

(Aus der pathologisch-anatomischen Abteilung [Vorsteher: Prof. Dr. A. W. Rachmanow] des Staatsinstituts für Physiotherapie und Orthopädie [Direktor: Prof. P. G. Mesernitzky] und des Lehrstuhls für physische Heilmethoden der Moskauer II. Staatsuniversität [Vorsteher: Doz. I. A. Bagaschoff].)

## **Einfluß des galvanischen Stroms auf die Regeneration durchschnittener Nerven. (Experimentelle Untersuchung.)**

Von

**Dr. I. A. Piontkowsky.**

Mit 9 Textabbildungen.

*(Eingegangen am 26. Mai 1930.)*

Der galvanische Strom findet große Anwendung bei der Behandlung der peripherischen Lähmungen. Empirisch und klinisch ist es erwiesen, daß der Strom auf die Regeneration der Nervenfasern augenscheinlich im Sinne einer Beschleunigung der regenerativen Prozesse wirkt. Die vorliegende Arbeit hatte sich zur Aufgabe gestellt, die morphologische Grundlage der Prozesse unterlegen, welche in den regenerierenden Nerven unter dem Einflusse des galvanischen Stroms stattfinden. Zu gleicher Zeit wurden auch Beobachtungen an klinischen Erscheinungen der experimentellen, peripherischen Lähmungen bei nicht behandelten und bei mittels des galvanischen Stroms behandelten Versuchstieren angestellt.

Zu unserem Experiment haben wir uns der Kaninchen bedient. Einem jeden Tiere durchschnitten wir unter lokaler Anästhesie den N. ischiadicus beiderseits. In allen Fällen führten wir diese Operation möglichst in einer und derselben Stelle des Nervens aus. Unmittelbar nach dem Durchschneiden prüften wir nach, wie die Nervenenden liegen, ob sie sich nicht seitwärts verbogen hätten, was eine Störung in den Verhältnissen unserer Versuche hervorrufen könnte. Die Wunde wurde vernäht. Im ferneren setzte man die linke Pfote der Galvanisation aus, die rechte blieb unbehandelt. Zu dieser Prozedur wurde das Tier auf entsprechende Weise auf dem Gestell festgebunden. Die eine 15 qcm breite Elektrode setzte man auf das Hinterrückengebiet, die andere manschettenförmige 10 qcm breite Elektrode — auf das Bein hart oberhalb des Sprunggelenkes. Die Pole sind: die Anode auf der größeren Fläche des Rückens und die Kathode auf der kleineren — des Beins.

Die Stromstärke betrug 2—6 Milliampere, auf 1 qcm macht es ungefähr 0,13—0,6 Milliampere aus. Die gegebene Stromstärke war von uns empirisch festgestellt, da die stärkeren Ströme in der Regel fast immer Brandwunden bei den Kaninchen hervorrufen. Die Dauer der Stromanwendung betrug: anfangs 15 Minuten mit allmählicher Verlängerung der Zeit, die größte Zeitspanne machte 45 Minuten aus. Die Galvanisationsprozedur wurde wie üblich ausgeführt, die Unterlagen in aufgewärmtem Leitungswasser angefeuchtet, so daß wir es tatsächlich hier mit einer Jonogalvanisation durch Ionen, die im Leitungswasser enthalten sind, zu tun hatten; am häufigsten ist es das Calcium (*Piontkowsky*). Nach einer bestimmten Anzahl von derartigen Prozeduren töteten wir die Kaninchen in verschiedenen Zeiträumen durch Chloroform. Die kleinste Lebensspanne nach der Operation machte 7 Tage und die größte — 2 Monate aus. Die kleinste Zahl der Prozeduren war 4, die größte — 43. Bei der Sektion wurde der Nerv auf der ganzen Strecke freigelegt und in der Regel in 3 Teile getrennt, und zwar: 1. die durchschnittene Stelle mit dem zentralen und peripherischen, von Muskel- und Bindegewebe umgebenen Abschnitten (der Stummel), 2. der unmittelbar über dem Stummel und 3. endlich der unter dem Stummel befindliche Nervenabschnitt. Die Nervenstücke wurden dann einer histologischen Untersuchung ausgesetzt, wie das im weiteren beschrieben werden soll.

*Klinische Beobachtungen an der experimentellen peripherischen Lähmung und ihre Behandlung mit galvanischem Strom.*

Die beiderseitig und in ein und derselben Höhe, ungefähr in der Mitte des Nervi erfolgte Durchschneidung wird natürlich von einer Lähmung aller vom N. ischiadicus innervierten Muskeln begleitet. Im ersten Moment nach der Befreiung von dem Operationsgestell wird bei den Tieren der Zustand eines Nervenshocks beobachtet, der augenscheinlich durch das starke Trauma (Operation) bedingt wird.

Nach der Operation gab man den Kaninchen Ruhe im Laufe von 24 Stunden und erst nach Verlauf dieser Zeit begann man die Galvanisation des linken Beins, das rechte blieb unbehandelt. Das allgemeine Bild des Verlaufes der experimentellen Lähmung war bei allen Kaninchen ziemlich einförmig. Nach der Ruhepause von 24 Stunden beginnt das Tier seine Beine zu rühren, kann sich fortbewegen, aber alle seine Bewegungen sind sehr unsicher, die Pfoten weichen seitwärts ab, die Zehen biegen ein und streifen die Diele. Es entsteht somit das Bild einer peronealen Lähmung. Wenn das Kaninchen mit nach hinten gestreckten hinteren Extremitäten auf die Diele gelegt wird, so trachtet es danach, dieselben an sich zu ziehen, sie einzubiegen. In den ersten Tagen ist diese Bewegung absolut unmöglich, später gelingt sie, jedoch mit großer Schwierigkeit.

Das in den ersten Tagen aus dem Käfig herausgehobene Tier sitzt

meistens und bewegt sich wenig, nach 2—3 Wochen werden alle seine Bewegungen bedeutend freier. Fast in allen Fällen konnte man unter Einfluß der Galvanisation eine raschere Herstellung der Bewegungen in der linken galvanisierten Extremität im Vergleich zur rechten, nicht galvanisierten beobachten. Dieser Unterschied in den Bewegungen wird nicht sogleich bemerkbar, sondern erst nach 7—10 Behandlungen und ist seinem Charakter nach auch nicht ein und derselbe, von einem kaum bemerkbaren steigert er sich bis zu einem stark ausgeprägten. Besonders relief tritt dieser Unterschied in den Bewegungen hervor, wenn man das Kaninchen etwas ermüdet, es 20—30 Minuten auf dem Gestell festgebunden hält. Wenn man nun das Tier auf die Diele mit nach hinten ausgestreckten hinteren Beinen legt, so ist dann deutlich zu sehen, daß während die linke (galvanisierte) Pfote leicht an sich gezogen werden und das Tier, sich auf dieselbe stützend, nach vorn kriechen kann, das rechte Bein gewöhnlich ausgestreckt bleibt und bei der Fortbewegung nachgeschleppt wird. Dasselbe Bild stellt sich uns häufig auch sofort nach der Prozedur dar. Durch diese Beobachtungen werden die alten Angaben über die Funktionsbesserung der gelähmten Muskel unter Einfluß der Elektrotherapie bestätigt. Unsere Befunde stimmen mit denjenigen der experimentellen Untersuchungen von *Reid* <sup>2</sup>, *Dejerine* <sup>3</sup>, *Friedländer* <sup>4</sup>, *Gaetre* <sup>5</sup> überein, welche ebenfalls bei Fröschen, Meer-schweinchen und Hunden mit symmetrisch durchschnittenen Nerven der Extremitäten eine rapidere Funktionsbesserung und Wiederherstellung der normalen Bewegungen an demjenigen Bein, das einer elektrischen Therapie (Galvanisation, zuweilen auch Faradisation) ausgesetzt war, im Vergleich zum nicht behandelten Bein wahrnehmen konnten.

In den meisten unserer Fälle konnten wir bei den Versuchstieren in der Regel eine Ausbildung von trophischen Störungen in Form von Geschwüren, decubitalen Ulcerationen an den peripherischen Anteilen der Extremitäten mit durchschnittenem Nerv, gewöhnlich an der Ferse beobachten. Diese Störungen treten bei verschiedenen Kaninchen nicht in gleichen Zeiträumen nach dem Durchschneiden ein, bei den einen schon nach 5—6 Tagen, bei anderen aber erst nach 2—3 Wochen.

Bekanntlich übt der galvanische Strom auch auf die Trophica seinen Einfluß aus (*Kowarschik*) <sup>6</sup>. In unserer Arbeit konnten wir dieses auch verzeichnen, so bildeten sich z. B. in einer Reihe von Fällen an der linken (der galvanisierten) Extremität die trophischen Ulcera etwas später aus als an der rechten (nicht galvanisierten) und kein einziges Mal erreichten sie solche Dimensionen und Tiefe der Verbreitung, wie an dem rechten Bein, wo es nicht selten sogar bis zur Sequesterausstoßung und bis zur Entwicklung von großen Eiterungen kam.

Es sei hier bemerkt, daß wir keine vollständige Heilung dieser Geschwüre unter Einfluß der Behandlung mit galvanischem Strom wahr-

nehmen konnten, das geschah aber jedenfalls wegen der ungenügenden Beobachtungsdauer (der größte Zeitraum bis 2 Monate). In der Literatur finden sich Hinweise auf eine ebenso günstige Einwirkung des galvanischen Stroms auf die trophischen Ulcera. *Dejerine*<sup>3</sup>, der an Meerschweinchen und *Kroll* und *Weber*<sup>7</sup>, die an weißen Ratten experimentierten, haben bei symmetrischer Durchschneidung des Ischiadicus auch trophische Geschwüre erhalten, die an dem Bein, welches der Galvanisation ausgesetzt war, eine Tendenz zur Narbenbildung aufwiesen, und

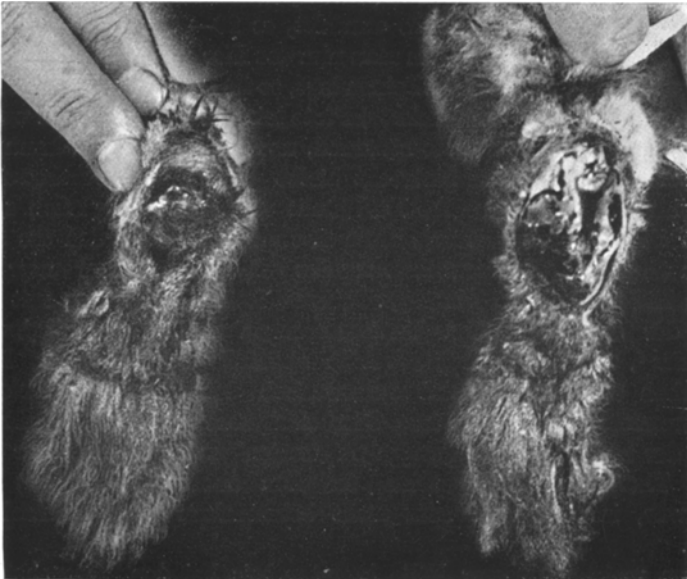


Abb. 1. Trophische Ulcera an der behandelten (links) und nicht behandelten (rechts) Extremität.

auf dem anderen, dem nicht behandelten immer größer und tiefer wurden.

In einigen Fällen konnten wir auch eine Tonusherabsetzung an der nicht galvanisierten Extremität feststellen — dieselbe hing gleichsam schlaffer herab — und in einer Reihe von Fällen ließ sich eine allmähliche Entwicklung von Contracturen in den Antagonisten gerade an dem nicht galvanisierten Bein nachweisen, während an der behandelten Extremität solche Erscheinungen kein einziges Mal beobachtet wurden.

Unsere klinischen Erforschungen der Frage über den Einfluß des galvanischen Stroms auf den Verlauf der experimentellen Lähmung zusammenfassend, können wir zwei Momente hervorheben: 1. die Verbesserung der Bewegungen und 2. die verhältnismäßig geringeren trophischen Störungen.

### Histologische Untersuchung.

Wie oben erwähnt, wurden die abgeschnittenen Nervenstücke auf Kartonstückchen (*Doinikow*<sup>8</sup>, *Rachmanow*<sup>9</sup>) vorsichtig auseinandergefaltet und in verschiedenen Flüssigkeiten fixiert, und zwar: 10% Formalin, 4% Bichromatlösung mit 10% Formalin, 96° Alkohol. Die in Formalin fixierten Stückchen wurden auf dem Gefriermikrotom geschnitten und die Schnitte nach *Bielschowsky* und mit Sudanhämatoxylin gefärbt; die in Bichromat fixierten Stücke wurden auf dem Gefriermikrotom geschnitten und mit Sudanhämatoxylin gefärbt und die in Alkohol fixierten Stücke wurden in Paraffin eingebettet und die Schnitte mit Polychrommethylenblau und nach *Rachmanows* Methode gefärbt.

Alle die oben genannten Methoden sind außer der letzteren genügend bekannt und daher werden wir sie hier nicht beschreiben. Wir wollen nur die Färbungsmethode von *Rachmanow* in Erwähnung bringen. Diese Methode hat *Rachmanow*<sup>9</sup> zum erstenmal im Jahre 1907 für die Färbung der Neurofibrillen in den Zellen des Zentralnervensystems beschrieben. Bis jetzt wurde diese Methode sowohl bei der Färbung des Zentralnervensystems (*Rachmanow*<sup>10</sup>, *Gurewitsch*<sup>11</sup> *Wenulet*<sup>12</sup>) als auch bei der Darstellung von Nervenendigungen in der Haut (*Rachmanow*<sup>12</sup>, *Rachmanow* und *Luterstein*<sup>13</sup>, *Schinkarenko*<sup>14</sup>) angewandt. Wir haben diese Methode zum erstenmal bei der Färbung von Präparaten aus der peripherischen Nervenfasern gebraucht. Nach der Methode von *Rachmanow* müssen die Präparate zunächst in 96° rektifiziertem Alkohol fixiert, dann der Reihe nach durch absoluten Alkohol, Alkoholxylol und reines Xylol durchgeführt und in Paraffin eingebettet werden. Die Paraffinschnitte werden auf Glas mit Wasser aufgeklebt und im Laufe von 24 Stunden im Brutschrank bei 37—40° getrocknet. Dann werden sie mittels Xylol vom Paraffin befreit, der Reihe nach durch die Alkoholbatterie durchgeführt und in destilliertem Wasser ausgewaschen. Danach werden die Schnitte in vertikaler Lage auf 48 Stunden in 10% Lösung des Argent. nitric. in den Brutschrank bei 37° gebracht. Die durch Silber imprägnierten Schnitte werden mittels einer alkalischen Lösung entwickelt und in einer Hyposulfitlösung fixiert. Die Technik des Herstellens der Präparate war folgende: Nach Silbereinwirkung wird das Präparat rasch der Reihe nach 3mal in destilliertem Wasser ausgewaschen und dann wird auf dasselbe für 1—2 Minuten der alkalische Entwickler aufgegossen. Letzterer besteht aus 25 ccm destillierten Wassers, 2,0 Natrium sulfuros., 3,0 Kali carbon. und 0,5 Hydrochinon \*. Nach der Silberlösung hat das Präparat seine Farbe nicht verändert, nach Einwirkung des Entwicklers ist es braun-gelb geworden. Danach wird es in destilliertem Wasser abgespült und in 2—3% Hyposulfit-

\* Gegenwärtig hat *Rachmanow* den Bestand des Entwicklers etwas verbessert. *Physiotherapia* 2, (Russisch) 1929.

lösung fixiert, in Wasser ausgewaschen, durch die Alkohol- und Xylolbatterie zwecks Entwässerung und Aufhellen durchgeführt und in Balsam eingeschlossen. Die Methode ist an und für sich in technischer Hinsicht ziemlich einfach, es wird nur das Einhalten von peinlicher Reinheit der angewandten Reagenzien — der Alkohole, des Entwicklers, des destillierten Wassers — verlangt. *Rachmanows* Methode beruht augenscheinlich einerseits auf irgendwelchen bestimmten chemischen Reaktionen zwischen dem Nervengewebe und dem Reagens (Silber) und andererseits auf der bekannten photographischen Reaktion der Silberreduktion. Die Anwendung dieser Methode erlaubt es uns, einen etwas tieferen Einblick in den intimen chemischen Bestand der Nervenfasern zu tun. So ist es uns aus den frühen Arbeiten von *Rachmanow*<sup>10</sup> bekannt, daß wir bei Anwendung des alkalischen Entwicklers das Silber nur in den Achsenzylindern und Neurofibrillen reduzieren, während die übrigen Elemente des Nervengewebes ungefärbt bleiben, wenn wir im Gegenteil einen sauren Entwickler gebrauchen, so können wir die Silberreduktion bloß in den Kernen und im Protoplasma der *Schwannschen* Zellen beobachten, die Neurofibrillen und Achsenzylinder dagegen bleiben ungefärbt. Derartige Resultate, die von einem Vorherrschen der sauren oder alkalischen Radikale im Entwickler abhängig sind, weisen vielleicht auf analoge Korrelationen auch in den Elementen des Nervengewebes — in den Achsenzylindern, im Protoplasma und im Kernchromatin hin.

In der Literatur existieren Angaben, daß der galvanische Strom wahrscheinlich auf das morphologische Bild der Nervenfaser seinen Einfluß ausübt. *Bethe*<sup>15</sup> hat im Jahre 1903 zum erstenmal nachgewiesen, daß nach galvanischer Durchströmung der mit Toluidinblau gefärbte Nerv an der Kathode eine intensivere und an der Anode eine schwächere Färbung aufweist. *Stübel*<sup>16</sup> hat Veränderungen in der protoplasmatischen Netzstruktur der Myelinscheide unter Einfluß der Stromeinwirkung aufgedeckt, die protoplasmatischen Maschen wurden breiter. *Schigihiko Kostura*<sup>17</sup>, der einen unter Narkose befindlichen Nerv der Wirkung des galvanischen Stromes aussetzte und ihm dann mikroskopisch untersuchte, fand in der Regel unter der Kathode eine starke Auflockerung und Verbreiterung der Achsenzylinder vor, während unter der Anode dieselben verschmälert und kompakter waren. In letzter Zeit hat *Stefl Jiri* mit Hilfe des Polarisationsmikroskopes in der Myelinscheide des Nerven eine Ausbildung von lecithinähnlichen Krystallen unter Einwirkung des Wechselstromes nachgewiesen; auch die Konfiguration der Nervenfaser hat sich verändert, jedoch diese Veränderungen können einer Rückbildung anheimfallen.

Die meisten der oben angeführten Autoren, welche bestimmte mikroskopische morphologische Veränderungen im Nerv, der der Wirkung des galvanischen Stroms ausgesetzt war, vorgefunden haben, hatten

es entweder mit einem Nervenmuskelpreparat des Frosches oder einfach mit einem Nervenabschnitt zu tun. Die Elektroden wurden unmittelbar auf die Nervenfasern aufgesetzt. Unsere Versuchsbedingungen waren natürlicher. In der für uns zugänglichen Literatur ist es uns nicht gelungen, Hinweise auf Arbeiten zu finden, deren Methodik der unserigen analog gewesen wäre, die in der Einwirkung des galvanischen Stroms auf den Nerv mittels Aufsetzen der Elektrode auf die äußeren Gewebe besteht.

Gehen wir nun zur Betrachtung unserer mikroskopischen Untersuchungen über. Bei der Sudanfärbung der Myelinscheiden mit einer Nachfärbung der Kerne der *Schwannschen* Zellen mit Hämatoxylin konnten wir im Stummel und im Nervenabschnitt unmittelbar über dem Stummel das typische Bild der primären traumatischen Degeneration feststellen. Beim Untersuchen der Nerven in verschiedenen Zeiträumen nach dem Durchschneiden — der kleinste war 7 Tage und der größte 2 Monate lang — konnten wir die Frühstadien des Zerfalles, die besonders relief an der Peripherie des zentralen Abschnittes zum Ausdruck kamen, und die Regenerationsstadien deutlich sehen. Neben Nervenfasern von regelrechter Form mit orangerot gefärbtem Myelin wurden schon veränderte Fasern angetroffen mit Verschmälerungen und Auftreibungen. Das Myelin stellt schon keine regelmäßig gefärbte Masse dar und besteht aus Schollen, an seiner Stelle werden häufig schon Fetttropfen vorgefunden, die durch Sudan rot gefärbt sind. Mit der Zeit kann eine Vergrößerung der Fetttropfen in den *Schwannschen* Zellen, dann ihre Verkleinerung in denselben und gleichsam ihre Vergrößerung im Peri- und Endoneurium beobachtet werden. Ferner konnte man vermerken, daß je nach Befreiung der Fasern von den Fetttropfen, einem Zusammenfallen der *Schwannschen* Scheiden, einer Vergrößerung der Anzahl der Bandfasern, auch eine Vergrößerung der Kernzahl und vielleicht auch der Zahl der Bindegewebsfasern beobachtet wurde. In einer ganzen Reihe von Fällen konnte sehr deutlich die netzartige protoplasmatische Struktur der Myelinscheide wahrgenommen werden. In diesen selben Präparaten war gewöhnlich auch das Plasma der Achsenzylinder mit Hämatoxylin schön dunkelblau gefärbt. In den peripherischen Abschnitten unter der Durchschnittsstelle kam ein sehr deutliches und typisches Bild der *Wallerischen* Entartung zur Beobachtung — die Achsenzylinder waren auch in den frühesten Terminen niemals sichtbar. Beim Vergleichen der Präparate aus den Nervenabschnitten etwas oberhalb der Durchschnittsstelle (über dem Stummel) der galvanisierten Seite mit dem Präparat der nicht galvanisierten Seite konnten wir anfangs keinen scharfen, in die Augen stechenden Unterschied verzeichnen. In den peripherischen Abschnitten bot das Bild auch keine Varietäten. Aber im Resultat einer Durchsicht von mehreren hundert solcher Präparate erhielten wir den Eindruck, daß der Strom augenscheinlich auf

die Beschleunigung der Zerfallsprozesse einwirkt. So ist in peripherischen Abschnitten die *Wallersche* Entartung an der galvanisierten Seite deutlicher ausgesprochen, der Zerfall kommt intensiver zum Ausdruck als auf der nicht galvanisierten Seite. In den Nervenabschnitten über dem Stummel tritt die netzartige protoplasmatische Struktur an galvanisierten Präparaten auch gleichsam deutlicher hervor als an nicht galvanisierten. Diese Resultate sprechen unserer Ansicht nach dafür, daß an der galvanisierten Seite der Zerfall sich rascher vollzogen und das Fett schneller die *Schwannsche* Zelle verlassen hat. Zwischen den Fasern befinden sich in den galvanisierten Präparaten mehr Kerne als an nicht galvanisierten. Zwecks einer Erforschung der Veränderungen in den Achsenzylindern haben wir zunächst *Bielschowskys* Methode angewandt. Beim Erforschen der Achsenzylinder konnten wir konstatieren, daß unter Einfluß der Nervendurchschneidung dieselben eine bestimmte Reihe von Veränderungen durchmachten, welche mit den Beschreibungen der anderen Autoren vollständig übereinstimmten (*Doinikow*<sup>8</sup>). Beim Vergleichen der Präparate aus dem Nervenabschnitt oberhalb des Stummels von der behandelten, galvanisierten Seite mit denjenigen der nicht behandelten (nicht galvanisierten) Seite ist es uns nicht gelungen, einen Unterschied in den Achsenzylindern festzustellen. Bei der Untersuchung der Präparate aus dem Stummel selbst gewannen wir den Eindruck, daß in mittelgroßen Zeiträumen von 3—4 Wochen im galvanisierten Stummel eine größere Anzahl neuer Faserchen mit den feinsten Achsenzylindern aufträte und es schien auch, daß die Zahl der zerfallenden Achsenzylinder geringer sei als auf der nicht galvanisierten Seite. In früheren und späteren Stadien schien eine solche Erscheinung nicht stattzufinden. Die andere Färbungsmethode, die hier angewandt wurde, war diejenige von *Rachmanow*. Diese Methode erwies sich als wertvoll nicht nur zur Färbung der Achsenzylinder, sondern auch zum Teil zur Darstellung der ganzen *Schwannschen* Zelle. Zunächst will ich beschreiben, wie das mikroskopische Bild einer normalen, mittels dieser Methode gefärbten Nervenfaser aussieht (Abb. 2). Die Achsenzylinder erscheinen in Form von mehr oder weniger breiten Bändern, in einigen von ihnen ist eine leichte Längsstreifung zu sehen, die Ränder der Achsenzylinder sind gleichmäßig scharf konturiert. Die Konturen der *Schwannschen* Scheiden, der *Ranvierschen* Schnürringe sind wahrnehmbar, die Kerne schwach angedeutet. Im Bereich der Myelinscheide ist stellenweise eine feine netzartige Struktur zu sehen. Das ganze Präparat hat eine schokoladenbraune Farbe. Nach Durchschneidung des Nervs geht im Bilde eine schroffe Veränderung vor. Im Nervenabschnitt hart oberhalb der Durchschnittsstelle, der von einer primären traumatischen Degeneration befallen ist, können sowohl seitens des Achsenzylinders als auch seitens der anderen Elemente des Nervens Veränderungen beobachtet werden. 7 Tage nach der Durchschneidung gewahren wir, daß die Achsen-



zylinder sich schon nicht mehr so intensiv färben wie in der Norm, ihre Form beginnt ebenfalls sich zu verändern, die Ränder sind nicht mehr so gleichmäßig und scharf konturiert wie in der Norm (Abb. 3). Die Achsenzylinder erscheinen nicht mehr so kompakt wie früher und machen den Eindruck einiger Auflockerung; 3 Wochen nach der Durchschneidung (Abb. 5) stellen die Achsenzylinder ziemlich breite Bänder mit sehr ungleichmäßigen Konturen dar. Ihre Ränder sind schon nicht mehr glatt und eben, sind im Gegenteil wie angenagt und verschwommen, ihre Längsstreifung bleibt noch erhalten. An verschiedenen Stellen



Abb. 2. Normales histologisches Bild eines nach RACHMANOW'S Methode gefärbten Nerven.

sind die Achsenzylinder in ihrem Verlauf unterbrochen und bieten ein Bild des Zerfalls dar. Das mikroskopische Bild dieser (3 Wochen alten) Achsenzylinder tritt in der Intensität der Färbung sowohl vor den ersten (7tägigen) als auch besonders vor den normalen zurück. Der allgemeine Eindruck von diesen Achsenzylindern besteht in einer noch größeren Auflockerung und Verschwommenheit als sogar in den Initialstadien der primären Degeneration.

2 Monate nach der Durchschneidung sind die Achsenzylinder ihrem äußeren Aussehen nach den normalen sehr ähnlich, sie sind dünn; bandartig, mit gut konturierten Rändern, intensiv gefärbt und genügend kompakt (Abb. 7). Unter ihnen finden sich ziemlich viel noch feinerer, junger Achsenzylinder; daneben treffen wir gleichsam eine Unter-



Abb. 3. Nervenfasern 7 Tage nach Durchschneidung. Das Präparat ist aus dem Abschnitt unmittelbar oberhalb der Durchschnitstelle entnommen. RACHMANOWfärbung.

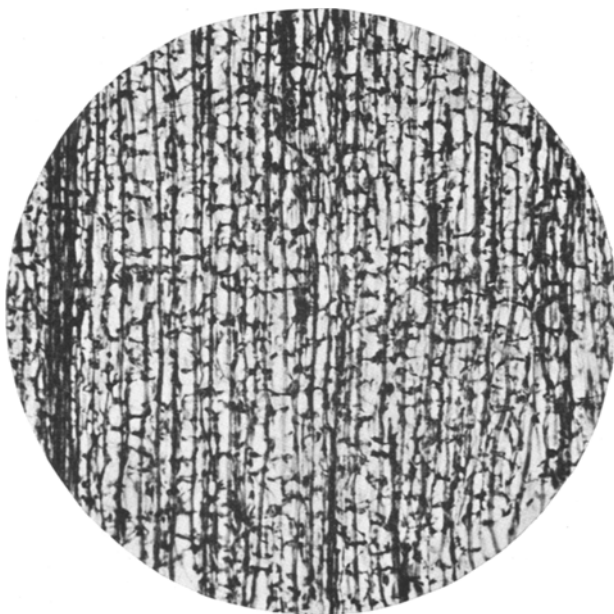


Abb. 4. Nervenfasern 7 Tage nach der Durchschneidung, durch Anwendung des galvanischen Stroms behandelt (4 Galvanisationen). Präparat aus dem Nervenabschnitt unmittelbar über der Durchschnitstelle. RACHMANOWfärbung.

brechung längs des Achsenzylinders an der Stelle seiner ungleichmäßigen Färbung an.

Das Bild der *Schwannschen* Zelle unterliegt bei dieser Färbung gleichfalls einer bestimmten Reihe von Veränderungen. Wenn in der normalen Nervenfasern stellenweise eine leichte, zarte netzartige Struktur im Bereich des Myelins zu sehen ist, so wird im Laufe der 1. Woche nach Durchschneidung die Netzstruktur sehr scharf gezeichnet und derb und außer diesem Netze sind im Bereich des Myelins braun gefärbte Schollen von verschiedener Größe sichtbar (Abb. 3). Nach 3 Wochen ist schon absolut nichts mehr von der Netzstruktur nachgeblieben (Abb. 5). Der allgemeine Grund wird fast ganz rein, jedoch sind im Bereich des Myelins noch Reste des Netzes zu vermerken. Nach 2 Monaten (Abb. 7) ist die Netzstruktur gar nicht mehr zu unterscheiden, es ist nur einige Vernebelung des Gesamtgrundes nachzuweisen, aber ohne jegliche Andeutung auf irgendwelche Struktur.

Das Anwenden des galvanischen Stroms ruft starke Veränderungen im Verlauf dieses histologischen Bildes hervor. Eine Untersuchung von symmetrischen Nervenabschnitten und der Vergleich des behandelten mit dem nicht behandelten Nervenabschnitt ergab folgendes: Die der 7tägigen Zeitspanne (4 Galvanisationen) angehörigen Achsenzylinder weisen eine regelrechte Form auf, sind gleichmäßig, färben sich weniger intensiv als die normalen, jedoch intensiver als die nicht behandelten (vgl. mit die Abb. 3 u. 4). Im allgemeinen sind die Achsenzylinder gut konturiert und ziemlich kompakt. In einem späteren Zeitraum von 3 Wochen (16 Galvanisationen — Abb. 6) nehmen die Achsenzylinder die Form von ziemlich schmalen, gut konturierten, bandartigen Strängen an. Im ferneren lassen sich die Achsenzylinder nach der Zeitspanne von 2 Monaten (Abb. 8) ihrer Form nach durch nichts mehr von den normalen unterscheiden (vgl. mit die Abb. 2 u. 8). An der galvanisierten Seite ist die *Schwannsche* Zelle augenscheinlich auch Veränderungen ausgesetzt, jedoch das Tempo ihres Verlaufes ist ein etwas anderes. Bei 7tägigen Zeiträumen (Abb. 4) sehen wir ein Bild, das der Abb. 3 analog, aber in den Einzelheiten von ihr verschieden ist: bedeutend intensiver gefärbt, als Abb. 3, die Netzstruktur des Myelins tritt auf dem Präparat 4 gleichsam reiner und deutlicher hervor. In der 3. Woche ist die Netzstruktur fast gar nicht zu sehen (Abb. 6) und im ferneren erscheint nach 2 Monaten (43 Galvanisationen — Abb. 8) wieder eine leichte Netzstruktur. Die *Schwannsche* Scheide und die *Ranvierschen* Schnürringe sind an den Präparaten 4 (7 Tage) sehr deutlich zu sehen, an den Präparaten 6 (3 Wochen) kann die Scheide nur mit großer Schwierigkeit unterschieden werden und an Präparaten 8 (2 Monate) beginnen die *Schwannschen* Scheiden schon wieder eine schwache Färbung anzunehmen.

Beim Vergleichen der Abb. 3, 5, 7 mit 4, 6 u. 8 läßt sich der Einfluß



Abb. 5. Nervenfaser 3 Wochen nach der Durchschneidung. Präparat aus dem Nervenabschnitt unmittelbar über dem Stummel. RACHMANOWfärbung.



Abb. 6. Nervenfaser 3 Wochen nach Durchschneidung, durch Galvanisation behandelt (16 Galvanisationen). Präparat aus dem Nervenabschnitt unmittelbar über dem Stummel. RACHMANOWfärbung.



Abb. 7. Nervenfaser 2 Monate nach Durchschneidung. Präparat aus dem Abschnitt unmittelbar über dem Stummel. RACHMANOWFärbung.



Abb. 8. Nervenfaser 2 Monate nach Durchschneidung, behandelt durch Galvanisation (43 Galvanisationen). Präparat aus dem Abschnitt unmittelbar über dem Stummel. RACHMANOWFärbung.

des galvanischen Stroms deutlich feststellen. An galvanisierten Präparaten (4, 6, 8) kamen keine so starken Veränderungen in der Konfiguration der Achsenzylinder und ihres Zerfalles zur Beobachtung wie in den nicht galvanisierten Präparaten (3, 5, 7). Die Struktur der *Schwann*-schen Zelle tritt an galvanisierten Präparaten anfangs deutlicher hervor als an nicht galvanisierten und im fernerer tritt zuerst das Stadium der Nichtfärbbarkeit auf (5, 6). Die normale zarte Netzstruktur der *Schwann*schen Zelle erscheint auf der galvanisierten Seite nach kürzerer Zeit wieder. Somit zeigen das galvanisierte und nicht galvanisierte



Abb. 9. Stummel des galvanisierten Nerven 2 Monate nach Durchschneidung.  
RACHMANOWFÄRBUNG.

Präparat ein ungleiches Verhalten zu *Rachmanows* Färbungsmethode. Obwohl wir noch keine genaue Erklärung zu solchen histologischen Bildern darbieten können, doch geben sie uns die Möglichkeit das verschiedenartige Verlaufen des Prozesses in den durchschnittenen Nerven bei der Galvanisation und ohne die zu konstatieren.

Beim Untersuchen in verschiedenen Zeiträumen des Stummels selbst konnten wir verzeichnen, daß in den Initialstadien von 1—3 Wochen kein Unterschied zwischen der galvanisierten und nicht galvanisierten Seite vorhanden war. Nach 2 Monaten war schon ein Unterschied festzustellen, obgleich hier natürlich über quantitative Verhältnisse sehr schwer zu urteilen war, jedoch ließ sich an der galvanisierten Seite ein größerer Zuwachs von Nervenfasern nachweisen, die Bündel waren

viel dichter. Es wird eine große Anzahl von kolbenartig erweiterten feinsten Nervenfasern mit kleinen Schlingen und knopfartigen Aufblähungen angetroffen (Abb. 9).

Bei Zusammenfassen unserer mikroskopischen Untersuchungen können wir aussagen: Der Verlauf der mikroskopischen Veränderungen, welche gewöhnlich nach der Nervendurchschneidung auftreten, schlägt eine ganz andere Richtung nach der Galvanisation der Extremität des Tieres ein. Die Achsenzylinder erhalten augenscheinlich bei der Galvanisation in der ersten Zeit die Intaktheit ihrer Konfiguration und zerfallen daher auch im ferneren nicht (Abb. 3 u. 4, 5 u. 6); wahrscheinlich wirkt der Strom auch auf den Chimismus der Achsenzylinder ein. Ihre intensive Färbung wird nach der Nervendurchschneidung schwächer, unter dem Einfluß des Stromes wird sie beinahe normal. Dieses ungleiche Verhalten der Färbung gegenüber der galvanisierten und nicht galvanisierten Nerven spricht für die Veränderung des Chimismus, da die Intensität der Färbung nach *Rachmanows* Methode von einem mehr oder minder großen Vorherrschen der sauren oder alkalischen Radikale abhängt (*Rachmanow*<sup>9</sup>). Der galvanische Strom wirkt augenscheinlich beschleunigend auch auf die Regenerationsprozesse im Achsenzylinder; man konnte einen viel stürmischeren Anwuchs der feinsten jungen Achsenzylinder in dem der Behandlung ausgesetzten Stummel nachweisen. Die schlingen- und kolbenartig aufgetriebenen Achsenzylinder werden in gleichen Zeiträumen — 2 Monate nach der Durchschneidung — im Stummel der galvanisierten Seite bedeutend häufiger angetroffen und treten reliev hervor. Dieses konnte nicht nur an *Rachmanowschen*, sondern auch zum Teil an *Bielschowsky*präparaten beobachtet werden. Auf die *Schwannsche* Zelle wirkt der galvanische Strom im Sinne einer Beschleunigung zuerst der Degenerations- und dann der Regenerationsprozesse ein. Bei der Färbung mit Sudan-Hämatoxylin haben wir einen rascheren Verlauf der *Wallerischen* Entartung im peripherischen Abschnitt der galvanisierten Seite im Vergleich zur nicht behandelten wahrgenommen. In den zentralen Abschnitten, welche der primären traumatischen Degeneration ausgesetzt waren, zeigte sich auch ein Unterschied zwischen den Präparaten der galvanisierten und nicht galvanisierten Seite. Die Intaktheit des Myelins, Fetttropfen im Bereich des Myelins, die Konfigurationsveränderung der ganzen Faser konnten an galvanisierten Präparaten viel früher beobachtet werden als an nicht galvanisierten. In späteren Zeiträumen ließ sich an galvanisierten Präparaten ein rascheres Verschwinden des Fettes aus der *Schwannschen* Zelle und seine Anhäufung im Peri- und Epineurium feststellen. Die Zahl der Kerne und bandartigen feinen Fasern ist gleichsam in diesen Zeiträumen an der behandelten Seite größer als an der nicht behandelten. Die protoplasmatische Netzstruktur der *Schwannschen* Zelle und die Substanz, die sich an der Stelle der Myelinscheide befindet, färben sich

nach *Rachmanow* unter Einfluß des Stromes (in den Zeiträumen von 1—2 Wochen) anfangs intensiver, die Maschen der Netzstruktur sind viel deutlicher sichtbar. Diese Deutlichkeit der Netzstruktur tritt an galvanisierten Präparaten nicht nur bei der *Rachmanowschen* Methode, sondern auch bei der Färbung mit Sudan-Hämatoxylin hervor. Im fernerem hört an galvanisierten Präparaten die *Schwannsche* Zelle früher auf sich zu färben als an nicht galvanisierten (vgl. mit die Abb. 5 u. 6). Das Wiederauftreten der normalen Netzstruktur vollzieht sich an galvanisierten Präparaten früher als an nicht behandelten (vgl. mit die Abb. 7 u. 8). Die große Ähnlichkeit der Abb. 7 u. 6, 8 und 2 zeugt dafür, daß der galvanische Strom gleichsam beschleunigend wirkt auf den ganzen Veränderungszyklus, den die Nervenfasern im Zusammenhang mit den Erscheinungen der Degeneration und im weiteren der Regeneration durchmacht. Derjenige Zustand des histologischen Bildes, den der Nerv unter natürlichen Verhältnissen erst 2 Monate nach der Durchschneidung erreicht (Abb. 7), wird unter Einfluß des galvanischen Stromes schon nach 3 Wochen erhalten (Abb. 6). Nach 2 Monaten erzeugt der galvanisierte Nerv ein histologisches Bild, das dem normalen nahe kommt (Abb. 8 u. 2). Das ungleiche Verhalten der galvanisierten und nicht galvanisierten Achsenzylinder und der ganzen *Schwannschen* Nervenzelle der *Rachmanowschen* Färbungsmethode gegenüber spricht ganz entschieden zugunsten einer Veränderung des biochemischen Bestandes des durchschnittenen degenerierenden und regenerierenden Nerven unter Einfluß des galvanischen Stroms.

So ist es uns nun gelungen, durch unsere Untersuchungen zu beweisen, daß eine Anwendung des galvanischen Stroms anscheinend durch die Veränderung der Ionenkonzentration auf den chemischen Bestand des degenerierenden und regenerierenden Nerven ihren Einfluß ausübt und dementsprechend auch das morphologische Bild verändert. An dieser Veränderung des morphologischen Bildes ist es uns gelungen, unsere Beobachtungen anzustellen. Dieser Aufgabe konnten wir nur dadurch gerecht werden, daß wir uns einer neuen, auf dem Gebiet der Erforschung des peripherischen Nervensystems noch nicht zur Anwendung gekommenen Methode von *Rachmanow* bedienten. Dieser Methode liegt scheinbar eine Korrelation zwischen dem Chemismus der Gewebe und der zur Färbung verwandten Reaktive zugrunde.

Unsere Arbeit erschöpft die Frage noch nicht, wir nehmen an, daß es uns fürerst nur gelungen ist, prinzipiell zu beweisen, daß im regenerierenden Nerven — dem behandelten und nicht behandelten — ein morphologischer Unterschied besteht. Den Verlauf dieses Prozesses detaillierter zu behandeln, gehört zur Aufgabe der zukünftigen Forschungen.



### Schlußfolgerungen.

1. Der galvanische Strom übt auf die Funktion der gelähmten Extremität einen Einfluß aus. Unter Einwirkung der Galvanisation können wir eine Verbesserung der Bewegungen in der behandelten Extremität im Vergleich zur nicht galvanisierten beobachten.

2. Der galvanische Strom beeinflusst auch die Trophica. Am galvanisierten Bein haben die trophischen Ulcera niemals solche Dimensionen und Tiefe erreicht wie am nicht galvanisierten.

3. Der galvanische Strom, der der Technik nach ganz ebenso angewandt wurde, wie das in der Klinik geschieht, hat auf das morphologische Bild, welches nach Nervendurchschneidung auftritt, seinen Einfluß ausgeübt.

4. Das mikroskopische Bild des galvanisierten regenerierenden Nerven 3 Wochen nach der Durchschneidung (16 Galvanisationen) stimmt mit dem mikroskopischen Bilde des nicht behandelten Nerven von zweimonatlicher Dauer überein.

5. Das mikroskopische Bild des galvanisierten regenerierenden Nerven von zweimonatlicher Dauer (43 Galvanisationen) entspricht schon dem histologischen Bilde des normalen Nerven.

6. Im Nervenstummel, der der Einwirkung des galvanischen Stroms ausgesetzt war, beobachten wir einen gewaltigeren Anwuchs der jungen Achsenzylinder als im nicht galvanisierten Stummel.

7. Es ist uns gelungen, derartige morphologische Veränderungen dank der Anwendung der *Rachmanowschen* Methode zu beobachten.

### Literaturverzeichnis.

- <sup>1</sup> Piontkowsky, I.: *Klin. Med.* 1929. — <sup>2</sup> Edinburg, Reid.: 1848 (zit. nach Friedländer). — <sup>3</sup> Dejerine: *Bull. Soc. Chim. biol. Paris* 1875 (zit. nach Friedländer). — <sup>4</sup> Friedländer, R.: *Dtsch. med. Wschr.* Nr 26, 1896. — <sup>5</sup> Gaetre: (zit. nach Kowartschik) „Elektrotherapie“ 1923. — <sup>6</sup> Kowartschik: *Elektrotherapie* 1923. — <sup>7</sup> Kroll und Weber: Aus dem Setschenow-Staatsinstitut für physio-therapeutische Methoden 2) 1928). — <sup>8</sup> Doinikow: *Beitr. Hist. u. Histopath. periph. Nerven* 1913. — <sup>9</sup> Rachmanow: *J. Psychol. u. Neur.* 18 (1912). — <sup>10</sup> Rachmanow: „Obosr. Psichiatr. Nr 3 1907. — <sup>11</sup> Gurewitsch: Über Neurofibrillen und ihre Veränderungen unter einigen pathologischen Verhältnissen. Diss. 1908 (Russ.). — <sup>12</sup> Rachmanow: *Physiotherapia* 1929. — <sup>13</sup> Rachmanow und Luterstein: *Physiotherapia* 1929. — <sup>14</sup> Schinkarenko: *Physiotherapia* 1929. — <sup>15</sup> Bethe: *Allg. Anat. u. Phys. Nerven.* 1903. — <sup>16</sup> Stübel: *Pflügers Arch.* 149. — <sup>17</sup> Schigihiko Kostura: *Pflügers Arch.* 317 (1927). — <sup>18</sup> Stefl, Jiri: *Pflügers Arch.* 231 (1928). — <sup>19</sup> Wenulet: Über die Veränderungen der Herzganglien. Diss. 1910 (Russ.).