negative radical ions of NIPCA have been prepared by electrochemical oxidation and alkali metal reduction respectively; electronic absorption spectra of the radical ions are presented.

Die Untersuchung der Ladungsträgererzeugung und des Ladungsträgertransports in photoleitenden organischen Substanzen erfordert genaue Kenntnis von deren molekularen Eigenschaften, da diese das photoelektrische Verhalten im kondensierten Zustand wesentlich bestimmen. So hängt beispielsweise der Abstand der Energieniveaus (ΔE) für positive und negative Ladungsträger (Löcher und Elektronen) von der Differenz zwischen Ionisierungsenergie (I) und Elektronenaffinität (A) der freien Moleküle ab. Diese Differenz wird im Festkörper durch die Polarisationsenergie (P) des Elektrons und Loches erniedrigt ($\Delta E = I - A - 2P$). Die Polarisierungsenergie hängt wiederum von der Polarisierbarkeit der freien Moleküle ab¹. Im Hopping-Modell sind die Ladungsträger Radikalionen (Loch = Radikalkation, Elektron = Radikalanion), die sich von den neutralen Molekülen durch das Fehlen eines Elektrons im höchsten besetzten Molekülorbital bzw. durch die Besetzung des niedrigsten leeren Molekülorbitals durch ein zusätzliches Elektron unterscheiden und sich im elektrischen Feld durch Elektronensprünge zwischen benachbarten Gitterplätzen fortbewegen.

Auch im Bändermodell sind die Energieniveaus der Ladungsträger von denen der Radikalionen abgeleitet²; allerdings sind in diesem Fall die Ladungsträger im Kristall durch die Aufspaltung dieser Niveaus zu schmalen Energiebändern delokalisiert.

Sonderdruckanforderungen an Dr. W. KLÖPFFER, Battelle-Institut e.V., Hauptabteilung Chemie, D-6000 Frankfurt am Main, Postfach 90 01 60.

¹ L. E. LYONS u. J. C. MACKIE, Proc. Chem. Soc. London **1962**, 71.

² O. H. LEBLANC JR., J. Chem. Phys. **35**, 1275 [1961].

Im Rahmen von Arbeiten über den Mechanismus von Ladungsträgererzeugung und -transport in Poly-N-vinylcarbazol (PVCA) und N-Isopropylcarbazol (NIPCA) wurden einige Moleküleigenschaften des NIPCA untersucht, die, wie oben angedeutet, im Zusammenhang mit elektrischen Leitungsprozessen stehen. Die Molekülstruktur des NIPCA und der Grundeinheit des PVCA unterscheiden sich von der des bestbekannten organischen Photoleiters Anthracen (Übersichtsarbeiten^{3, 4}) durch die Anwesenheit eines Heteroatoms im aromatischen Ringsystem, das durch den zentralen Fünfring ein nicht alternierendes System ist. Das hat zur Folge, daß die Wellenfunktionen des höchsten besetzten und niedrigsten leeren MO einander nicht mehr entsprechen, wie dies bei den alternierenden Kohlenwasserstoffen theoretisch gefordert wird⁵ und experimentell in der großen Ähnlichkeit der Absorptionsspektren und Elektronenspinresonanzspektren von Radikalkation und -anion zum Ausdruck kommt. Auch der für alternierende Kohlenwasserstoffe geforderte einfache Zusammenhang zwischen Ionisierungsenergie und Elektronenaffinität ($I + A = \text{const}$)⁶ gilt für derartige Substanzen nicht.

In dieser Arbeit wird über die Bestimmung der Ionisierungsenergie und der Elektronenaffinität des NIPCA, über die Reduktion bzw. Oxydation von NIPCA zu den entsprechenden Radikalionen sowie über die Absorptionsspektren dieser Ionen berichtet.

³ F. GUTMANN u. L. E. LYONS, Organic Semiconductors, Wiley & Sons, New York 1967.

⁴ H. BAUSER, Naturwiss. **54**, 505 [1967].

⁵ C. A. COULSON u. G. S. RUSHBROOK, Proc. Cambridge Phil. Soc. **36**, 193 [1940].

⁶ R. S. BECKER u. W. E. WENTWORTH, J. Am. Chem. Soc. **85**, 2210 [1963].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

1. Experimentelles

1.1. Synthese und Reinigung des NIPCA

Zur Gewinnung von anthracenfreiem Carbazol wurde Tetrahydrocarbazol (Fluka, purum) mit Raney-Nickel nach BADCOCK⁷ katalytisch dehydriert. Das Rohprodukt wurde zunächst mit Äthanol bei Zimmertemperatur extrahiert, aus Xylo unter Zusatz von Aktivkohle umkristallisiert und anschließend nochmals mit Methanol extrahiert. Fp: 248 °C.

Die Umsetzung zum NIPCA erfolgte mit Isopropyljodid nach der von STEVENS⁸ vorgeschlagenen allgemeinen Methode zur Herstellung N-alkylierter Carbazol-derivate. Das Rohprodukt wurde zunächst zweimal aus Methanol umkristallisiert und mit Cyclohexan extrahiert, wobei das nicht umgesetzte Carbazol ungelöst zurückbleibt. Das Lösungsmittel wurde verdampft und der Rückstand mehrmals aus Äthanol umkristallisiert, bis sich dünnschichtchromatographisch kein Carbazol mehr nachweisen ließ. Schließlich wurde das Produkt zonengereinigt (50 bis 100 Zonenpassagen bei einem Verhältnis Schmelzzonenhöhe zu Gesamtlänge 1 : 10, Zuggeschwindigkeit 2 mm/h aufsteigend, Gerät der Fa. Desaga Heidelberg).

1.2. Herstellung der Radikalionen

Die Radikalionen des NIPCA sind sehr empfindlich gegen Wasser und Sauerstoff und müssen daher im Hochvakuum und unter Verwendung wasserfreier Lösungsmittel hergestellt werden. Dazu dient eine auf 15^{-5} Torr evakuierbare Vakuumanlage (Abb. 1).

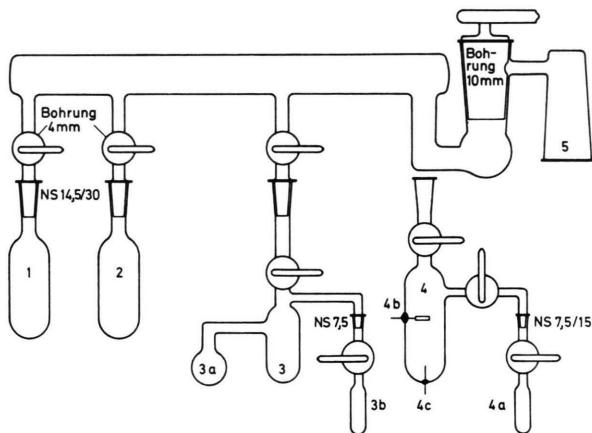


Abb. 1. Vakuumanlage zur Herstellung von Radikalionen. 1, 2 Lösungsmittelgefäß; 3 Reduktionsgefäß; 3 a Nebenarm für Kalium; 3 b Küvette; 4 Oxydationsgefäß; 4 a Küvette; 4 b Platinnetz; 4 c Platinstift; 5 Anschluß an Öldiffusions- und Kreiselpumpe.

Zur Reduktion des NIPCA zum NIPCA^{·-} wird 1,2-Dimethoxyäthan (DMÄ; Fluka, purum) als Lösungs-

mittel verwendet. Es wird zunächst unter Stickstoff über Kalium in Kölbchen 1 destilliert, das dann an die Apparatur angeschlossen und mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Die Apparatur wird sodann evakuiert und das Lösungsmittel durch mehrmaliges Auftauen entgast. Dann wird Kölbchen 2 gekühlt, das ebenso wie 1 Kalium enthält, wobei das Lösungsmittel nach 2 überdestilliert. Die Reduktion geschieht an einem Kaliumspiegel, der im Hauptaum von Gefäß 3 durch Destillation des Kaliums aus dem Ansatzstück 3 a heraus hergestellt wird. Die Substanz befindet sich in einem Röhrchen im Hauptaum. Dann wird Gefäß 3 gekühlt und das Lösungsmittel überdestilliert. Beim Auftauen bildet sich in der Kälte zunächst eine blaue Lösung von Kalium in DMÄ. NIPCA löst sich auf und reagiert mit Kalium zum blauen Radikal anion, dessen Lösung dann in das als Küvette dienende Anschlußstück 3 b überführt wird. Verdünnungen können durch Kühlung der Küvette mit flüssigem Stickstoff durchgeführt werden, wobei Lösungsmittel aus dem Hauptaum übergeht.

Zur elektrochemischen Oxydation des NIPCA wird Acetonitril (Fluka, puriss.) als Lösungsmittel verwendet, das durch mehrmalige Destillation über Phosphorpentoxid (zuletzt in der Vakuumapparatur) entwärts wird. Die Oxydation findet im Gefäß 4 statt, in dem Natriumperchlorat als Leitelektrolyt und NIPCA vorgelegt werden. Acetonitril wird im Vakuum und unter Kühlung des Gefäßes hineindestilliert, worauf mehrere Stunden elektrolysiert wird. Gefäß 4 wird dann abgetrennt und die grüne Lösung aus dem Hauptaum in die seitlich angebrachte Küvette überführt.

1.3. Aufnahme der Spektren

Alle Absorptionsspektren wurden mit einem registrierenden Beckman-DK-2A-Spektralphotometer aufgenommen. Die effektive Schichtdicke der runden Küvetten, bestimmt durch Vergleich der Extinktion einer Lösung mit der in 1 cm-Küvetten gemessenen, betrug 1,1 cm.

1.4. Aufnahme der Polarogramme

Die Polarogramme wurden mit einem Gerät der Fa. Methrom (Polarecord E 261) aufgenommen. Reduziert wurde mit einer Quecksilbertropfkathode in wasserfreiem Dimethylformamid gegen eine gesättigte Kalomelektrode, die vom Hauptgefäß durch eine mit Agar-Agar/DMF/Tetrabutylammoniumperchlorat (Leitelektrolyt) gefüllte Brücke getrennt war. Die Konzentration des Leitelektrolyten war 0,1 molar. Die $2 \cdot 10^{-3}$ molare NIPCA-Lösung wurde vor Aufnahme des Polarogramms etwa 10 Minuten mit Stickstoff gespült, der durch BTS-Katalysator (BASF) bei 70 °C sauerstofffrei gemacht wurde.

Die Oxydation erfolgte an einer rotierenden Platin-elektrode gegen eine gesättigte Kalomelektrode in wasserfreiem Acetonitril. Natriumperchlorat diente in 0,1 molarer Lösung als Leitelektrolyt, die NIPCA-Konzentration betrug 10^{-4} Mol/l.

⁷ W. E. BADCOCK u. K. H. PAUSACKER, J. Chem. Soc. London 1951, 1371.

⁸ T. S. STEVENS u. S. H. TUCKER, J. Chem. Soc. London 123, 2140 [1923].

2. Die Ionisierungsenergie des NIPCA

Zur Bestimmung der Ionisierungsenergie gibt es direkte und indirekte Verfahren. Die direkten Bestimmungsmethoden sind Photoionisation (PI), Vakuumultraviolettspektroskopie (UV), Photoelektronspektroskopie (PES) und Massenspektrometrie ("electron impact"). Die drei erstgenannten Verfahren liefern ausgezeichnet übereinstimmende Werte, während die nach der vierten Methode von verschiedenen Arbeitsgruppen erzielten Ergebnisse kaum miteinander vergleichbar sind. Die indirekten Verfahren beruhen auf der Messung oder Berechnung von Größen, die von der Ionisierungsenergie abhängig sind und an den direkten Verfahren geeicht werden. Diese Größen sind die Absorptionsmaxima von Charge-Transfer (CT)-Komplexen, die Halbstufenpotentiale der polarographischen Oxydation und die Hückel-Koeffizienten der höchsten besetzten Molekülorbitale.

In dieser Arbeit wurden die indirekten Verfahren angewendet, wobei teilweise neue Eichfunktionen für die von der Ionisierungsenergie abhängigen Werte erstellt wurden; hierzu wurden ausschließlich verlässliche PI-, UV- und PES-Werte herangezogen (Tab. 1).

Zwischen Ionsierungsenergie und polarographischem Halbstufenoxidationspotential ($E_{1/2}^{O_x}$) ist eine annähernd lineare Beziehung zu erwarten⁹, was durch eine Arbeit von PYSH¹⁰ experimentell bestätigt wurde. Die $E_{1/2}^{O_x}$ -Werte von Pysh wurden unter Zugrundelegung neuerer experimenteller Ionsierungsenergien zur Aufstellung einer linearen Eichfunktion benutzt (Abb. 2, Tab. 1), die von der von PYSH¹⁰ angegebenen nur unwesentlich abweicht.

$$I = 5,75 + 1,50 E_{1/2}^{O_x} \text{ (eV).} \quad (1)$$

Der für NIPCA experimentell gefundene Wert beträgt $E_{1/2}^{O_x} = 1,15 \text{ eV}$, womit sich nach (1) ergibt:

$$I(\text{NIPCA}) = 7,47 \text{ eV.}$$

Dieser Wert liegt deutlich niedriger als der bisher auf Grund von CT-Spektren für NIPCA¹¹ bzw. N-Äthylcarbazol¹² angenommene Wert von $I = 7,8 \text{ eV}$. Die Photonenenergie im Maximum der CT-Absorption ($h\nu_{CT}$) hängt nach BRIEGLER^{13, 14} von der

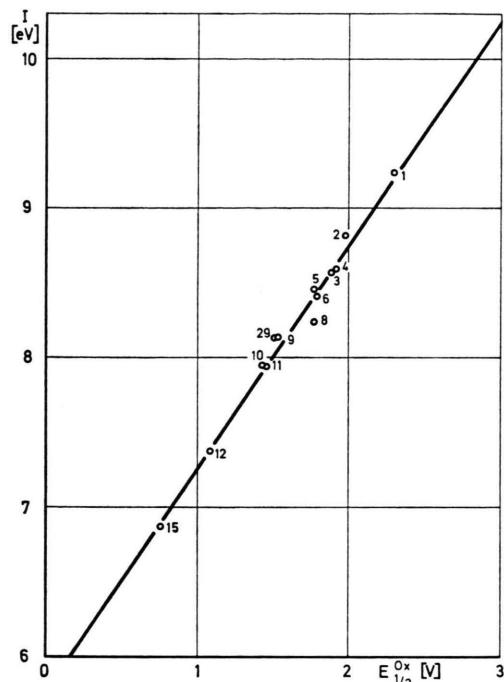


Abb. 2. Abhängigkeit des Halbstufenoxidationspotentials von der Ionisierungsenergie. Werte und Numerierung nach Tab. 1. Die beste Gerade, berechnet nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, ist $I = 5,75 + 1,50 E_{1/2}^{O_x}$.

Ionsierungsenergie des Donators wie folgt ab:

$$h\nu_{CT} = I - c_1 + c_2 / (I - c_1). \quad (2)$$

Dabei sind c_1 und c_2 Konstanten, die für einige Elektronenakzeptoren von BRIEGLER und CZEKALLA (l. c.¹⁴) ermittelt wurden.

In Abb. 3 und 4 sind die CT-Spektren des NIPCA mit den Akzeptoren Tetracyanäthylen und Chloranil dargestellt. Die CT-Banden können in je zwei Einzelbanden aufgelöst werden. Die bei niedrigerer Frequenz liegende, schwächere Teilbande sollte einem Elektronenübergang vom höchsten besetzten MO des NIPCA zum jeweiligen Akzeptor entsprechen und daher nach Beziehung (2) zur Bestimmung der Ionsierungsenergie (I_1) benutzt werden. Aus der Frequenz der intensiveren Teilbande ergibt sich dann nach derselben Beziehung die dem zweithöchsten MO entsprechende Ionsierungsenergie (I_2).

Die Werte sind in Tab. 2 angegeben. Die für I_1 bestimmten Werte stimmen mit dem polarographisch

⁹ A. STREITWIESER JR., Molecular Orbital Theory for Organic Chemists, Wiley & Sons, New York 1962.

¹⁰ E. S. PYSH u. N. C. YANG, J. Am. Chem. Soc. **85**, 2124 [1963].

¹¹ J. H. SHARP, J. Phys. Chem. **70**, 584 [1966].

¹² W. KLÖPFFER u. W. WILICKS, Makromol. Chem. **115**, 156 [1968].

¹³ G. BRIEGLER, Elektronen-Donator-Acceptor-Komplexe, Springer, Berlin 1961.

¹⁴ G. BRIEGLER u. J. CZEKALLA, Z. Elektrochem. **63**, 6 [1959].

Nr.	Substanz	I^a (Methode) ^b eV	Ref.	$E_{1/2}^{ox}$ V	m_m^e	A^h eV	Ref.	$-E_{1/2}^{red}$ ^j V	m_{m+1}^e
1	Benzol	9,245 \pm 0,01 (PI) 9,24 \pm 0,02 (PI) 9,247 (UV) 9,24 (UV)	15 16 17 18	2,30	1,000				- 1,000
2	Toluol	8,82 \pm 0,01 (PI) 8,822 (UV) 8,81 \pm 0,02 (PI)	15 19 16	1,98					
3	o-Xylol	8,56 \pm 0,01 (PI) 8,56 \pm 0,02 (PI) 8,58 (UV)	15 16 19	1,89					
4	m-Xylol	8,56 \pm 0,01 (PI) 8,59 \pm 0,02 (PI)	15 16	1,91					
5	p-Xylol	8,445 \pm 0,01 (PI) 8,48 (UV) 8,44 \pm 0,02 (PI)	15 20 16	1,77					
6	Mesitylen	8,40 \pm 0,01 (PI) 8,41 \pm 0,02 (PI)	15 16	1,80					
7	Triphenylen			1,55	0,684	0,284 \pm 0,020	25	2,49	- 0,684
8	Biphenyl	8,27 \pm 0,01 (PI) 8,20 \pm 0,05 (PES)	15 21	1,78 ^d	0,705			2,70	- 0,705
9	Naphthalin	8,12 \pm 0,01 (PI) 8,14 \pm 0,02 (PI) 8,12 \pm 0,05 (PES) 8,136 \pm 0,005 (UV)	15 16 21 22	1,54	0,618	0,152 \pm 0,016	25	2,50	- 0,618
10	1-Methyl-naphthalin	7,96 \pm 0,01 (PI)	15	1,43					
11	2-Methyl-naphthalin	7,955 \pm 0,01 (PI)	15	1,45					
12	Anthracen	7,38 \pm 0,03 (PI)	16	1,09	0,414	0,552 \pm 0,061 0,57 \pm 0,02	25 26	1,96	- 0,414
13	Phenanthren			1,50	0,605	0,308 \pm 0,074	25	2,46	- 0,605
14	Pyren			1,16	0,445	0,579 \pm 0,064 0,50 \pm 0,03	25 26	2,11	- 0,445
15	Tetrazen	6,88 \pm 0,03 (PI)	16	0,77	0,295	0,88 \pm 0,04	26	1,58	- 0,295
16	Benz-a-anthracen			1,18	0,452	0,696 \pm 0,045	25	2,00	- 0,452
17	Benz-c-phenanthren				0,568	0,542 \pm 0,040	25	2,27	- 0,568
18	Chrysen			1,35	0,520	0,419 \pm 0,036	25	2,30	- 0,520
19	Dibenz-a,h-anthracen			1,19	0,473	0,676 \pm 0,122	25	2,03	- 0,473
20	Dibenz-a,j-anthracen			1,26	0,492	0,686 \pm 0,155	25	2,03	- 0,492
21	Benz-a-pyren			0,94	0,372 ^f	0,829 \pm 0,121	24	1,85	- 0,372 ^f
22	Picen			1,33	0,502	0,490 \pm 0,110	24	2,25 ^k	- 0,502
23	Azulen	7,431 \pm 0,006 (UV) 7,42 \pm 0,05 (PES)	23 21		0,477	0,656	24	1,64	- 0,400
24	Styrol	8,47 \pm 0,02 (PI)	15		0,662			2,37	- 0,662
25	t-Stilben	7,5 (PI)	24		0,504			2,16	- 0,504
26	Diphenylbutadien	7,3 (PI)	24		0,385 ^g			2,00	- 0,385 ^g
27	Anilin	7,70 \pm 0,02 (PI) 7,69 \pm 0,02 (PI)	15 16		(0,544) ^f				
28	p-Benzo-chinon	9,68 \pm 0,03 (PI)	16			1,37 \pm 0,08 ⁱ	26	0,51 ^l	

Tab. 1.

^a I = Ionisierungsenergie. ^b PI = Photoionisationsmethode; UV = Bestimmung aus der Konvergenzwellenlänge von Rydberg-Serien im fernen Ultraviolett; PES = Photoelektronenspektroskopie; die ausgezeichnete Übereinstimmung von PES- und PI-Werten geht aus einer neuen Arbeit von DEWAR²⁷ hervor.

^c Polarographische Halbstufen-Oxydationspotentiale, gemessen von PYSH und YANG¹⁰ in Acetonitrillösung mit rotierender Platinielektrode, gegen eine gesättigte Kalomelelektrode.

^d Halbstufenpotential nach H. LUND (Acetonitril, 0,1 Ag⁺/Ag), umgerechnet auf gesättigte Kalomelelektrode (+0,30 V)¹⁰.

^e m_m und m_{m+1} sind die Hückel-Koeffizienten des höchsten besetzten und des niedrigsten leeren Molekülorbitals⁹ nach HEILBRONNER und STRAUB²⁸.

^f s. Literaturzitat²⁹. ^g s. Literaturzitat³⁰.

^h A = Elektronenaffinität, experimentelle Werte nach der Elektroneneinfangmethode ("determined intercept"-Werte).

ⁱ Experimenteller Wert nach der Magnetrontechnik von FARRAGHER und PAGE³¹.

^j Polarographische Halbstufenreduktionspotentiale, gemessen in Dioxan/Wasser (75/25) gegen eine gesättigte Kalomelelektrode^{9,32}.

^k In 2-Methoxyäthanol gegen Bodenquecksilber gemessenes Halbstufenpotential +0,46 V zur Umrechnung auf die Kalomel-elektrode.

^l Lösungsmittel Acetonitril, Halbstufenpotential gemessen von DAVIS³³.

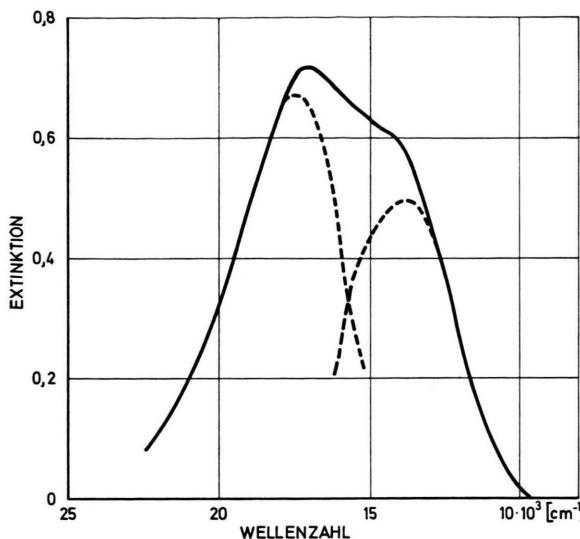


Abb. 3. Charge-Transfer-Spektrum des Komplexes N-Isopropylcarbazol/Tetracyanäthylen (10 g/l bzw. 0,5 g/l) in Methylenechlorid.

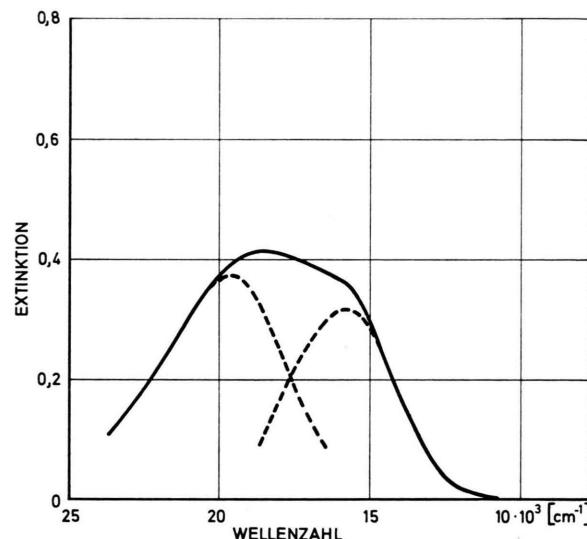


Abb. 4. Charge-Transfer-Spektrum des Komplexes N-Isopropylcarbazol (20 g/l)/p-Chloranil (1 g/l) in Methylenechlorid.

Acceptor	$h\nu_{CT}(1)$	I_1	$h\nu_{CT}(2)$	I_2	ΔI
Tetracyan-äthylen	1,68	7,34	2,16	7,99	0,65
p-Chloranil	1,95	7,39	2,41	7,91	0,52

Tab. 2. Charge-Transfer-Maxima und Ionisierungsenergien des NIPCA. Alle Zahlenangaben in eV; I_1 und I_2 berechnet mit den Brieglebschen Werten für c_1 und c_2 ^{13, 14}.

ermittelten Wert soweit überein, als es die Genauigkeit dieser indirekten Verfahren (etwa $\pm 0,1$ eV) erwarten lässt. Die erste Ionisierungsenergie des NIPCA beträgt also $I_1 = 7,4$ eV. Der oben genannte höhere Wert ergibt sich, wenn man der Auswertung das Maximum der Gesamtbande zugrunde legt.

Nach der Hückel-Molekülorbital-Theorie (HMO), aus der sinnvolle Werte allerdings nur durch Korre-

lation mit Meßergebnissen gewonnen werden können, ist die erste Ionisierungsenergie bis auf das Vorzeichen identisch mit der Energie des höchsten gefüllten MO, die zweite mit der Energie des zweithöchsten, also allgemein:

$$-I_i = E_i = \alpha + m_i \beta; \quad (3)$$

α = Coulomb-Integral, β = Austauschintegral, m_i = Hückel-Koeffizient des i -ten Orbitals.

Bei aromatischen Kohlenwasserstoffen werden die α und β für alle Kohlenstoffatome und Bindungen gleichgesetzt. Für diese Verbindungen ist die lineare Beziehung für die Koeffizienten der höchsten besetzten MO (m_m) recht gut erfüllt (Abb. 5). Bei Anwesenheit von Heteroatomen müssen für das Heteroatom und seine Bindungen Werte für α und β ge-

Fußnoten zu Tabelle 1:

- ¹⁵ K. WATANABE, T. NAKAYANA u. J. MOTTLE, J. Quant. Spectr. Radiative Transfer **2**, 369 [1962].
- ¹⁶ A. TERENIN u. F. VILESSOV, Advan. Photochem. (herausgegeben von W. A. NOYES JR., G. S. HAMMOND u. J. N. PITTS JR.), Wiley & Sons, New York 1964, Band **2**, 385.
- ¹⁷ P. G. WILKINSON, Can. J. Phys. **34**, 596 [1956].
- ¹⁸ W. C. PRICE, J. Chem. Phys. **3**, 439 [1935].
- ¹⁹ W. C. PRICE u. A. D. WALSH, Proc. Roy. Soc. London A **191**, 22 [1947].
- ²⁰ V. J. HAMMOND, W. C. PRICE, J. P. TEEGAN u. A. D. WALSH, Discussions Faraday Soc. **9**, 53 [1950].
- ²¹ J. H. D. ELAND u. C. J. DANBY, Z. Naturforsch. **23a**, 355 [1968].
- ²² J. G. ANGUS, B. J. CHRIST u. G. C. MORRIS, Austral. J. Chem. **21**, 2153 [1968].
- ²³ L. B. CLARK, J. Chem. Phys. **43**, 2566 [1965].
- ²⁴ A. TERENIN, Proc. Chem. Soc. **1961**, 321.
- ²⁵ R. S. BECKER u. E. CHEN, J. Chem. Phys. **45**, 2403 [1966].
- ²⁶ L. E. LYONS, G. C. MORRIS u. L. J. WARREN, J. Phys. Chem. **72**, 3677 [1968].
- ²⁷ M. J. S. DEWAR u. S. D. WORBEY, J. Chem. Phys. **50**, 654 [1969].
- ²⁸ E. HEILBRONNER u. P. A. STRAUB, Hückel Molecular Orbitals, Springer, Berlin 1966.
- ²⁹ R. BEUKERS u. A. SZENT-GYÖRGYI, Rev. Trav. Chim. **81**, 255 [1962].
- ³⁰ J. KONTECKÝ, Z. Phys. Chem. Frankfurt **52**, 8 [1967].
- ³¹ A. L. FARRAGHER u. F. M. PAGE, Trans. Faraday Soc. **62**, 3072 [1966].
- ³² R. POINTEAU, Ann. Chim. Paris (13) **7**, 669 [1962].
- ³³ K. M. C. DAVIS, P. R. HAMMOND u. M. E. PEOVER, Trans. Faraday Soc. **61**, 1516 [1965].

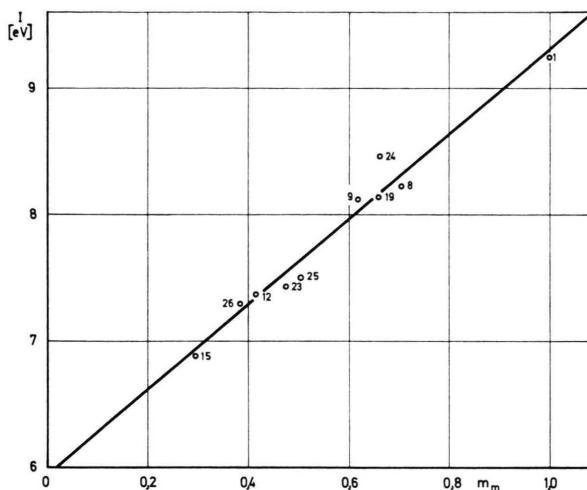


Abb. 5. Beziehung zwischen dem Hückel-Koeffizienten des höchsten besetzten Molekülorbitals (m_m) und der Ionisierungsenergie; Werte und Numerierung nach Tab. 1. Die beste Gerade wird durch $I = 5,93 + 3,39 m_m$ ausgedrückt.

schätzt werden, wodurch weitere Fehlermöglichkeiten in die HMO-Methode eingebracht werden. Eine HMO-Rechnung für Carbazol mit den Schätzungen $\alpha_N = \alpha + \beta$ und $\beta_{CN} = \beta$ wurde von SCHMID³⁴ veröffentlicht. Mit seinen Werten für $m_m = 0,511$ und $m_{m-1} = 0,705$ erhalten wir nach der Eichfunktion (Abb. 5) für $I_1 = 7,66$ eV und für $I_2 = 8,32$ eV. Die Differenz der beiden ersten Ionisierungsenergien ergibt sich demnach zu $\Delta I = 0,66$ eV. Dieser Wert stimmt gut überein mit der aus den CT-Spektren abgeleiteten Energiedifferenz von 0,52 bzw. 0,65 eV und erhärtet somit die Annahme, daß die in den CT-Spektren beobachtete Bandenaufspaltung durch zwei benachbarte Ionisierungsenergien hervorgerufen wird, wobei die zweite Ionisierungsenergie

$$I_2 \approx 8,0 \text{ eV}$$

beträgt.

3. Die Elektronenaffinität des NIPCA

Experimentelle Werte der Elektronenaffinität (A) mehrerer aromatischer Moleküle wurden neuerdings mit der Elektroneneinfangmethode²⁵ erzielt. Auch hier können Größen, die von A abhängen, durch Eichung an den experimentellen Werten zur Bestimmung der Affinität herangezogen werden. Solche Größen sind das Halbstufenpotential ($E_{1/2}^{\text{Red}}$) und der Hückel-Koeffizient des niedrigsten leeren MO (m_{m+1})⁹.

³⁴ R. W. SCHMID, Helv. Chim. Acta **45**, 1982 [1962].

Die in Tab. 1 gesammelten experimentellen Werte der Elektronenaffinitäten und die graphischen Darstellungen (Abb. 6 und 7) zeigen, daß die Messung

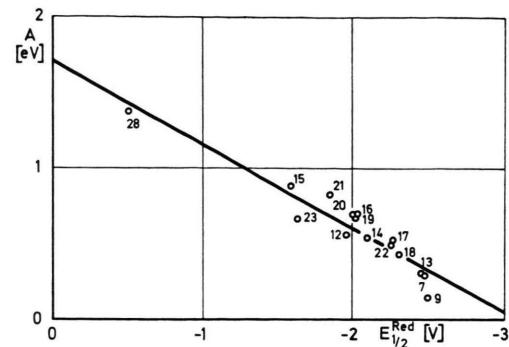


Abb. 6. Elektronenaffinität als Funktion des Halbstufenreduktionspotentials; Werte nach Tab. 1. Beste Gleichung: $A = 1,71 + 0,55 E_{1/2}^{\text{Red}}$.

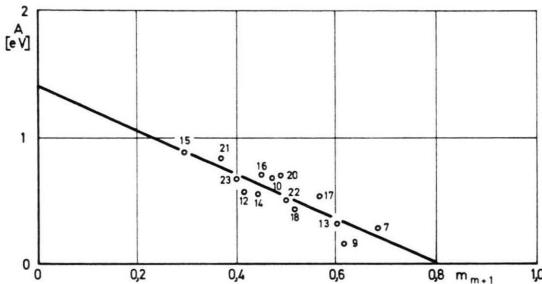


Abb. 7. Beziehung zwischen Hückel-Koeffizienten des niedrigsten leeren Molekülorbitals (m_{m+1}) und Elektronenaffinität; Werte nach Tab. 1. Beste Gerade: $A = 1,40 + 1,74 m_{m+1}$.

der Elektronenaffinität mit noch größerer Unsicherheit (etwa $\pm 0,2$ eV) behaftet ist als die der Ionisierungsenergie. Entsprechend muß man den indirekt bestimmten Elektronenaffinitäten eine höhere Fehlerbreite zumessen. Das Halbstufenreduktionspotential des NIPCA beträgt $E_{1/2}^{\text{Red}} = -3,1$ eV, was nach Abb. 6 bedeutet, daß die Elektronenaffinität des NIPCA $A = 0,0$ eV beträgt. Aus dem Hückel-Koeffizienten des niedrigsten leeren MO ($m_{m+1} = 0,792$)³⁴, der mit der Elektronenaffinität in gleicher Weise zusammenhängt wie der des höchsten gefüllten MO mit der Ionisierungsenergie (vgl. Abschnitt 2), errechnet sich die Elektronenaffinität des Carbazols ebenfalls zu $A = 0,0$ eV.

4. Radikalionenspektren

4.1. Radikalanion

Die Reduktion von NIPCA mit Kalium in Dimethoxyäthan (vgl. Abschnitt 1.2) liefert eine blaue

Lösung, deren gut aufgelöstes ESR-Spektrum die Bildung des $\text{NIPCA}^{\cdot-}$ beweist. Das Absorptionspektrum einer solchen Lösung ist gemeinsam mit dem des neutralen Moleküls in Abb. 8 dargestellt. Es zeigt drei ausgeprägte Banden bei 7500, 14 900

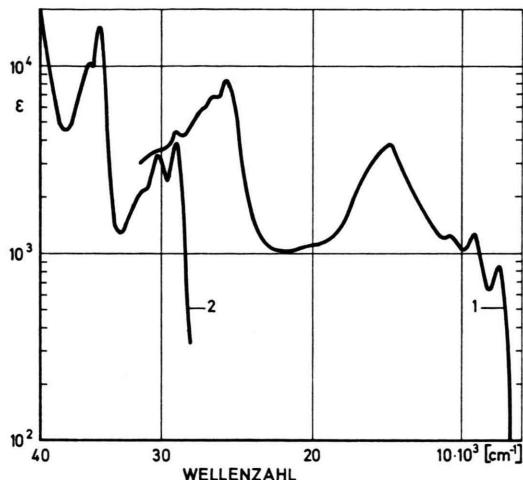


Abb. 8. Absorptionsspektren des Radikalions $\text{NIPCA}^{\cdot-}$ (1) und des neutralen Moleküls NIPCA (2) in 1,2-Dimethoxyäthan. Der molare dekadische Absorptionskoeffizient ϵ ist für das Ion unter der Annahme quantitativer Reduktion berechnet.

und 25 600 cm^{-1} . Ob im infraroten Bereich unter 6000 cm^{-1} eine elektronische Absorptionsbande auftritt, kann infolge der Absorption des Lösungsmittels nicht entschieden werden. Die im Spektrum der reduzierten Lösung vorhandene Absorption bei 29 000 cm^{-1} dürfte auf Reste von nicht reduziertem NIPCA zurückzuführen sein, da die Intensität dieser Bande, bezogen auf die sicher zum Ion gehörige Bande bei 25 600, bei verschiedenen Ansätzen (Reduktionszeit einige Minuten bis zu einer Stunde) zwar ähnlich, aber nicht völlig identisch ist, wie die der anderen Banden des Spektrums.

Der kurzwellige Teil des Spektrums entspricht dem von REMBAUM und Mitarbeitern³⁵ publizierten Spektrum (-88°C) des mit Natrium in Tetrahydrofuran reduzierten N-Äthylcarbazols.

4.2. Radikalkation

Bei der elektrochemischen Oxydation des NIPCA in Acetonitril färbt sich die Lösung grün; das ESR-Spektrum zeigt die radikalische Natur des Oxydationsproduktes an. Das Absorptionsspektrum (Abb.

9) ist von dem des Anions deutlich unterschieden und weist zwei gut ausgeprägte Banden bei 9500 und 23 500 cm^{-1} auf. Im Minimum zwischen den beiden starken Banden (15 000 bis 20 000 cm^{-1}) liegen drei Schultern, die eventuell einem dritten,

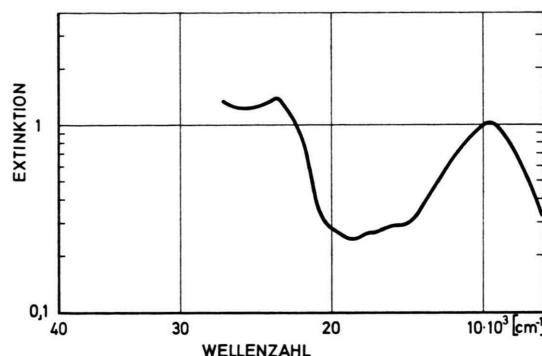


Abb. 9. Absorptionsspektren des Radikalkations $\text{NIPCA}^{\cdot+}$ in Acetonitril (Gesamtkonzentration = $5 \cdot 10^{-8}$ m).

schwachen Übergang des Kations zugerechnet werden können. Die Extinktionskoeffizienten konnten nicht ermittelt werden, da der Oxydationsgrad nicht bekannt ist. Sie liegen im Maximum der beiden starken Banden sicher über 1000 $1/\text{Mol cm}$.

5. Diskussion

NIPCA kann man sich formal durch Einführung der Isopropylaminogruppe in das Biphenyl entstanden denken. Der Carbazolteil des Moleküls, der 14 π -Elektronen aufweist und somit mit Phenanthren und Anthracen iso- π -elektronisch ist, hat auf Grund seiner hohen Mesomerieenergie von etwa 4 eV³⁶ rein aromatischen Charakter. Es ist daher sinnvoll, Ionisierungsenergie und Elektronenaffinität mit den entsprechenden Werten der aromatischen Verbindungen Biphenyl, Phenanthren und Anthracen zu vergleichen, wie dies in Abb. 10 dargestellt ist. Die Gegenüberstellung zeigt, daß NIPCA gemeinsam mit Anthracen die geringste Ionisierungsenergie in dieser Reihe aufweist. Bemerkenswert ist die kleine Elektronenaffinität, die nicht wie bei den alternierenden Kohlenwasserstoffen mit einer hohen Ionisierungsenergie gekoppelt ist. Die Einführung des Stickstoffatoms bewirkt also im Vergleich mit ähnlichen aromatischen Systemen eine Erniedrigung sowohl der Ionisierungsenergie als auch der Elek-

³⁵ A. REMBAUM, A. EISENBERG, R. HAACK u. R. F. LANDEL, J. Am. Chem. Soc. **89**, 1062 [1967].

³⁶ H. ZIMMERMANN u. H. GEISENFELDER, Z. Elektrochem. **65**, 368 [1961].

tronenaffinität. Eine ähnlich drastische Erniedrigung der Ionisierungsenergie bewirkt die Einführung der Amino- bzw. Methylaminogruppe in Benzol (Abb. 10 und Tab. 1³⁷), wodurch N-Methylanilin etwa

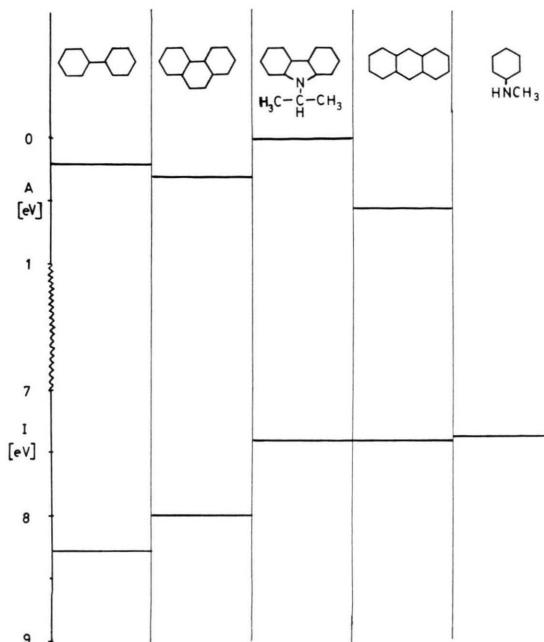


Abb. 10. Vergleich der Ionisierungsenergie und der Elektronenaffinität des NIPCA (3) mit den Verbindungen Biphenyl (1), Phenanthren (2), Anthracen (4) und N-Methylanilin (5). Die Werte für I und A sind teils direkt experimentell bestimmt (Tab. 1), teils mit den Eichfunktionen dieser Arbeit aus Halbstufenpotentialen und Hückel-Koeffizienten (Tab. 1) berechnet.

dieselbe Ionisierungsenergie hat wie NIPCA. Daß die „Amingruppe“ auch in anderen Carbazolderivaten als Donatorgruppe fungiert, zeigte LIPTAY³⁸ durch elektrooptische Messungen am 3,6-Dinitrocarbazol.

Die Lage der leitfähigen Niveaus im festen Zustand („Valenzband“ für Löcher, „Leitungsband“

³⁷ F. I. VILESOV, Soviet Phys.-Uspekhi **6**, 888 [1964].

³⁸ W. LIPTAY, W. EBERLEIN, H. WEIDENBERG u. O. ELFLEIN, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. **71**, 548 [1967].

für Elektronen) läßt sich mit den Werten für I und A nach den folgenden Beziehungen abschätzen:

$$I_f = I - P; \quad A_f = A + P;$$

I_f = Ionisierungsenergie im festen Zustand

= Energieniveau des Valenzbandes;

A_f = Elektronenaffinität im festen Zustand

= Energieniveau des Leitungsbandes.

Die Polarisierungsenergie P des NIPCA-Kristalls wurde von SHARP³⁹ zu 1,5 eV abgeschätzt. Mit diesem Wert ergibt sich $I_f = 5,9$ eV, $A_f = 1,5$ eV und $\Delta E = I_f - A_f = 4,4$ eV.

Nach diesen Werten, die die molekularen Eigenchaften des NIPCA widerspiegeln, erwartet man für den Kristall ein hochliegendes Leitungsband und einen großen Bandabstand.

Die Absorptionsspektren von NIPCA⁻ und NIPCA⁺ zeigen ähnlich wie die entsprechenden Spektren von Kohlenwasserstoffionen mehrere Bänder im Sichtbaren und im nahen Infrarot, die teilweise den Elektronenübergängen des Überschußelektrons bzw. Lochs zuzuordnen sind. Anders als in den alternierenden Systemen, bei denen sich die Übergänge für Elektronen und Loch streng entsprechen (MCLACHLAN⁴⁰), sind die Absorptionsspektren von Anion und Kation des NIPCA deutlich verschieden.

Eine ausführliche Diskussion dieser Spektren an Hand von Näherungsrechnungen wird demnächst veröffentlicht.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Professor W. LIPTAY für Diskussionen, ferner Frau G. KAUFMANN und Herrn G. NAUNDORF für die Durchführung der experimentellen Arbeiten, sowie der Battelle-Stiftung für die Finanzierung der Arbeit.

³⁹ J. H. SHARP, J. Phys. Chem. **71**, 2587 [1967].

⁴⁰ MCLACHLAN, Mol. Phys. **4**, 49 [1961].