

Die Kationenpumpe in ihrer Bedeutung für die Flüssigkeitsverschiebung in der Linse und die Permeabilitätskatarakt

H. Pau, R. Kuhlmann und I. Schröter

Universitäts-Augenklinik Düsseldorf (Direktor: Prof. Dr. H. Pau)

Eingegangen am 27. November 1972

The Significance of the Cation Pump for the Shift of Fluid in the Lens and the Permeability Cataract

Summary. Opacities in the lens are not the direct sequence of metabolic disturbance rather are they to be seen as an indirect consequence of the accumulation of fluid caused by the disturbance of metabolism. After death, i.e. after maximum disturbance there is an immediate egress of potassium from the lens and an intake of sodium. Initially the smaller K molecule and hydration water leave the lens more rapidly and in greater quantity leading to a loss of weight, increasingly so (e.g. in the refrigerator) for approximately 3 days. After that the increasingly freer passage of electrolytes leads to a higher osmotic pressure (Donnan equilibrium) and swelling of the lens. Thus the cation pump is disturbed and the physiological permeability (much K, little Na) changes to physical permeability (much Na, less K) accompanied by an increase of H_2O and opacification commencing beneath the capsule (permeability cataract).

Zusammenfassung. Linsentrübungen sind keine direkten Folgen einer Stoffwechselschädigung, sondern indirekte Folgen der durch die Stoffwechselschädigung bedingten Flüssigkeitsvermehrung. Nach dem Tode, d.h. einer schwersten Stoffwechselstörung, tritt sofort Kalium aus der Linse aus und Natrium ein. Das zunächst schneller und vermehrt austretende kleinere K + Hydratationswasser führt zu einem Gewichtsverlust, der z.B. im Kühlschrank etwa 3 Tage lang zunimmt; dann kommt es mit zunehmend freiem Durchtritt der Elektrolyte zu einer Erhöhung des osmotischen Druckes (Donnan-Effekt) und Linsenquellung. Bei Schädigung der Kationenpumpe geht damit die physiologische (viel K, wenig Na) in die physikalische (viel Na, wenig K) Permeabilität mit H_2O -Vermehrung und subcapsulär beginnenden Trübungen = Permeabilitätskatarakt über.

Der normale Linsenstoffwechsel ist für das Klarbleiben der Linse von entscheidender Bedeutung. In zahlreichen Untersuchungen wurden besonders *in vitro*, aber auch *in vivo* das Verhalten der Enzyme, der Kohlenhydrate und Eiweiße unter den verschiedensten Bedingungen untersucht (s. Symposium on the lens. Invest. Ophthalm. 4, 373—814, 1965 und Biochemistry of the Eye. XX. Internat. Congress of Ophthalmology, S. Karger, Basel-New York, 1968). Die erste hier zu beant-

wortende Frage ist die, wie eine Stoffwechselschädigung zur Katarakt führen kann.

Daß das Sistieren des Stoffwechsels als solches zu keinerlei Trübung führt, ist leicht zu zeigen:

1. Eine dem Auge entnommene Linse nimmt durch Austrocknung an Gewicht ab, sie bleibt aber so lange klar und durchsichtig, bis der Flüssigkeitsverlust so stark wird, daß sich einzelne Eiweißschichten aufblättern.

2. Beim Einbringen in stark hypertone Lösungen größerer Moleküle — z.B. 50% Saccharose — bleibt die Linse nach Verschwinden der subcapsulären weißen Flüssigkeitströpfchen (Salzkatarakt) unter starker Eiweißschumpfung lange Zeit klar und durchsichtig.

3. Es ist schon lange bekannt, daß die harten, bräunlichen Kerne von Linsen sehr alter Patienten keinen Stoffwechsel mehr aufweisen, häufig aber klar und durchsichtig sind.

Eine Linsentrübung ist also nicht die direkte Folge einer Schädigung des Stoffwechsels. Stets kommt es dagegen zu einer grauen Linsentrübung, wenn physiologische Flüssigkeiten (Kammerwasser, Glaskörper, Ringerlösung usw.) mit Linseneiweiß zusammenkommen, wie nach Kapselverletzungen (Discision), Wasserspalten, lamellärer Zerklüftung, Bildung von Flüssigkeitsvacuolen, Untersuchungen *in vitro* usw. Es resultiert dann eine Denaturierung und eine zunehmende graue Trübung.

Da nun die verschiedensten Stoffwechselschädigungen zu einer Änderung der Flüssigkeitsmenge (bei Flüssigkeitsvermehrung mit Linsentrübung) und Verschiebung des Kationengehaltes führen, lautet die hier gestellte Frage:

Wie verhalten sich:

1. H_2O , sowie
2. die Elektrolyte K und Na in der unberührten Linse nach Unterbrechung des Stoffwechsels, d. h. hier nach dem Tode?

I. Die postmortale Flüssigkeitsverschiebung in der Linse

Römer verglich das Gewicht der direkt entnommenen Linse mit dem Gewicht der nach unterschiedlich langer Zeit aus dem enucleierten Bulbus entnommenen Linse. Die Linsen nahmen dabei stets zunächst an Gewicht ab. Auch an menschlichen Augen fand Heine erst 12, 28 bzw. 36 Std nach dem Tode entnommene Linsen deutlich leichter, als die schon 4 bzw. 6 Std postmortal gewogenen Linsen.

Nach Fallani kommt es 72 Std nach dem Tode zum Wasser-Gewichtsverlust der Linsen. Bei Rinderaugen besteht auch 3 Tage nach dem Tode im Kühlschrank eine deutliche Gewichtsabnahme gegenüber der sofort postmortal entnommenen Geschwisterlinse des anderen Auges (Pau, 1951 c).

Auch unlädierte Rinderlinsen, die mit dem Ciliarkörper und der unberührten Zonula Zinni in Ringerlösung gebracht wurden, waren nach mehreren Std leichter, als die sofort entnommenen Vergleichslinsen (Pau, 1951 c).

Es sollte nun zunächst noch einmal das postmortale Verhalten der Linsenflüssigkeit, d. h. des Linsengewichtes kontrolliert werden.

Methoden

Zur Untersuchung der postmortalen Flüssigkeitsverschiebung, d. h. des Wassergehaltes in der Linse, wurden von uns jeweils 2 Geschwisterlinsen untersucht:

Die Linse eines Rinderauges wurde dabei sofort entnommen und gewogen, die Linse des anderen Auges wurde erst nach unterschiedlicher Zeit aus dem im Brutschrank (35°C), bei Zimmertemperatur (18°C), oder im Kühlschrank (6°C) aufbewahrten Geschwisterbulbus entfernt und gewogen. Da die Linsen beider Augen häufig ein unterschiedliches Gewicht aufweisen, wurden die Mittelwerte von jeweils 10 Doppellinsen ausgewertet. Es wurde der Gewichtsunterschied zwischen der sofort entnommenen und der erst nach X Std oder Tagen entnommenen Linse in % angegeben.

Ergebnisse

Im *Brutschrank* (35°C) war die X Std später entnommene Geschwisterlinse Y% leichter (—) als die sofort nach dem Tode entnommene:

4 Std	post mortem =	-0,7%	± 0,7	n = 10
8 Std	post mortem =	-1,7%	± 0,3	n = 10
16 Std	post mortem =	-3,6%	± 0,4	n = 10
24 Std	post mortem =	-5,3%	± 0,5	n = 10

Bei *Zimmertemperatur* (18°C) war die X Std später entnommene Geschwisterlinse Y% leichter (—) als die sofort nach dem Tode entnommene:

4 Std	post mortem =	-1,2%	± 0,3	n = 10
8 Std	post mortem =	-0,8%	± 0,4	n = 10
16 Std	post mortem =	-2,9%	± 1,0	n = 10
24 Std	post mortem =	-5,8%	± 0,4	n = 10
36 Std	post mortem =	-7,8%	± 0,6	n = 10
2 Tage	post mortem =	-8,4%	± 0,9	n = 10
3 Tage	post mortem =	-4,7%	± 0,6	n = 10
4 Tage	post mortem =	-4,6%	± 1,4	n = 10
5 Tage	post mortem =	-4,1%	± 1,7	n = 10
6 Tage	post mortem =	-2,5%	± 0,4	n = 10
7 Tage	post mortem =	-0,2%	± 2,3	n = 10

Bei Aufbewahrung im *Kühlschrank* (+6°C) war die X Std später entnommene Geschwisterlinse Y% leichter (—) bzw. schwerer (+) als die sofort nach dem Tode entnommene:

4 Std	post mortem =	-0,8%	± 0,9	n = 10
8 Std	post mortem =	-0,3%	± 0,3	n = 10
16 Std	post mortem =	-0,2%	± 0,4	n = 10
24 Std	post mortem =	-0,9%	± 0,3	n = 10
36 Std	post mortem =	-1,2%	± 2,5	n = 10
2 Tage	post mortem =	-2,7%	± 0,2	n = 10
3 Tage	post mortem =	-4,5%	± 0,5	n = 10

4 Tage post mortem	= -4,0% ± 0,5	n = 10
5 Tage post mortem	= -3,2% ± 0,5	n = 10
6 Tage post mortem	= -2,6% ± 1,5	n = 10
7 Tage post mortem	= -0,8% ± 1,7	n = 10
8 Tage post mortem	= +4,2% ± 1,5	n = 10
9 Tage post mortem	= +6,2% ± 1,1	n = 10

II. Die postmortale Verschiebung von K und Na in der Linse

Die große Bedeutung des intakten Stoffwechsels für die Kationenpumpe der Linse und für verschiedene Kataraktformen wurde häufig untersucht:

So konnten Harris und Gehrsitz zeigen, daß Kaninchenlinsen in geeigneten Lösungen bei niedriger Temperatur Natrium vermehrt und Kalium vermindert enthielten. Bei Erwärmung kam es umgekehrt zum Kaliumeintritt und zum Natriumverlust dieser Linsen. Auch, wenn Glucose als Hauptenergiequelle entfernt und durch Xylose, Fructose oder Galactose ersetzt wurden, kam es zum Kaliumverlust und zur Natriumvermehrung; das gleiche geschieht bei einer Stoffwechselschädigung durch Jodacetat, Fluoride, Cyanid (Harris und Becker). Einen Kaliumverlust und Natriumanstieg konnten Kinoshita, Kern und Merola auch nach 24stündiger Unterkühlung von Kälberlinsen feststellen. Die Innenverschiebung war nach anschließender Inkubation bis 37°C reversibel.

Es sollte nun die postmortale Veränderung der K- und Na-Konzentration in der Linse untersucht werden:

Methode

Die aus den Rinderaugen entnommenen Linsen wurden gewogen, getrocknet, verascht, in 1 *n*-HCl-Lösung und dann in Aqua dest. gelöst. Die K-Na-Bestimmung erfolgte mit dem Eppendorf-Flammenphotometer. Die gefundenen Werte in m Mol wurden durch das Linsenfrischgewicht dividiert. Die hier wiedergegebenen Werte sind Mittelwerte, die aus jeweils 10 Rinderlinsen gewonnen wurden; es handelt sich dabei um m Mol/g Linsenfrischgewicht.

Beim Sistieren des Stoffwechsels erschien es uns wichtig, die Ka-Na-Verschiebung bei verschiedenen Temperaturen zu verfolgen. Die Bulbi wurden deshalb im Brutschrank (+37°C), bei Zimmertemperaturen (+18°C) und im Kühlschrank (+6°C) aufbewahrt und die Linsen nach unterschiedlich langer Zeit dem Bulbus zur Untersuchung entnommen.

Ergebnisse

Wegen stärker auftretender Bulbusveränderungen wurden die Linsen im Brutschrank nur bis zu 24 Std, bei Zimmertemperatur bis zu 4 Tagen und im Kühlschrank bis zu 10 Tagen nach dem Tode entnommen und der K-Na-Gehalt bestimmt.

Wir fanden an Mittelwerten in m Mol/g:

Bei frischen Rinderlinsen

	K $0,0650 \pm 0,0019$	$n = 20$		Na $0,0227 \pm 0,0011$	$n = 20$
--	-----------------------	----------	--	------------------------	----------

Im *Brutschrank* (37° C)

nach 5 Std	K $0,0597 \pm 0,0021$	$n = 10$		Na $0,0226 \pm 0,0030$	$n = 10$
nach 8 Std	K $0,0559 \pm 0,0032$	$n = 10$		Na $0,0324 \pm 0,0011$	$n = 10$
nach 12 Std	K $0,0555 \pm 0,0016$	$n = 10$		Na $0,0245 \pm 0,0018$	$n = 10$
nach 18 Std	K $0,0407 \pm 0,0030$	$n = 10$		Na $0,0355 \pm 0,0013$	$n = 10$
nach 24 Std	K $0,0310 \pm 0,0028$	$n = 10$		Na $0,0321 \pm 0,0024$	$n = 10$

Bei *Zimmertemperatur* (+ 18° C)

nach 5 Std	K $0,0559 \pm 0,0024$	$n = 10$		Na $0,0234 \pm 0,0018$	$n = 10$
nach 8 Std	K $0,0585 \pm 0,0585$	$n = 10$		Na $0,0161 \pm 0,0008$	$n = 10$
nach 12 Std	K $0,0602 \pm 0,0013$	$n = 10$		Na $0,0277 \pm 0,0021$	$n = 10$
nach 16 Std	K $0,0539 \pm 0,0021$	$n = 10$		Na $0,0277 \pm 0,0022$	$n = 10$
nach 24 Std	K $0,0574 \pm 0,0022$	$n = 10$		Na $0,0311 \pm 0,0031$	$n = 10$
in 1½ Tagen	K $0,0449 \pm 0,0027$	$n = 10$		Na $0,0355 \pm 0,0029$	$n = 10$
in 2 Tagen	K $0,0332 \pm 0,0022$	$n = 10$		Na $0,0311 \pm 0,0014$	$n = 10$
in 3½ Tagen	K $0,0375 \pm 0,0029$	$n = 10$		Na $0,0376 \pm 0,0016$	$n = 10$

Bei *Kühlschranktemperatur* (+ 6° C)

nach 4 Std	K $0,0586 \pm 0,0027$	$n = 10$		Na $0,0217 \pm 0,0013$	$n = 10$
nach 6 Std	K $0,0563 \pm 0,0028$	$n = 10$		Na $0,0169 \pm 0,0010$	$n = 10$
nach 8 Std	K $0,0649 \pm 0,0014$	$n = 10$		Na $0,0189 \pm 0,0015$	$n = 10$
nach 12 Std	K $0,0614 \pm 0,0019$	$n = 10$		Na $0,0234 \pm 0,0018$	$n = 10$
nach 16 Std	K $0,0602 \pm 0,0032$	$n = 10$		Na $0,0321 \pm 0,0013$	$n = 10$
nach 24 Std	K $0,0512 \pm 0,0038$	$n = 10$		Na $0,0328 \pm 0,0038$	$n = 10$
nach 2 Tagen	K $0,0500 \pm 0,0038$	$n = 10$		Na $0,0402 \pm 0,0036$	$n = 10$
nach 2½ Tagen	K $0,0524 \pm 0,0037$	$n = 10$		Na $0,0435 \pm 0,0030$	$n = 10$
nach 3 Tagen	K $0,0482 \pm 0,0031$	$n = 10$		Na $0,0387 \pm 0,0042$	$n = 10$
nach 3¼ Tagen	K $0,0399 \pm 0,0042$	$n = 10$		Na $0,0384 \pm 0,0027$	$n = 10$
nach 4 Tagen	K $0,0386 \pm 0,0035$	$n = 10$		Na $0,0453 \pm 0,0017$	$n = 10$
nach 5 Tagen	K $0,0338 \pm 0,0017$	$n = 10$		Na $0,0481 \pm 0,0032$	$n = 10$
nach 7 Tagen	K $0,0272 \pm 0,0021$	$n = 10$		Na $0,0577 \pm 0,0018$	$n = 10$
nach 10 Tagen	K $0,0235 \pm 0,0019$	$n = 10$		Na $0,0657 \pm 0,0015$	$n = 10$

Es sei noch einmal betont, daß wegen der manchmal zu beobachtenden Gewichts-differenz der beiden Geschwisterlinsen jede dieser Zahlen einen Mittelwert aus 10 Rinderlinsen entspricht.

Unsere Ergebnisse zeigen, daß *im Brutschrank* (+ 35—37° C, vgl. Abb. 1) die Kaliumkonzentration in der Rinderlinse abnimmt und nach etwa 24 Std weniger als die Hälfte beträgt. In der gleichen Zeit steigt die Natriumkonzentration (mit großen Schwankungen) deutlich, aber weniger stark an. Nach etwa 20—24 Std ist etwa das gleiche m Mol/g K wie Na in der Linse vorhanden. In der ganzen Zeit, d. h. 24 Std lang, hat sich das Linsengewicht vermindert (bis - 5,3%).

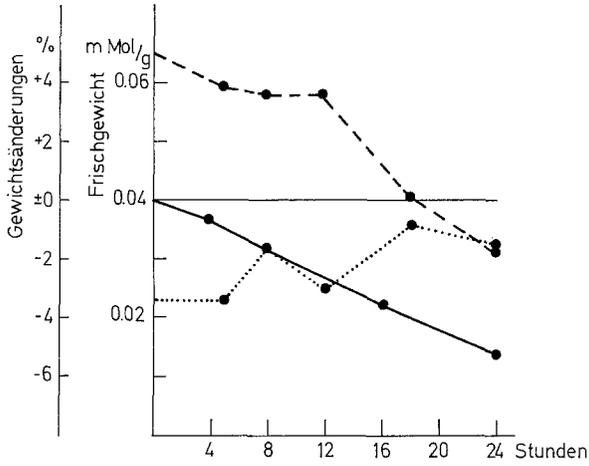


Abb. 1. Bei Brutschranktemperaturen (+35 bis +37° C) beträgt in der Linse nach X Stunden der Gehalt an mMol/g Frischgewicht: ----- Kalium, ····· Natrium, — Die Gewichtsänderungen in %

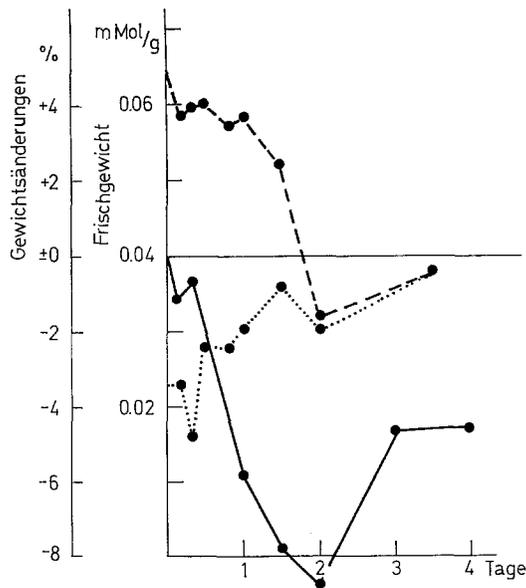


Abb. 2 Bei Zimmertemperatur (+18° C) beträgt in der Linse nach X Tagen der Gehalt an mMol/g Frischgewicht: ----- Kalium, ····· Natrium, — Die Gewichtsänderungen in %

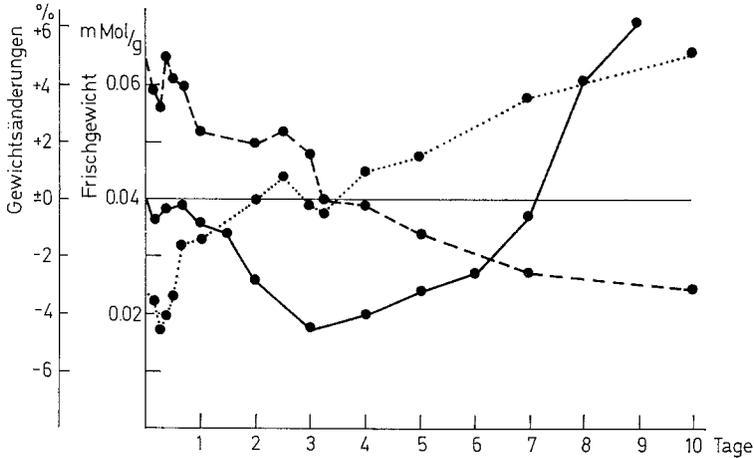


Abb. 3. Bei Kühlschranktemperaturen (+6° C) beträgt in der Linse nach X Tagen der Gehalt an mMol/g Frischgewicht: ----- Kalium, Natrium, — Gewichtsänderungen in %

Bei *Zimmertemperatur* (+18° C, vgl. Abb. 2) nimmt ebenfalls der K-Gehalt stark ab und der Na-Gehalt deutlich zu. Nach etwa 1½ bis 2 Tagen ist gleichviel m Mol/g K wie Na vorhanden. Bis zu diesem Zeitpunkt vermindert sich das Linsengewicht bis auf etwa -8%, um danach stetig anzusteigen.

Im *Kühlschrank* (+6° C, vgl. Abb. 3) nimmt der Kaliumgehalt der Linse nur langsamer ab und der Natriumgehalt steigt langsamer an. Die beiden Kurven treffen sich etwa nach 3 Tagen, d. h., dann ist das m Mol K etwa gleich dem m Mol Na. Bis zu diesem Zeitpunkt verliert die Linse an Gewicht (bis etwa -4,5%) und nimmt dann wieder an Gewicht zu. Nach etwa 7 Tagen hat die Linse etwa das Gewicht wie beim Tode erreicht und nimmt dann schnell weiter Flüssigkeit auf.

Zusammengefaßt ist zu sagen, daß die Rinderlinsen nach dem Tode — bei Schädigung der Kationenpumpe mit Kaliumverlust und Natriumaufnahme — zunächst deutlich an Gewicht abnehmen. Es tritt dabei das kleinere Kalium + Hydrationswasser schneller und vermehrt aus, was zum deutlichen Gewichtsverlust führt. Dann, wenn das gleiche m Mol an Kalium und Natrium in der Linse erreicht ist, besteht der stärkste Flüssigkeitsverlust.

Mit zunehmender Na-Vermehrung und weiterer K-Abnahme nimmt die Linse dann an Gewicht zu, um schließlich stark zu quellen.

III. Flüssigkeitsverschiebung in der Linse in Beziehung zur Kationenpumpe

Seit Höber unterscheidet man die „physiologische“ oder „gerichtete“ Permeabilität, die unter Energieaufnahme aus dem Stoffwechsel zu aktiven Stoffbewegungen auch gegen den Konzentrationsgradienten führt, von der „physikalischen“ Permeabilität, unter der passive Durchlässigkeitseigenschaften einer gegebenen Membranstruktur zu verstehen ist.

Bei regelrechter physiologischer oder gerichteter Permeabilität ist in der Linse K gegenüber Na stark vermehrt vorhanden, beim Übergang der physiologischen in die physikalische Permeabilität ist — entsprechend dem Gehalt, d. h. dem Konzentrationsgradienten der umgebenden Flüssigkeiten (Kammerwasser, Glaskörper) — zunehmend weniger K und mehr Na zu erwarten.

Beim Übergang zur passiven physikalischen Permeabilität tritt nun zunächst das kleinere Kalium + Hydrationsanteil schneller und vermehrt aus, was zum Flüssigkeitsverlust und damit zum Gewichtsverlust führt. Da die Linseneiweiße ein kolloid-osmotisches Druckgefälle zu Kammerwasser-Korpus von etwa 1000 mm H₂O haben (Pau, 1951 b, 1952 e), kommt es dann mit zunehmend freiem Durchtritt der Elektrolyte zu einer Erhöhung des osmotischen Drucks infolge des Donnan-Effektes (Eiweiße werden zurückgehalten, Elektrolyte mit H₂O treten frei durch) und die Linse kann quellen.

Es kommt somit bei einer zunehmenden Schädigung der „physiologischen Linsenmembran“ (die sich zusammensetzt aus der Stoffwechsellleistung von Linsenepithel, oberflächlichen Linsenfasern, aber auch der Zonulalamelle und der Kapsel, sowie deren normaler anatomischer Verbindung) und damit beim Zusammenbrechen der Kationenpumpe zur Flüssigkeitsaufnahme von außen durch die Kapsel.

IV. Die Kationenpumpe in ihrer Bedeutung für verschiedene erworbene Katarakte

Immer, wenn Linseneiweiß mit freier Flüssigkeit in Berührung kommt, tritt eine Eiweißtrübung [Entmischungstrübung (Pau, 1952 d)] auf. Es kommt also beim Zusammenbrechen der Kationenpumpe zur subcapsulären Katarakt. Alle diese auf einer Permeabilitätsänderung der Linsenoberfläche (Übergang von der physiologischen gerichteten in die physikalische Permeabilität) beruhenden Katarakte wurden als „Permeabilitätskatarakt“ (Pau, 1954 f) zusammengefaßt.

Klinisch gehören hierzu alle subcapsulären Stare mit Farbschillern, subcapsulären Vacuolen, tuffsteinartigen Trübungen usw., gleichgültig,

ob es sich um eine *Cataracta complicata* infolge von verschiedenen Entzündungen, Stoffwechselstörungen oder den subcapsulären Altersstar handelt.

Bei einem schnellen Zusammenbrechen der Kationenpumpe kommt es bei der *Cataracta intumescens* (perlmutterartige Quellung) am deutlichsten zur schnellen Trübung und zur Flüssigkeitsvermehrung. Aber auch die *Cataracta matura* (gleichgültig, ob dieser schon primär eine Permeabilitätskatarakt oder ob ihr ein typischer grauer Altersstar mit Erreichung der Kapsel und damit sekundärer Permeabilitätskatarakt zugrunde lag) muß genauso wie jede andere Permeabilitätskatarakt eine deutliche K-Vermehrung und Na-Vermehrung aufweisen.

Es stellte sich heraus (Pau und Leithäuser), daß die Kationenpumpe geschädigt und damit Na gegenüber K im Überschuß vorhanden ist bei der Gruppe der subcapsulären Katarakte (Permeabilitätskatarakt), der *Cataracta matura* und besonders der intumescenzen Katarakt.

Umgekehrt verhalten sich die Elektrolyte weitgehend so wie in der nicht getrübbten, normalen Linse beim „typischen grauen Altersstar“ (*Cataracta supranuclearis*) und beim grauen und braunen Kernstar. Bei diesen Starformen ist also die „physiologische“ Permeabilität und damit die Kationenpumpe als weitgehend intakt anzusehen (Pau, 1950 a).

Literatur

- Fallani, M.: Le modificazioni post-mortali del cristallino. *Minerve medicolegale* (Torino) **80**, 60—64 (1960).
- Harris, J. E., Becker, B.: Cation transport of the lens. *Invest. Ophthalmol.* **4**, 709—729 (1965).
- Harris, J. E., Gehrsitz, L. B.: Significance changes in potassium and sodium content of the lens. A mechanism for lenticular intumescence. *Amer. J. Ophthalmol.* **34**, II, 131—138 (1951).
- Heine, L.: Beiträge zur Physiologie und Pathologie der Linse. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **46**, 525—552 (1898).
- Höber, R.: *Physikal. Chemie der Zellen und Gewebe*. Bern: Stämpfli 1947.
- Kinoshita, J.-H., Kern, H. L., Merola, L. O.: Factors affecting the cation transport of calf lens. *Biochim. biophys. Acta* (Amst.) **47**, 458—466 (1961). *Ref. Zbl. ges. Ophthalmol.* **84**, 116 (1961—1962).
- Pau, H.: Beitrag zur Kataraktgenese. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **150**, 340—357 (1950 a).
- Pau, H.: Zur Mechanik der akkommodativen Linsenverschiebung. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **151**, 565—573 (1951 b).
- Pau, H.: Die Linsenquellung im physiologischen Milieu. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **151**, 352—364 (1951 c).
- Pau, H.: Experimentell erzeugte Linsentrübungen. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **152**, 532—538 (1952 d).
- Pau, H.: Der Kompensationstest bei kationenpermeabler Linsenkapsel. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalmol.* **152**, 539—544 (1952 e).

- Pau, H.: Die Permeabilitätskatarakt. *Klin. Mbl. Augenheilk.* **124**, 1—29, 129—148 (1954f).
- Pau, H., Leithäuser, U.: Die „Kationenpumpe“ in ihrer Bedeutung für die verschiedenen erworbenen Katarakte. *Albrecht v. Graefes Arch. Ophthal.* **166**, 440—450 (1964).
- Römer, P.: Die physiologischen Schwankungen des osmotischen Druckes der intraocularen Flüssigkeit in ihren Beziehungen zum osmotischen Druck des Blutsersums. *Arch. Augenheilk.* **56**, 150—320 (1907).

Prof. Dr. H. Pau
Univ.-Augenklinik
D-4000 Düsseldorf
Moorenstraße
Bundesrepublik Deutschland