

17

65

# Acta Chirurgica Austriaca

Supplement Nr. 44 (1982)

---

## Zur Regeneration des autonomen Nervensystems nach Replantation Experimentelle und klinische Studie

*Hildegunde Piza-Katzer*

Abteilung für Plastische und Rekonstruktive Chirurgie (Leiter: Prof. Dr. H. Millesi) und Abteilung für Experimentelle Chirurgie (Leiter: Prof. Dr. R. Gottlob) der I. Chirurgischen Universitätsklinik Wien (Vorstand: Prof. Dr. A. Fritsch) und Ludwig-Boltzmann-Institut für Experimentelle Plastische Chirurgie (Leiter: Prof. Dr. H. Millesi), Alser Straße 4, A-1097 Wien

AUTOREN-  
SONDERDRUCK

---

Als Supplemente werden Arbeiten angenommen, die nach den „Redaktionellen Hinweisen“ (siehe Impressum) nicht in den laufenden Heften erscheinen können. Die Herstellung von Separatdrucken und ein etwaiger Verkauf durch den Buchhandel sind mit dem Verlag zu vereinbaren.

Die Redaktion

## Zusammenfassung

1. Einleitung
2. Problemstellung
3. Experimentelle Untersuchung
  - 3.1. Material und Technik
    - 3.1.1. Versuchstiere
    - 3.1.2. Anatomie und Histologie der Kaninchenohrmuschel
    - 3.1.3. Technik der Amputation und Replantation der Kaninchenohrmuschel
    - 3.1.4. Ergebnisse
  - 3.2. Untersuchungen an der replantierten Kaninchenohrmuschel
    - 3.2.1. Durchblutungsmessung mit Xenon 133
      - 3.2.1.1. Methode
      - 3.2.1.2. Ergebnisse
    - 3.2.2. Thermographie
      - 3.2.2.1. Methode
      - 3.2.2.2. Material
      - 3.2.2.3. Ergebnisse der Thermographie
    - 3.2.3. Histologische Untersuchungen an replantierten Kaninchenohrmuscheln
      - 3.2.3.1. Methodik
      - 3.2.3.2. Histologische Befunde
  4. Klinische Untersuchungen

- 4.1. Untersuchungen an Mikroreplantaten
  - 4.1.1. Krankengut
  - 4.1.2. Bei der Replantation verwendete Operationstechnik
  - 4.1.3. Methoden der Nachuntersuchung
    - 4.1.3.1. Klinische Beurteilung
    - 4.1.3.2. Sensibilität
    - 4.1.3.3. Motorik
    - 4.1.3.4. Durchblutungsmessungen
    - 4.1.3.5. Schweißsekretion
    - 4.1.3.6. Kältetoleranz
  - 4.1.4. Ergebnisse der Nachuntersuchungen
    - 4.1.4.1. Klinische Untersuchung
    - 4.1.4.2. Sensibilität
    - 4.1.4.3. Durchblutung
    - 4.1.4.4. Schweißsekretion
    - 4.1.4.5. Kältetoleranz
  - 4.1.5. Zusammenfassung und statistische Auswertung
    - 4.1.5.1. Sensibilität
    - 4.1.5.2. Durchblutung
    - 4.1.5.3. Kältetoleranz
- 4.2. Untersuchungen an Makroreplantaten
5. Diskussion
- Literatur

Of 36 patients followed up clinically, 35 presented with more or less pronounced signs of cold intolerance. A correlation between type of injury, age of patient, amputation level, extent to which sensory qualities were regained, blood flow and perspiration and intensity of cold intolerance was attempted.

The study documented that complaints on cold exposure were minimal in patients with good blood flow in the replanted part and full return of all sensory qualities. The slightly poorer adaptation to temperature changes which even persisted in these cases suggests that regeneration of the autonomous nerve plexus, innervating the blood vessels and reinnervation of the skin appendages were apparently also inadequate or incomplete.

## 1. Einleitung

Abgetrennte Gliedmaßen wieder annähen zu können, war ein alter Menschheits Traum.

1903 gelang es *Höpfner* das erste Mal, einem Hund mit Hilfe von Gefäßnähten eine ganze Extremität zu replantieren. *Carrel* und *Guthrie* berichteten über erfolgreiche Replantationsversuche am Hund, wobei die längste Überlebenszeit eines Versuchstieres mit 20 Tagen angegeben wird.

Zwischen 1940 und 1960 haben nach einer Zusammenstellung von *Lapchinsky* (1960) zahlreiche russische Autoren – wie *Kbenken*, *Mafajef*, *Vishnevski*, *Petrova* und *Levchuc* – Hundextremitätenreplantationen vorgenommen und sich mit technischen Problemen, dem Studium von Gefäßanastomosen, dem Überleben von ischämisch geschädigtem Gewebe und anderen Problemen der Gewebeübertragung beschäftigt. 1960 beschreibt *Lapchinsky* sehr gute Langzeitergebnisse von Hundextremitätenreplantationen, wobei die Extremitäten nach der Amputation bis zu 28 Stunden bei 2 bis 4 °C gekühlt wurden. Die Einheilungsrate wird mit 37% angegeben und konnte durch gleichzeitige Perfusion mit einer Oxygenatorpumpe auf 43% angehoben werden.

*Eiken* et al. berichten 1964 ausführlich über die Technik, pathophysiologische und Langzeitergebnisse replantierter Hundextremitäten.

Trotz zweier Weltkriege mit abertausend amputierten Extremitäten ist die klinische Replantationschirurgie bis in die sechziger Jahre nicht entscheidend vorangekommen.

Erst die moderne Anästhesie, die Weiterentwicklung der Gefäßchirurgie sowie die Einführung verschiedener Medikamente, wie Antibiotika, Heparin und niedermolekulare Dextrane, haben es ermöglicht, auch beim Menschen 1962 die erste erfolgreiche Replantation einer ganzen oberen Extremität durchzuführen (*Malt* und *McKahn*, 1964).

Je weiter distal die Extremität amputiert war, um so eher stieß man jedoch an technische Grenzen, die durch die Kleinheit der wiederherzustellenden Gebilde vorgegeben war. Dies führte anfangs zum Gebrauch der Lupe, später zur Verwendung von Operationsmikroskopen.

Hand in Hand ging damit auch die Entwicklung entsprechend feiner Instrumente und außerordentlich feiner Nahtmaterials.

Mit Hilfe des Mikroskops gelang es *Jacobson* und *Suarez* (1960), Gefäße mit einem äußeren Durchmesser bis zu 1 mm erfolgreich wiederzuzvereinigen.

Die Nerven Chirurgie erhielt durch die Arbeiten von *James Smith* (1964) sowie *Millesi* (1967) ebenfalls entscheidende Impulse.

Nachdem also in einigen wenigen Zentren sowohl die technischen Voraussetzungen als auch mit dieser diffizilen Operationstechnik vertraute Chirurgen vorhanden waren, konnte man auch bei Amputationen distal des Handgelenkes die Replantation versuchen.

1965 veröffentlichten *Buncke* und *Schultz* eine Technik zur Amputation und unmittelbar danach ausgeführter Replantation von Daumen und Zeigefingern von Rhesusaffen. Einer von 9 Fingern heilte komplett an.

Aus einer kurzen Mitteilung von *Hwa* (1967) geht hervor, daß es chinesischen Chirurgen gelungen ist, komplett amputierte Finger durch Replantation zur Anheilung gebracht zu haben. Nähere technische Details sind dieser Arbeit nicht zu entnehmen.

Der erste ausführliche Bericht über die Replantation eines Daumens stammt von *Komatsu* und *Tamai* (1968).

In Wien wurden nach einer schon jahrelangen klinischen Erfahrung mit der Mikronerven Chirurgie (*Millesi*, 1968) und einer intensiven experimentellen Vorarbeit auf dem Gebiet der Mikrogefäßchirurgie (*Piza*, 1973) durch *Millesi* im Frühjahr 1974 ein Replantationsdienst eingeführt.

Waren es anfänglich organisatorische Probleme, wie die Aufklärung der mit der Erstversorgung von Unfällen befaßten Stellen, so wurde in den darauffolgenden Jahren mehr Aufmerksamkeit verschiedenen technischen Details und somit der Verbesserung der Anheilungsrate gewidmet. In den Jahren 1977 bis 1980 konnten aus dem Wiener Replantationszentrum erste funktionelle Ergebnisse replantierter Extremitäten und Finger vorgestellt werden (*Berger* et al., 1978, *Frey* et al., 1979, *Meissl* et al., 1980).

## 2. Problemstellung

Durch all die Jahre fiel bei Kontrolluntersuchungen im Winter immer wieder auf, daß die replantierten Finger und Hände auf Änderungen der Außentemperatur anders

*Schlüsselwörter: Replantation – autonomes Nervensystem – Regeneration – Kälteintoleranz.*

*Key-words: Replantation – autonomic nerve system – regeneration – cold intolerance.*

**Zusammenfassung:** Patienten mit replantierten Fingern und Extremitäten geben noch Jahre nach der Replantation eine verschieden ausgeprägte Kälteintoleranz am Replantat an.

Um der Ursache dieser Störung näher zu kommen, wurden an einem experimentellen Replantationsmodell (Kaninchenohrmuschel) Durchblutungsmessungen und histologische Untersuchungen durchgeführt.

Dabei zeigte die spezifische Hautdurchblutung, gemessen mit Xenon 133, eine sehr hohe Ruhedurchblutung und keinen Unterschied zwischen gesunder und replantierter Kaninchenohrmuschel.

Um die globale Ohrdurchblutung zu erfassen, wurde die Thermographie angewendet. Dabei fand man die Thermoregulation – geprüft durch indirekte Thermoprovokation – an der replantierten, gegenüber der Kontrollohrmuschel eingeschränkt.

2 Monate nach der Replantation reagierte das Replantat sowohl auf Erwärmung wie Abkühlung am Stamm des Kaninchens statistisch signifikant geringer als das Kontrollohr. Die Wiedererwärmungszeit an der replantierten Kaninchenohrmuschel ist ebenfalls verlängert.

Auch noch ein Jahr nach Replantation ist die Reaktion auf Abkühlung statistisch signifikant geringer. Die Wiedererwärmung ist verlangsamt. Am replantierten Ohr treten zum Teil paradoxe Reaktionen auf.

Histologische Untersuchungen an replantierten Kaninchenohrmuscheln bis 14 Monate nach der Operation zeigen, daß die Reinnervation der zentralen Gefäße, verglichen mit der Reinnervation des zentralen afferenten Nerven, verzögert ist.

Der neu gebildete Gefäßplexus ist weniger dicht als an den Gefäßen des Kontrollohres. In verschiedenen Teilen des replantierten Ohres ist die Reinnervation des Gefäßsystems noch 14 Monate nach Replantation mangel- bzw. lückenhaft. Gleichzeitig ist fallweise eine mangelhafte Reinnervation an den Hautanhangsgebilden festzustellen.

Es wird daher ein direkter Zusammenhang zwischen mangelhafter peripherer Regeneration autonomer Gefäßnerven und der Thermoregulationsstörung diskutiert.

Eine klinische Nachuntersuchung an insgesamt 36 Patienten zeigt das Phänomen der Kälteintoleranz an 35 Patienten mehr oder weniger stark ausgeprägt. Es wird versucht, einen Zusammenhang zwischen Art der Verletzung, Alter des Patienten, Höhe der Amputation, Güte der Sen-

sibilitätsrückkehr, Durchblutung und Schweißsekretion und der Stärke der Kälteintoleranz herzustellen.

Es kann auf Grund dieser Untersuchungen nachgewiesen werden, daß die geringsten Beschwerden bei Kälte jene Patienten angeben, die am Replantat eine gute Durchblutung und eine gute Rückkehr aller sensiblen Qualitäten aufweisen. Daß diese Patienten jedoch auch eine gewisse Temperaturadaptationsstörung aufweisen, dürfte auf die Tatsache zurückzuführen sein, daß auch in diesen Fällen eine mangel- oder lückenhafte Regeneration des autonomen Gefäßnervenplexus bzw. Reinnervation an den Hautanhangsgebilden stattgefunden hat.

*Regeneration of autonomic nerve system after replantation (experimental and clinical study)*

**Summary:** Patients with replanted fingers and extremities often continue to complain of variable cold intolerance of the replanted part for years after replantation.

To identify the possible causative factors, blood flow - measurements and histological examinations were made in an experimental replantation model, i. e. auricular conchae of rabbits.

Specific skin flow determined with <sup>133</sup>Xenon showed high resting levels without any difference between the normal and the replanted ear.

Global auricular flow was assessed by thermography. This showed heat regulation on the replanted versus the control side to be reduced on indirect heat provocation.

Two months after replantation the response of the replanted ear to truncal hyperthermia and hypothermia was significantly poorer than on the normal side. In addition, the time required for a return to normothermia was prolonged.

Even one year after replantation the response to hypothermia was significantly poorer and normothermia was restored slower. Some of the replanted ears responded paradoxically.

Histological examinations of replanted rabbit ear within 14 months after surgery showed that reinnervation of central vessels took longer than the regeneration of the central afferent nerve fibers.

The newly formed vascular plexus was less abundant than in the control ear. In areas, the vascular system of the replanted ear was still inadequate or incomplete after as much as 14 months. Skin appendages equally showed poor reinnervation.

These observations were suggestive of a direct interrelation between poor regeneration of peripheral autonomic vascular nerves and disorders of heat regulation.

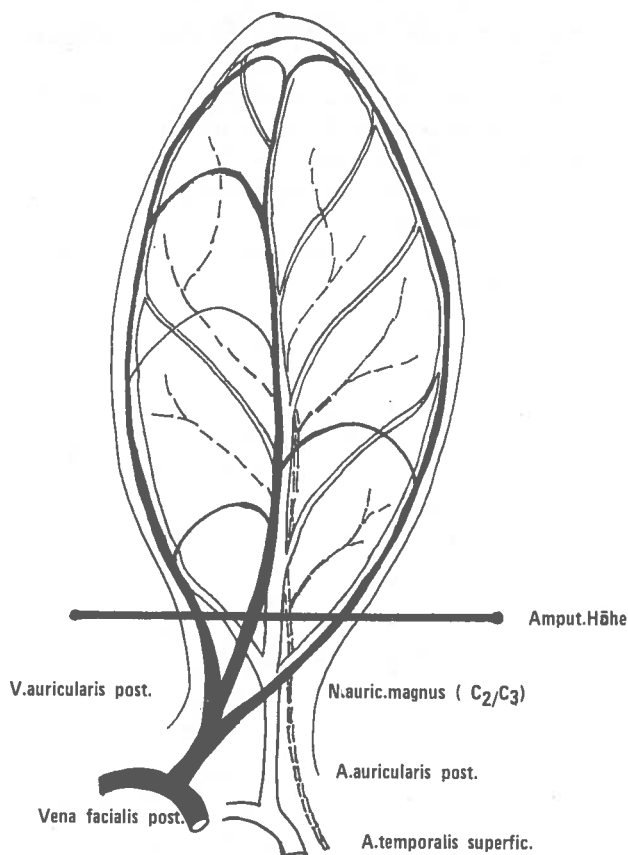


Abb. 1. Schematische Darstellung der Anatomie der Kaninchenohr-muschel.

Sensibel: Die sensible Versorgung des Ohres wird durch den N. auricularis magnus (C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>) bewerkstelligt. Sein Hauptast verläuft parallel zum zentralen Gefäßbündel und teilt sich etwa in der Mitte in kleine Faszikel auf, die die Arterie an beiden Seiten begleiten.

Der Nerv enthält vor allem myelinisierte Fasern von verschiedener Größe und Axondurchmesser und einige unmyelinisierte Fasern.

**Gefäßinnervation** (Abb. 2): Die Arterie besitzt einen adventitiellen Plexus. Er besteht aus postganglionären, noradrenergen sympathischen Fasern aus dem Ganglion cervicale superius und dem Ganglion stellatum (Feldberg).

Der Plexus in den arteriovenösen Anastomosen ist signifikant dichter als in anderen Gefäßgebieten. Die Kapillaren haben keine spezielle Nervenversorgung. Einige Fasern begleiten diese Gefäße in verschiedenen Abständen ohne direkte Verbindung zur Kapillarwand. In diesen Gebieten ist der nervale Einfluß nur durch die Synapse à distance mit Freisetzung und Aufnahme von Noradrenalin

zu erklären (Lassmann). Der Nervenplexus der Venen ist weniger dicht als der der Arterien.

### 3.1.3. Technik der Amputation und Replantation der Kaninchenohr-muschel

Die Operation wird in intravenöser Barbituratnarkose (20 bis 30 mg/kg) durchgeführt.

Nach Durchtrennung der Haut an der Basis des Ohres, knapp distal des Muskelansatzes, erfolgt die Präparation unter dem Mikroskop (Zeiss) mit 6facher Vergrößerung. Es werden alle 3 Äste der A. auricularis, die V. auricularis anterior und posterior dargestellt. Nach Unterbindung und Durchtrennung der Ohr- randgefäße wird das zentrale Gefäßbündel auf eine Strecke von 2 cm vom periadventitiellen Bindegewebe gesäubert, Arterie und Vene mit je 2 Mikropulley geklemmt und durchtrennt. Der äußere Gefäßdurchmesser der Arterie beträgt 0,75 bis 1 mm, der der Vene 1 bis 1,25 mm. Die Gefäße werden sogleich mit einer Heparin-Kochsalzlösung (1000 IE/100 ml) von Blut und Koagula saubergespült. Der die zentralen Gefäße begleitende N. auriculotemporalis wird ebenfalls schonend freigelegt und durchschnitten. Es folgt die Amputation der Ohrmuschel. Unmittelbar danach wird mit der Replantation begonnen, so daß die Ischämiezeit maximal eine Stunde beträgt.

Um dem replantierten Ohr an seiner Basis die nötige Stabilität zu geben, wird der Knorpel mit einer Überlappung von 1 cm wieder vereinigt.

Die Naht der Gefäße und des Nerven erfolgt bei einer 16- bis 25fachen Vergrößerung mit dem Mikroskop. Zuerst wird die Arterie mit 6 bis 8 Einzelknopfnähten 10/0 Ethilon mit BV6-Nadel rekonstruiert. Für die Vene genügen meist 5 bis 6 Nähte. Der N. auriculotemporalis wird durch 1 bis 2 epineurale Nähte anastomosiert (10/0 Ethilon, BV2). Nach einem spannungslosen Hautverschluß werden beide Ohren mittels einer Durchstichungsnaht an der Ohrspitze aneinander fixiert und so mit einem Stützverband für 3 Tage in senkrechter Position gehalten. Dadurch wird postoperativ die Abknickung der Gefäßanastomosen vermieden und durch die Erleichterung des venösen Abstroms das Ödem in Grenzen gehalten.

### 3.1.4. Ergebnisse

An 30 Kaninchen wurde eine einseitige Ohrmuschelreplantation durchgeführt. In 4 Fällen kam es in den ersten 5 Tagen zu einer Totalnekrose des Ohres, in einem Fall zur Ohr- randnekrose von 6 : 2 cm.

Als Ursache für die Totalnekrose konnte 3mal das Mitfassen der Venenhinterwand bei einer Vorderwandnaht (und somit eine Venenthrombose), einmal die Ausbildung

reagierten als die gesunden. Außerdem berichteten viele Patienten über eine mehr oder weniger ausgeprägte Kälteempfindlichkeit, die von unangenehmen Sensationen bis zu ausgeprägten Schmerzen reichte.

In unserer Beobachtung wurden wir durch Publikationen von *Gelbermann et al., 1978, Frey et al., 1979, und Schlenker et al., 1980*, bestätigt, die dieses Phänomen als Kälteintoleranz bzw. Temperaturregulationsstörung beschrieben haben, ohne näher auf die Ursache derselben einzugehen.

Wir stellten uns die Frage, ob und welche bei der Replantation wiederhergestellte Strukturen für diese Beschwerden verantwortlich sind: *sensible Nerven, Gefäße, autonomes Nervensystem?*

Würde die Kälteempfindlichkeit mit der Regeneration der sensiblen Nervenfasern in Zusammenhang stehen, müßte diese bei Wiederherstellung guter sensibler Qualitäten wieder verschwinden oder abnehmen.

Sollte andererseits diese Störung nur an Replantaten auftreten, die eine mehr oder weniger ausgeprägte Minderdurchblutung aufweisen, so dürften Patienten mit gut durchbluteten Fingern nicht über derartige Beschwerden klagen.

Da die Thermoregulation an ein intaktes autonomes Nervensystem gebunden ist, könnten die oben angegebenen Störungen auch durch eine mangelhafte oder gar fehlende Regeneration der autonomen Nervenfasern verursacht werden.

Eine gezielte Nachuntersuchung von Patienten mindestens ein Jahr nach der Replantation sollte einen möglichen Zusammenhang zwischen der Temperaturregulationsstörung und der Sensibilität bzw. der Durchblutung aufzeigen.

Die Intensität und das Muster der Schweißsekretion am replantierten Finger gibt einen gewissen Hinweis auf die Regeneration eines Teiles der autonomen Fasern. Für unsere Fragestellung nach der Ursache der Temperaturregulationsstörung scheint es uns jedoch wichtig, über die Regeneration des autonomen Gefäßnervenplexus Aufschluß zu bekommen.

Probeexzisionen mit speziellen histologischen Untersuchungen von replantierten Fingern oder Händen sind nur in beschränktem Maße anlässlich von Sekundäreingriffen durchzuführen und verantwortbar. Wir mußten daher, um uns mit der Frage der Regeneration des autonomen Nervensystems an den Gefäßen näher auseinanderzusetzen, ein geeignetes tierexperimentelles Replantationsmodell finden, an dem wir über einen größeren Zeitraum histologische Verlaufsuntersuchungen und funktionelle Durchblutungsmessungen durchführen können.

Dieses Modell sollte folgende Forderungen erfüllen:

1. klare anatomische Verhältnisse der Durchblutung und Innervation des Organs,
2. wie die peripheren Extremitäten beim Menschen sollte der zu replantierende Teil auch thermoregulatorische Aufgaben zu erfüllen haben,
3. das Replantat sollte der Beobachtung und Untersuchung leicht zugänglich sein,
4. das Organ sollte womöglich paarig angelegt sein, um Vergleichsuntersuchungen am selben Tier durchführen zu können,
5. das Tier sollte einfach und durch längere Zeit zu halten sein.

Anatomische Studien (*Krause, 1884*), Arbeiten aus der Physiologie (*Shepherd, 1963, Bauereisen, 1971*), Histologie (*Hume und Waterson, 1978*) sowie Pharmakologie (*De la Lande, 1975*) ließen uns das Kaninchenohr als sehr geeignetes Modell erscheinen.

### 3. Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1. Material und Technik

##### 3.1.1. Versuchstiere

An 30 Kaninchen, mit einem Körpergewicht zwischen 2,5 und 3,5 kp wurde eine einseitige Ohrmuschelreplantation unter Anwendung mikrochirurgischer Operationstechnik durchgeführt.

##### 3.1.2. Anatomie und Histologie der Kaninchenohr muschel

Das äußere Ohr besteht aus einem dünnen Knorpel, der mit Haut überzogen ist. Lediglich an der Basis setzen Muskeln an.

*Gefäßversorgung:* Arteriell wird das Ohr hauptsächlich durch die A. auricularis posterior, einem Ast der A. temporalis, versorgt. Diese steigt hinter dem äußeren Ohr aufwärts und verzweigt sich an der medialen Seite des Ohres in 3 Äste. Der Ramus auricularis anterior und posterior verlaufen jeweils am Ohrrand, der kräftigste Ast, der Ramus auricularis medialis, zieht zentral.

Die 3 Äste kommunizieren miteinander und münden in arteriovenöse Anastomosen oder in kleinen Arteriolen ins Kapillarsystem.

Der venöse Abtransport erfolgt durch den Ramus anterior und Ramus posterior der V. auricularis posterior sowie durch die V. auricularis anterior am Vorderrand des Ohres. Gemeinsam münden sie in die V. facialis posterior (Abb. 1).

*Nervenversorgung:* Motorisch: Die Muskelfasern in den basalen Anteilen des Ohres werden von Fasern des N. facialis mit Endplatten versorgt.

eines Hämatoms (und daher eine Kompression der Gefäßanastomosen von außen) angesehen werden.

Die Ursache für die Ohrtrandnekrose konnte nicht abgeklärt werden. 23 Tiere mit replantiertem Ohr wurden in einem Zeitraum von 6 Tagen bis 14 Monaten am Leben gehalten. 2 weitere Tiere wurden für eine Langzeituntersuchung vorgesehen und überleben bisher 18 bzw. 20 Monate die Operation.

Von den 23 Tieren wurden 5 Tiere innerhalb des 1. Monats nach Replantation getötet. 3 Tiere lebten bis Ende des 2. Monats, 2 starben im 4. Monat, 3 im 5. Monat, 2 im 7. Monat, 3 im 8. Monat, 1 im 10. Monat, 3 im 12. Monat und 1 im 14. Monat.

### 3.2. Untersuchungen an der replantierten Kaninchenohrmuschel

Es sollte die Durchblutung des replantierten Kaninchenohres im Vergleich zum Kontrollohr gemessen werden, wobei wir Aufschluß über die Ruhedurchblutung, die reaktive Hyperämie, die Durchblutungswerte bei Noradrenalinegabe und vor allem die Durchblutung bei Thermoprovokation erfassen wollten. Wir verwendeten dazu einerseits die Xenon-133-Clearance, mit der man die Durchblutung pro Volumen mißt. Andererseits bedienen wir uns der Thermographie, die uns einen Einblick in die gesamte Ohrdurchblutung gestattet. Histologische Untersuchungen sollten vor allem über die Regeneration des autonomen Gefäßnervenplexus Aufklärung bringen.

#### 3.2.1. Durchblutungsmessung mit Xenon 133 (Lassen, Lindberg, Munck, 1964)

Die Xenon-133-Clearance mißt die spezifische Hautdurchblutung in ml/100 g Gewebe/Minute. Die spezifische Durchblutung errechnet sich aus der Halbwertszeit des Auswaschens und dem Verteilungskoeffizienten  $\lambda$  zwischen Blut und Gewebe.

In unserem Versuch wird ein  $\lambda$  von 0,7 angenommen:

$$F = K \cdot \lambda \cdot 100 \text{ (ml/100 g/min)}$$

$$K = \frac{\ln 2}{T/2} \cdot \lambda$$

Die Hautdurchblutung der replantierten und gesunden Ohrmuschel wurde mittels Xenon-133-Clearance an 10 Tieren gemessen.

##### 3.2.1.1. Methode

Ruhedurchblutung:

Es wurden 0,05 bis 0,1 ml Xenon 133 (10 bis 30 Ci) in beide Ohren mittels feinsten Kanüle intrakutan unmittelbar neben dem zentralen Gefäßnervenbündel im mittleren Ohrdrittel injiziert und mit Szintillationsmeßsonden über

Ratemeter und Logarithmenschreiber die Auswaschkurve durch 5 Minuten registriert.

Die reaktive Hyperämie wurde nach 3minütiger arterieller Sperre zur Prüfung von stenosierenden Prozessen an der Arterie gemessen. Es wurde beiderseits wieder eine Xenonquaddel gesetzt, 3 Minuten die Auswaschkurve registriert, dann die Ohren mit einer weichen Darmklemme an der Ohrbasis für 3 Minuten geklemmt und nach Öffnen der Sperre die Registrierung fortgesetzt.

Durchblutung unter lokalem Noradrenalinzusatz:

Zur Überprüfung der Gefäßreagibilität auf direkte vaso-konstriktorische Reize wurde nach Messung des Ausgangswertes eine Quaddel mit Xenon 133 und 0,5  $\mu\text{g/ml}$  Noradrenalin gesetzt und die Auswaschkurve ein zweites Mal registriert.

Hautdurchblutung nach Erwärmen des Stammes:

Zum Erfassen der Änderung der Hautdurchblutung der Ohrmuschel bei Stammerwärmung des Tieres wurde eine Messung vor Erwärkung, die zweite Messung nach 20minütiger Stammerwärmung durchgeführt. Die Erwärkung erfolgte mit 4 Thermophoren, die mit 55 °C warmem Wasser gefüllt und um den Stamm des Tieres gelegt wurden.

Alle Messungen wurden bei einer Raumtemperatur von 23 bis 26 °C durchgeführt. Die Tiere konnten sich eine halbe Stunde an diese Temperatur anpassen. Während der Untersuchung waren die Tiere nicht anästhesiert. Sie waren in einem speziell angefertigten, mit Styropor isolierten Käfig untergebracht, so daß keine Wärmeabstrahlung möglich war. Die Tiere waren zur Untersuchung am Stamm und beiden Ohren rasiert worden. Durch ein Loch an der Vorderseite des Käfigs konnte der Schädel mit beiden Ohren durchgesteckt werden, so daß letztere der Messung zugänglich wurden.

##### 3.2.1.2. Ergebnisse der Xenon-133-Clearance

Ruhedurchblutung:

Die Ruhedurchblutung an 10 Kaninchen läßt keinen Unterschied zwischen gesundem und replantiertem Ohr erkennen. Auffallend ist die sehr hohe Ruhedurchblutung von 24 ml/100 g/min (Tab. 1).

Reaktive Hyperämie:

Es sind weder statistisch signifikante Unterschiede zwischen gesundem und replantiertem Ohr noch solche zwischen Ruhe und reaktiver Hyperämie nachzuweisen (Tab. 2).

Hautdurchblutung unter lokalem Noradrenalinzusatz:

Hier kommt es zu einer statistisch signifikanten Reduktion der spezifischen Hautdurchblutung. Unterschiede zwischen gesunden und replantierten Ohren sind nicht nachweisbar. Bildet man Quotienten zwischen den Durch-

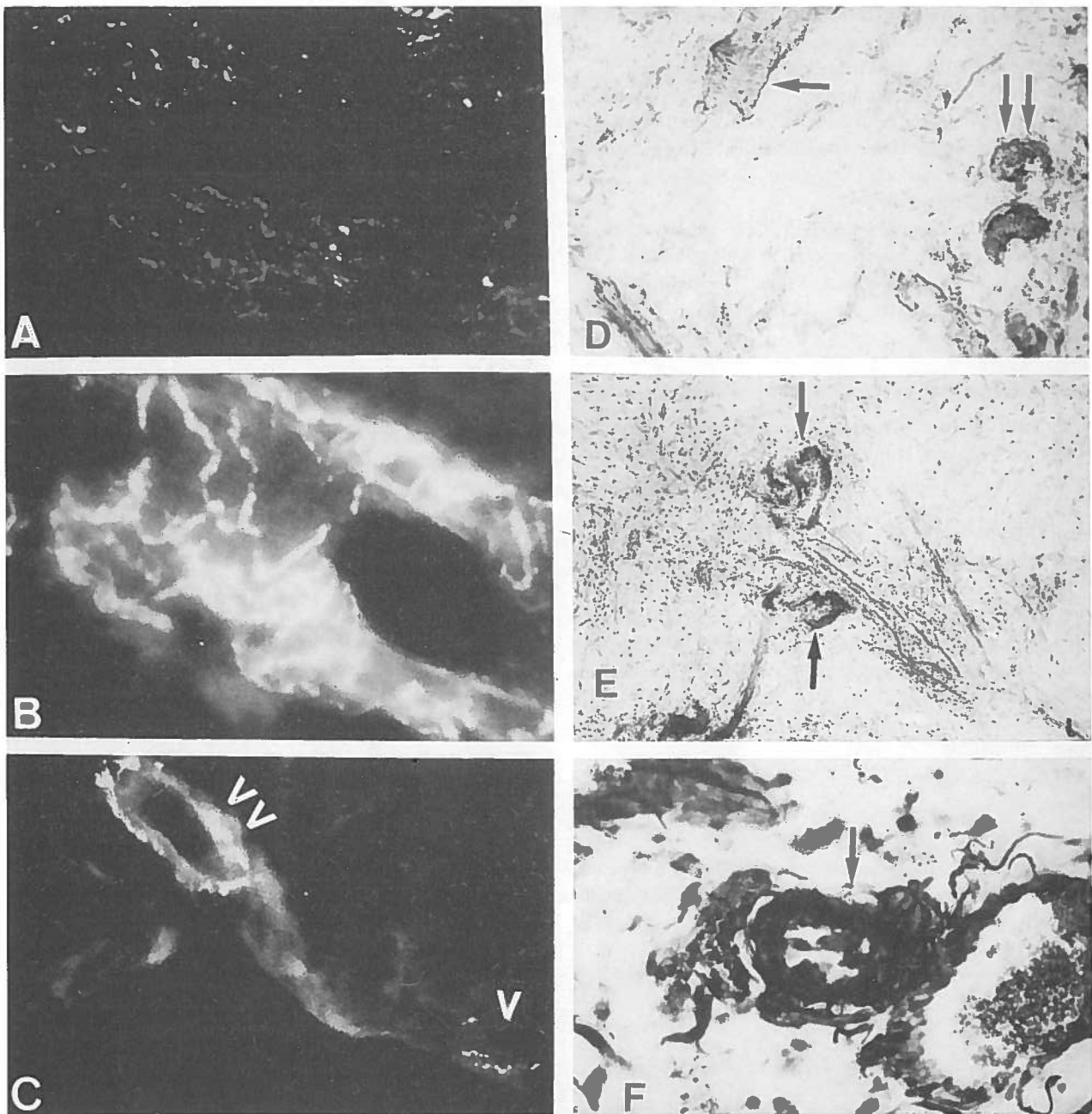


Abb. 2. Normale Innervation des Gefäßsystems einer Kaninchenohrmuschel.

A, B, C - Glyoxylsäure-Fluoreszenzmethode.

A - Basaler Ohrmuschelanteil: adventitieller Nervenplexus der zentralen Arterie. Vergrößerung 150/1.

B - Mittleres Ohrmuscheldrittel: noradrenerger Nervenplexus einer Arterie. Vergrößerung 200/1.

C - Distales Ohrmuscheldrittel: lateraler Anteil noradrenerger Nervenplexus einer arteriovenösen Anastomose. Arterieller (↑↑) und venöser (↑) Schenkel. Vergrößerung 200/1.

D - Spezifische Cholinesterase. Distales Ohrmuscheldrittel - lateraler Anteil. Nervenplexus einer kleinen Arterie (↑). Nervenplexus einer arteriovenösen Anastomose (↑↑). Vergrößerung 125/1.

E - Spezifische Cholinesterase. Distales Ohrmuscheldrittel - lateraler Anteil. Arteriovenöse Anastomose. Vergrößerung 125/1.

F - Osmium-Zink-Jodid-Methode. Distales Ohrmuscheldrittel - lateraler Anteil. Arteriovenöse Anastomose. Vergrößerung 200/1.

Die indirekte Erwärmung wurde dadurch erreicht, daß man dem Tier um seinen geschorenen Stamm 20 Minuten lang Wärmeflaschen mit einer Wassertemperatur von 55 °C legte. Es folgte wieder die Registrierung der Ohrtemperatur auf die oben angegebene Weise.

Die indirekte Abkühlung wurde durch Anwendung von Col Pac mit einer Temperatur von minus 5 °C standardisiert. Diese Anwendungsform besteht aus einer leicht verformbaren Plastikhülle, die mit einer gelartigen Masse aus hydriertem Silikat gefüllt ist und eine niedrige thermische Leitfähigkeit besitzt. Die anpassungsfähige Komresse ist an jede Körperstelle exakt anmodellierbar (Trnavsky, 1980).

5 Minuten nach indirekter Abkühlung registrierten wir neuerlich die Temperatur, öffneten den Käfig, entfernten die Col Pac und warteten 20 Minuten nach Kälteende – um nach dieser Zeit die Wiedererwärmung beider Ohren zu registrieren.

### 3.2.2.2. Material

2 Kaninchen mit 2 gesunden Ohren und 13 Kaninchen mit je einem replantierten Ohr wurden thermographiert.

Bei den 13 Kaninchen mit rechtsseitiger Ohrmuschelreplantation handelte es sich um eine Gruppe von 7 Tieren, bei denen die Operation 2 Monate zurücklag (Abb. 3). Bei der anderen Gruppe mit 6 Tieren wurde ein Jahr vor der Messung die Replantation ausgeführt (Abb. 4).

### 3.2.2.3. Ergebnisse der Thermographie

Beide Kontrolltiere reagierten an beiden Ohren sowohl in der Ausgangssituation wie bei Thermoprovokation symmetrisch.

Die Meßergebnisse der 13 Kaninchen mit Ohrmuschelreplantation sind in der Tabelle 3 und 4 zusammengefaßt.

*Abb. 3. Thermographie von Kaninchenohrmuscheln (Nr. 10). Rechts 2 Monate nach Ohrmuschelreplantation, links nicht operiertes Vergleichsohr.*

*A – Ruhewert der Durchblutung beider Ohrmuscheln.*

*B – Nach 20 Minuten indirekter Wärmezufuhr Durchblutungsanstieg beider Ohrmuscheln.*

*C – Nach 5 Minuten indirekter Abkühlung deutliche Vasokonstriktion am linken Ohr, die am rechten replantierten Ohr deutlich abgeschwächer verläuft.*

*D – 20 Minuten nach Kälteende hat sich das nicht replantierte Ohr auf etwa die Ausgangstemperatur wieder eingestellt.*

*Die einzelnen Farben am linken Bildrand bedeuten Temperaturunterschiede von 1 °C. Der Übergang von Violett zu Rot wurde auf 35 °C eingestellt, so daß ein Temperaturbereich von 30 bis 40 °C resultiert.*

*Abb. 4. Thermographie von Kaninchenohrmuscheln (Nr. 13). Rechts ein Jahr nach Ohrmuschelreplantation, links nicht operiertes Vergleichsohr.*

*A – Ruhewert der Durchblutung beider Ohrmuscheln.*

*B – Nach 20 Minuten indirekter Erwärmung reagiert das nicht operierte linke Ohr mit einer sehr kräftigen Durchblutungszunahme, während das replantierte Ohr kaum in seiner Durchblutung zunimmt.*

*C – Starke Vasokonstriktion im nicht replantierten Kontrollohr. Deutlich geringere Reaktion im replantierten Ohr nach 5 Minuten indirekter Abkühlung.*

*D – Kräftige Wiedererwärmung des Kontrollohres links 20 Minuten nach Kälteende.*

Statistische Auswertung der Thermoprovokationsuntersuchungen:

Die Analysen unterschiedlicher Veränderungen der Ohrtemperatur bei replantierten und gesunden Ohren wurden verteilungsfrei mit dem Wilcoxon-Test für gepaarte Beobachtungen, unterschiedliches Verhalten der 2 Versuchsgruppen (1 Jahr, 2 Monate) mit dem U-Test nach Mann und Whitney durchgeführt.

1. Es bestehen keine Unterschiede zwischen replantierten und gesunden Ohren in der Ausgangssituation.

2. Bei indirekter Erwärmung ist der Temperaturanstieg in der gesunden Ohrmuschel 2 Monate nach der Replantation signifikant höher als in der replantierten Ohrmuschel ( $p = 0,023$ ). Dieser Unterschied ist ein Jahr nach Replantation nicht mehr nachweisbar.

3. Bei indirekter Abkühlung reagiert die replantierte Ohrmuschel mit einer geringeren Abkühlung als die Kontrollohrmuschel, dies sowohl 2 Monate ( $p = 0,008$ ) als auch ein Jahr nach der Operation ( $p = 0,016$ ).

4. 20 Minuten nach Kälteende zeigt die replantierte Ohrmuschel eine schwächere Wiedererwärmung als die gesunde ( $p = 0,031$ , 2 Monate;  $p = 0,016$ , 1 Jahr).

5. Bei der indirekten Abkühlung findet man eine unterschiedliche Reaktion der replantierten Ohrmuschel, je nachdem ob die Untersuchung 2 Monate oder ein Jahr nach der Operation durchgeführt wurde ( $p = 0,05$ ).

Das gleiche gilt für die Wiedererwärmung ( $p = 0,063$ ).

Es bestehen jeweils stärkere Effekte bei den Tieren 2 Monate nach Replantation.

### 3.2.3. Histologische Untersuchungen am replantierten Kaninchenohr

Neben 2 normalen gelangten 17 autotransplantierte Kaninchenohrmuscheln in einem Abstand von 6 Tagen bis 14 Monaten nach der Replantation zur Untersuchung.

Tab. 1. Spezifische Hautdurchblutung (ml/100 g/min) an replantierten und gesunden, kontralateralen Kaninchenohrmuscheln mit Xenon 133 gemessen – in Ruhe, bei Körpererwärmung und lokaler Noradrenalingabe. Es finden sich keine Unterschiede in der spezifischen Durchblutung replantiert-gesund. Bei indirekter Erwärmung kommt es auch zu keinem Anstieg der spezifischen Durchblutung. Bei Gabe von Noradrenalin lokal kommt es zu einer drastischen Senkung der Durchblutung, ohne einen Unterschied zwischen replantiert und gesund aufzuweisen.

Ruhedurchblutung		Durchblutung unter Körpererwärmung		Durchblutung unter lokal. Noradrenal.		Wärme / Ruhe		Noradren./ Ruhe	
replant.Ohr	gesundes Ohr	replant.Ohr	gesundes Ohr	replant.Ohr	gesundes Ohr	replant.Ohr	gesundes Ohr	replant.Ohr	gesundes Ohr
n = 10		n = 10		n = 6		n = 10		n = 6	
24,43 ± 2,85	23,63 ± 3,25	26,02 ± 4,94	21,98 ± 4,17	6,16 ± 1,34	6,49 ± 2,38	1,12 ± 0,18	0,99 ± 0,16	0,27 ± 0,04	0,26 ± 0,04
n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
x	n.s.	x							
	x	n.s.	x						
x		p < 0,05		x					
	x		p < 0,05		x				

Alle Angaben  $\bar{x} \pm S\bar{x}$   
Wilcoxon-Test

blutungswerten unter lokalem Noradrenalinzusatz und der Ruhedurchblutung, so läßt sich auch hier kein Unterschied zwischen gesunder und replantierter Seite nachweisen (Tab. 1).

Hautdurchblutung nach Erwärmen des Stammes:

Auch hier sind keine statistisch signifikanten Unterschiede der spezifischen Hautdurchblutung zwischen gesunden und replantierten Ohren nachweisbar. Es finden sich auch keine Unterschiede zwischen Ruhedurchblutung und nach 20minütiger Stammerwärmung. Auch die Quotienten Durchblutung unter Stammerwärmung/Ruhe zeigen keine signifikanten Unterschiede (Tab. 1).

### 3.2.2. Thermographie

Um Einblick in die durchströmte Masse zu erhalten, wurde die Thermographie herangezogen.

Die Aufzeichnung infraroter Strahlen durch die Thermographie ist eine einfache Methode, die zur gleichzeiti-

Tab. 2. Spezifische Hautdurchblutung (ml/100 g/min) an replantierten und gesunden kontralateralen Kaninchenohrmuscheln mit Xenon 133 in Ruhe und nach 3 Minuten arterieller Sperre gemessen. Es ist kein Anstieg nach 3 Minuten arterieller Sperre zu beobachten.

Ruhedurchblutung		Reakt. Hyperämie 3' Art.Sperre	
replant.Ohr	gesundes Ohr	replant.Ohr	gesundes Ohr
n = 6		n = 6	
25,83 ± 2,51	27,83 ± 5,55	25,78 ± 6,34	26,45 ± 4,24

Alle Angaben  $\bar{x} \pm S\bar{x}$   
alle n. s.  
Wilcoxon-Test

gen und raschen Erfassung von Temperaturunterschieden an Hautarealen dient. Da die Kaninchenohrmuschel nur aus Haut und einer dünnen Knorpelschicht besteht, läßt die thermographisch erfaßte Änderung der Hauttemperatur einen Schluß auf die Durchblutung zu.

### 3.2.2.1. Methode

Als Meßapparat diente ein AGA Thermovision 780-Gerät. Eine detaillierte Beschreibung ist in einer vom Hersteller veröffentlichten Broschüre zu finden (Publikation Nr. 556556492 1979, AGA IRS International, ABS-18181 Lidengö, Sweden).

Die Infrarotstrahlung der Haut der Kaninchenohren konnte kontinuierlich auf einer Schwarzweiß- und einer Farbthermal-Kamera beobachtet werden. In bestimmten Intervallen wurden diese Thermogramme durch eine Polaroid- oder eine Farbbild-Kamera festgehalten.

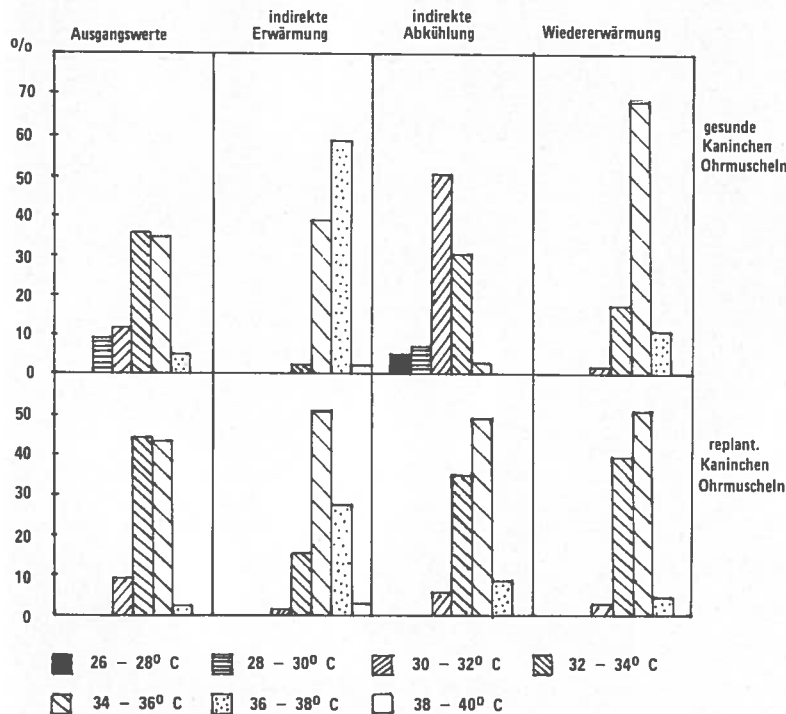
Der Meßbereich betrug 10 °C Temperatur, wobei der Nullpunkt im Thermogramm mit 35 °C festgelegt wurde. Fiel in einigen Fällen die Hauttemperatur der Ohren außerhalb dieses Meßbereiches, wurde dieser verstellt.

Mit Hilfe eines Thermal-Area-Analyzers kann ein bestimmtes Hautareal der Kaninchenohrmuschel exakt abgegrenzt und die Temperatur in diesem Gebiet gemessen werden. Ein digitaler Anzeiger gibt die prozentuelle Verteilung von 5 Temperaturbereichen an, wobei ein Temperaturbereich 2 °C entspricht.

Zuerst wurde die Hauttemperatur beider Ohren in der Ausgangssituation gemessen.

Nach Dokumentation der Ausgangssituation wurde mit der Thermoprovokation begonnen.

Tab. 3. Vergleich der Mittelwerte angegebener Temperaturbereiche (in Prozenten) von replantierten und gesunden, kontralateralen Kaninchenohrmuskeln – 2 Monate nach Replantation (n = 7). Verminderte Reaktionsfähigkeit der replantierten Kaninchenohrmuskeln auf indirekte Temperaturänderungen (Näheres siehe Text).



Zeit nach Replantation:

6Tg 3Wo 4Wo 2Mo 4Mo 5Mo 7Mo 8Mo 12Mo 14Mo

Anzahl der Tiere:

1 3 1 1 2 2 2 2 2 1

Dabei wurde je ein Stück von 1 : 2 cm aus dem proximalen, dem mittleren und dem distalen Ohrdrittel zentral und peripher entnommen und die De- und Regeneration der Nerven des afferenten und autonomen Nervensystems untersucht.

### 3.2.3.1. Methodik

Routinefärbung und Sudan-Schwarz-B-Färbung an Gefrier- und Paraffinschnitten.

Für die Darstellung der spezifischen Cholinesterase die Methode nach Root-Karnovsky.

Die Glyoxylsäuremethode für die Fluoreszenzmikroskopie der noradrenergen Fasern an nativen Gefrierschnitten. Osmium-Zinkjodid-Methode nach Mailet-Jabonero für die übersichtliche Darstellung aller nervösen Formationen. Silberimprägnation nach Cauna und Jabonero an formalinfixiertem Material und Paraffinschnitten (Gootz et al., 1974).

### 3.2.3.2. Histologische Befunde der replantierten Kaninchenohren

Die histologischen Befunde von 2 unoperierten Kaninchenohren sind im Kapitel 3.1.2 zusammengefaßt (Abb. 2).

6. postoperativer Tag: Am zentralen Nerv peripher der Koaptationsstelle findet man eine Degeneration der Markscheiden und Axone mit entsprechenden Abbauvorgängen.

Am zentralen Gefäß zeigt der Plexus eine weitgehende Degeneration mit punktförmigen Resten noradrenerger fluoreszierender Partikel. An einzelnen Arteriolen sind cholinesterasepositive Formationen noch erkennbar, jedoch pathologisch verändert.

3. Woche nach Replantation (Abb. 5): Am zentralen Nerv liegt proximal eine weit fortschreitende Wallersche Degeneration mit komplettem Markabbau und Axonverlust vor, distal sind zum Teil noch intakte Strukturen vorhanden. An der Ohrbasis findet man bei einem Tier eine beginnende Reinnervation des zentralen Nerven.

Am zentralen Gefäß ist eine skizzenhafte Degeneration des Plexus zu sehen, wobei bandförmige Formationen Schwannscher Zellen an den Gefäßen mit granulärem Zer-

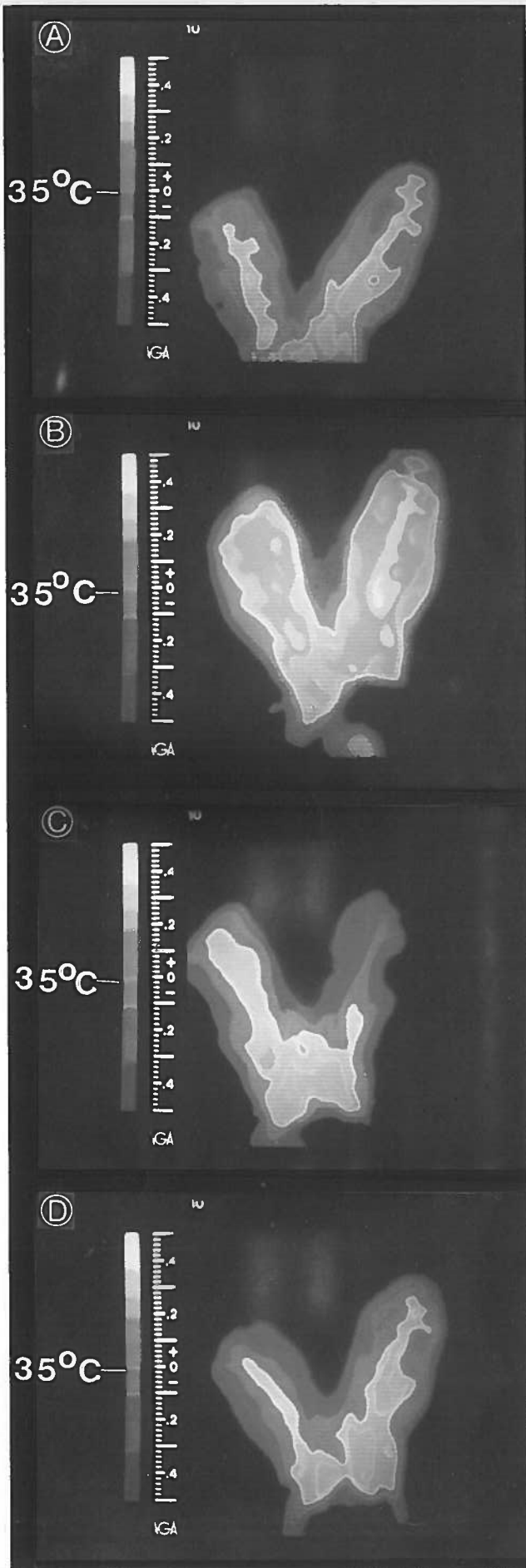


Abb. 3.

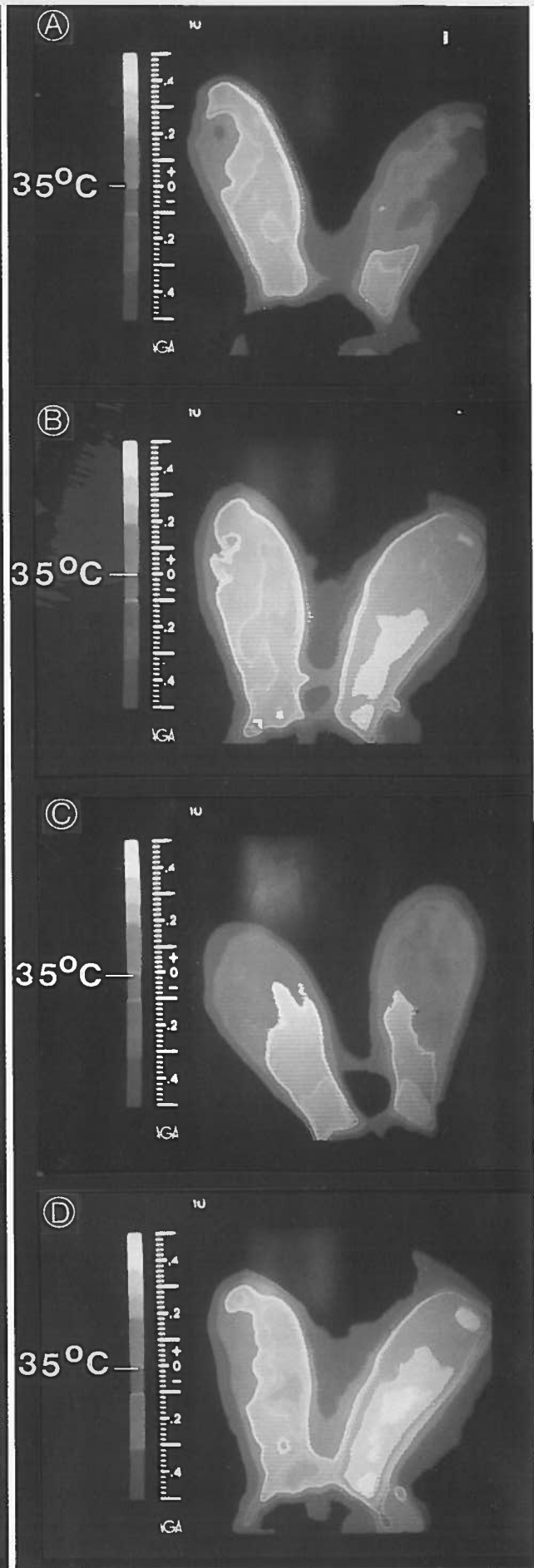
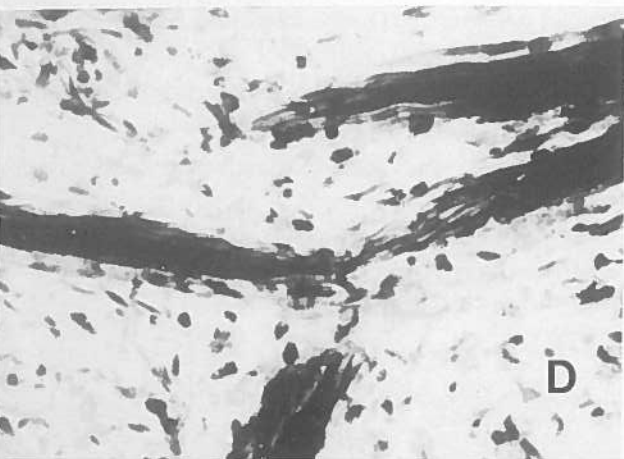
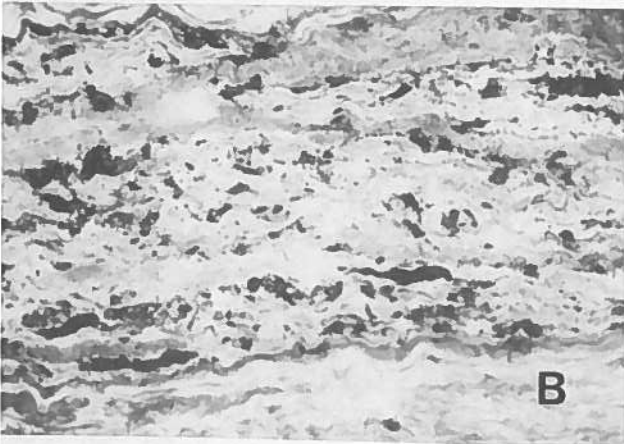
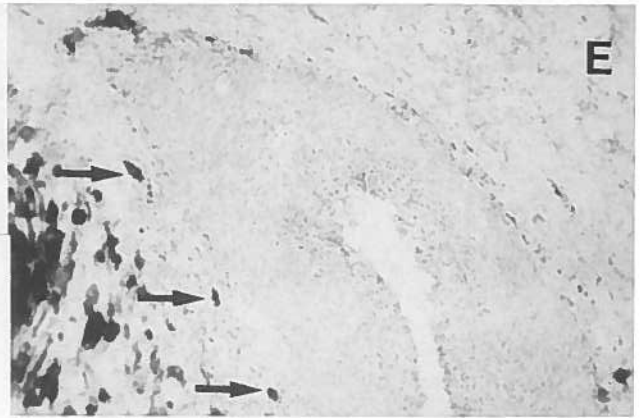
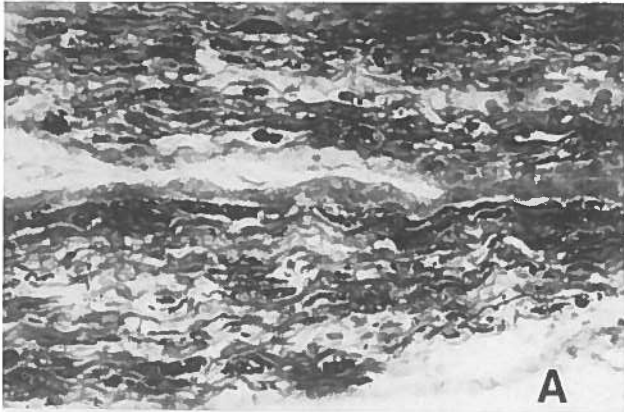
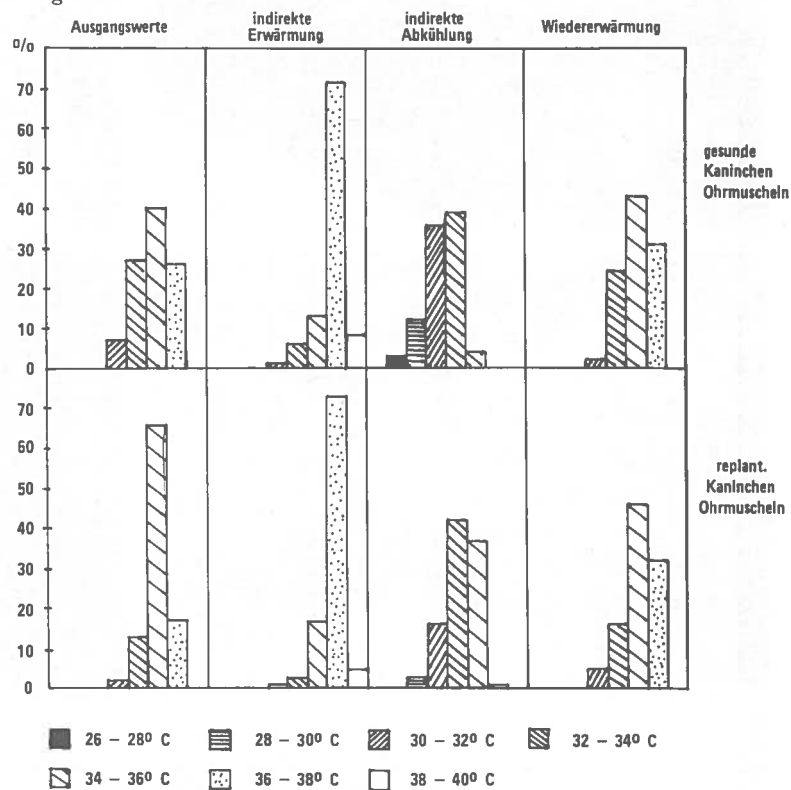


Abb. 4.



Tab. 4. Vergleich der Mittelwerte angegebener Temperaturbereiche (in Prozenten) von replantierten und gesunden, kontralateralen Kaninchenohrmuskeln – 1 Jahr nach Replantation (n = 6). Verbesserung der Reaktionsfähigkeit der replantierten Kaninchenohrmuskeln auf indirekte Erwärmung, jedoch noch abgeschwächte Reaktion auf indirekte Kälteeinwirkung.



fall der Fasern nachzuweisen sind. An Haarschaft und Haarzwiebeln kann man Reste offensichtlich präexistenter noradrenerger bzw. cholinesterasepositiver Elemente erkennen.

4. Woche: Der zentrale Nerv zeigt eine beginnende Reinnervation an der Basis und einen unterschiedlichen Markscheidenerfall mit Abraumzellen in den peripheren Ohrabschnitten.

Die Degeneration des Plexus der zentralen Arterie ist weit fortgeschritten und es sind nur mehr wenig fluoreszierende Granula und cholinesterasepositive Partikel vorhanden. Die Nervenversorgung der peripheren Arterien und die afferente Nervenversorgung der Haut und ihrer Adnexe ist reduziert. An einzelnen Arteriolen findet man noch immer einen Gefäßplexus in normalem Ausmaß. Die Venen zeigen eine deutlich verminderte Gefäßinnervation.

Nach 2 Monaten (Abb. 6) ist die Regeneration des zentralen Nerven im proximalen Drittel des Ohres fast abge-

schlossen. Es kann hier auch eine beginnende Reinnervation unterschiedlichen Ausmaßes in den Hautanhangsgebilden und subepithelial festgestellt werden. An den zentralen Gefäßen und den arteriovenösen Anastomosen findet man eine beginnende Reinnervation in unterschiedlichem Ausmaß, wobei vielfach kalibermäßig stärkere cholinesterasepositive Nervenfasern, offensichtlich die Gefäße als Leitbahn benützend, in einiger Entfernung davon verlaufen. Vereinzelt können noradrenerge Fasern in diesem Areal um die Gefäße festgestellt werden. Im distalen Abschnitt ist die Gefäßreinnervation erst am Beginn.

Im Bereich der Arteriolen bilden stärkere Nervenfasern grobe Netze, jedoch keinen typischen Plexus.

Auch die Reinnervation der Hautanhangsgebilde ist distal erst angedeutet.

Im 4. Monat nach Replantation ist die Regeneration des zentralen Nerven bis ins distale Drittel fortgeschritten, dort aber noch völlig unvollständig.

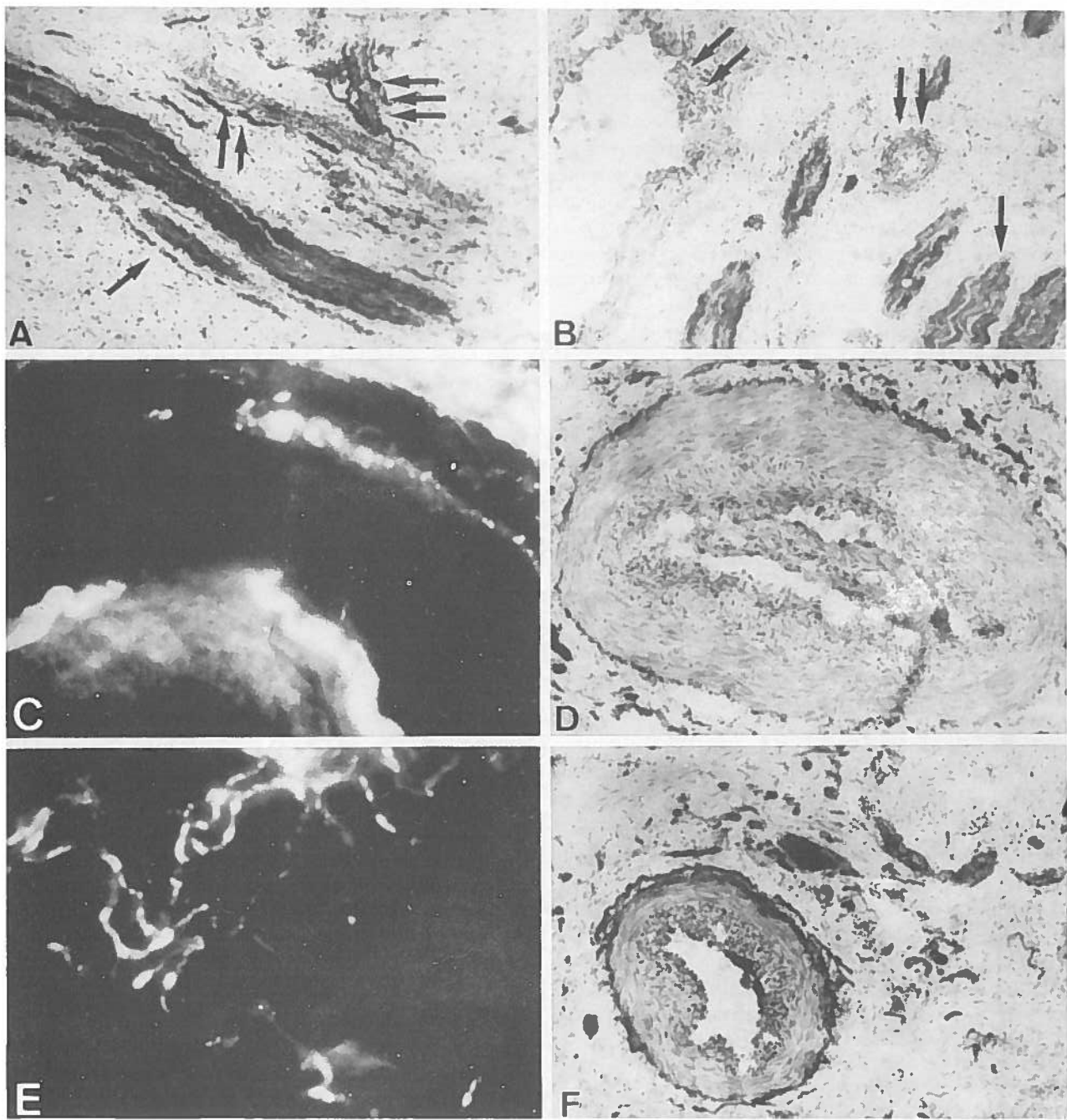


Abb. 6. Kaninchenohrmuschel – 8 Wochen nach Replantation.

A – Spez. Cholinesterase. Mittleres Ohrdrittel. ↑ = komplette Regeneration des zentralen Nerven, ↑↑ = inkomplette Regeneration des Gefäßnervenplexus um eine kleine Arterie, ↑↑↑ = inkomplette Reinnervation des Gefäßnervenplexus um den arteriellen Schenkel einer arteriovenösen Anastomose. Vergrößerung 125/1.

B – Spez. Cholinesterase. Mittleres Ohrdrittel, regenerierter zentraler Nerv, keinerlei Regeneration des Nervenplexus um eine Arterie (↑↑) und eine Vene (↑↑). Vergrößerung 125/1.

C – Glyoxylsäure-Fluoreszenzmethode. Basaler Anteil der Ohrmuschel. Reinnervation der zentralen Arterie mit noradrenergen Nerven in der Media. Vergrößerung 125/1.

D – Spez. Cholinesterase. Basales Ohrmuscheldrittel. Reinnervation der zentralen Ohrarterie. Vergrößerung 125/1.

E – Glyoxylsäure-Fluoreszenzmethode. Basales Ohrmuscheldrittel, noradrenerger Plexus um die zentrale Arterie. Vergrößerung 125/1.

F – Spez. Cholinesterase. Basales Ohrmuscheldrittel, reinnervierte Arterie. Vergrößerung 125/1.

Die Gefäße sind im peripheren Ohranteil inkomplett reinnerviert, bei weitgehender Reinnervation in den zentral gelegenen Abschnitten, wobei der neugebildete Plexus um die zentrale Arterie viel lockerer ist als im Kontrollohr. Dasselbe gilt für die zentrale Vene, die streckenweise einen sehr zarten, vor allem aus Einzelfasern aufgebauten nervösen Plexus aufweist. Kleinere Gefäße scheinen streckenweise noch nicht reinnerviert zu sein. An einigen fehlt der Plexus vollkommen. Die Hautanhangsgebilde zeigen eine beginnende Reinnervation. Feine nervöse Formationen reichen bis in den Subepidermalbereich, mitunter vereinzelt auch in die Epidermis.

Bei 2 Tieren findet man ähnliche Befunde auch noch im 5. Monat.

Im 7. Monat zeigt der zentrale Nerv proximal wie distal einen nahezu normalen Aufbau.

Am zentralen Gefäß ist im proximalen Drittel ein Plexus ausgebildet, der jedoch deutlich weniger dicht ist als normal. Distal ist der Gefäßplexus sehr locker um die zentrale Arterie. An kleineren Arterien im Gewebe findet man vielfach nur stärkere Begleitfasern, aber noch keinen netzförmigen Plexus.

Der noradrenerge Plexus ist in der Peripherie wesentlich weniger dicht ausgebildet als proximal.

Zwischen cholinesterasepositivem und noradrenergem Plexus ist ein deutlicher Unterschied zugunsten der cholinesterasepositiven Fasern vorhanden.

8. Monat (Abb. 7): Die Bemerkung des zentralen Nerven und der größeren Nervenstämme ist in den proximalen zwei Dritteln des Ohres normal. Im distalen Drittel besteht eine auffallende Verminderung bzw. Fehlen der Markscheiden. Darüber hinaus sind in diesen Abschnitten vermutlich infolge der geringeren Bemerkung nunmehr auch noradrenerge „beaded fibers“ darzustellen (H. Lassmann und G. Lassmann, 1978).

In den proximalen zwei Dritteln des replantierten Ohres findet man die Gefäße reinnerviert – mit Ausbildung eines noradrenergen Plexus an den großen Arterien, Venen und zum Teil an kleinen muskelstarken, seitlich gele-

genen Arterien und der arteriovenösen Anastomosen. Im obersten Ohrdrittel fehlt die Reinnervation an den Gefäßen.

Nach 12 Monaten findet man noch Unterschiede in der Intensität der Reinnervation der peripheren Arterien der Haut und ihrer Adnexe in verschiedenen Teilen des Ohres bei guter Reinnervation der zentralen Gefäße im proximalen Drittel.

Der neu geformte Gefäßplexus ist weniger dicht als normal. Es finden sich in der Peripherie vielfach kleinere Nervenstämme, die parallel zum Gefäß ziehen, jedoch mit diesem keinen Kontakt aufnehmen. Bei einem anderen Tier ist 1 bis 2 Monate nach Replantation in der distalen Hälfte des Ohres kein Gefäßplexus vorhanden.

Ebendort ist eine beginnende Reinnervation von Haaren und drüsigen Elementen bei sehr mangelhafter Schweißdrüseninnervation zu sehen. Bei einem Tier 14 Monate (Abb. 8) nach Replantation zeigt der zentrale Nerv einen fast völlig normalen Aufbau. Nur einige Fasern haben eine geringere Bemerkung und der Gehalt an Axonen ist gelegentlich vermindert. Der Plexus der großen zentralen Arterie ist vollkommen ausgebildet, jedoch weniger dicht. Zum Teil reichen cholinesterasepositive Fasern bis in die Muskulatur hinein. Im übrigen hat sich gegenüber dem Befund 12 Monate nach Replantation nichts Wesentliches geändert.

#### Zusammenfassung der histologischen Befunde:

Die Reinnervation der zentralen Gefäße ist verglichen mit der Reinnervation des zentralen Nerven verzögert. Die auswachsenden Fasern des Gefäßplexus verlaufen in einer gewissen Distanz zum Gefäß, daher werden sie auch nicht in die Schwannschen Zellen des alten Plexus inkorporiert.

Der neu gebildete Gefäßplexus ist weniger dicht als der von Kontrolltieren. In verschiedenen Teilen des replantierten Ohres ist die Reinnervation des Gefäßsystems noch 14 Monate nach Replantation mangel- bzw. lückenhaft.

#### Abb. 5. 3 Wochen nach Replantation der Kaninchenohrmuschel.

A – Cauna-Silberimprägnation. Basales Ohrmuscheldrittel. Axondegeneration im zentralen Nerv. Vergrößerung 200/1.

B – Sudan-Schwarz-B-Färbung. Basales Ohrmuscheldrittel. Zentraler Nerv – Myelindegeneration. Vergrößerung 200/1.

C – Cauna-Silberimprägnation. Mittleres Ohrmuscheldrittel. Inkomplette Axondegeneration im zentralen Nerv. Vergrößerung 200/1.

D – Sudan-Schwarz-B-Färbung. Mittleres Ohrmuscheldrittel. Inkomplette Regeneration im zentralen Nerv. Vergrößerung 200/1.

E – Spez. Cholinesterase. Basales Ohrmuscheldrittel. Reste cholinesterasepositiver Fasern an der zentralen Arterie. Vergrößerung 125/1.

F – Glyoxylsäure-Fluoreszenzmethode. Basales Ohrmuscheldrittel. Aggregation von noradrenergem Fluoreszenzmaterial am Gefäßnervenplexus. Vergrößerung 200/1.

G – Spez. Cholinesterase. Distales Ohrmuscheldrittel, lateraler Anteil. Inkomplette Degeneration des adventitiellen Plexus einer kleinen Arterie. Vergrößerung 125/1.

H – Cauna-Silberimprägnation. Distales Ohrmuscheldrittel. Noch unveränderte kleine Nervenfasern. Vergrößerung 300/1.

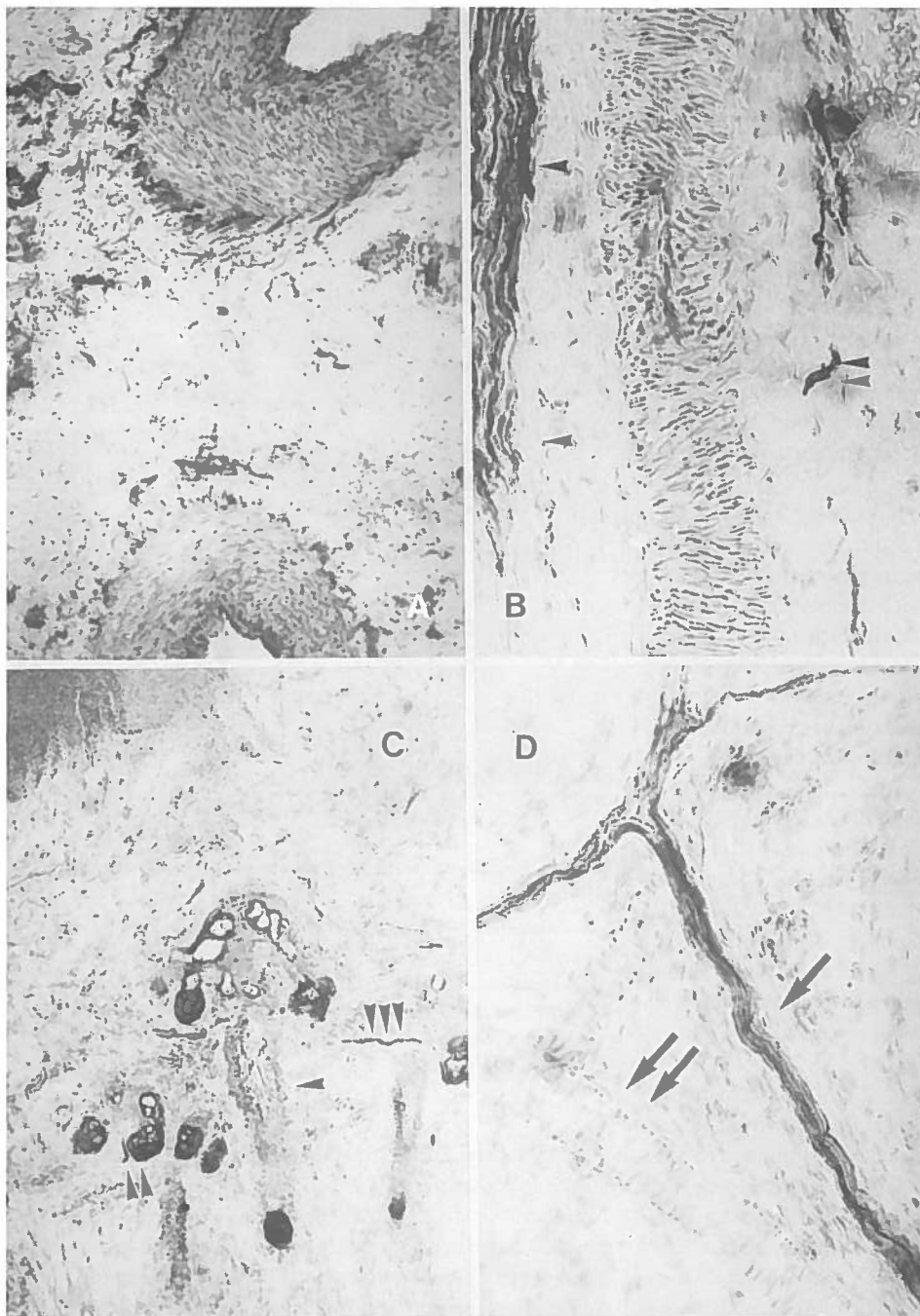


Abb. 8. Kaninchenohrmuschel  
14 Monate nach Replantation,  
spez. Cholinesterase.

A – Komplette Reinnervation  
der zentralen Ohrarterie im pro-  
ximalen Drittel der Ohrmuschel.  
Vergrößerung 240/1.

B – Mittleres Ohrdrittel – zen-  
trale Arterie ohne adventitiellen  
Plexus, kleine Nervenfaser-  
n begleiten die Arterie (↑↑), re-  
generierter zentraler Nerv (↑).  
Vergrößerung 240/1.

C – Distales Ohrdrittel – inzi-  
pierte Reinnervation der Haut  
und ihrer Hautanhangsgebilde –  
Haare (↑), Drüsen (↑↑), kleine  
Nervenfaser- n (↑↑↑). Vergröße-  
rung 120/1.

D – Distales Ohrdrittel – in-  
komplette Regeneration eines  
kleinen Nerven (↑) bei völligem  
Fehlen der Regeneration des Ple-  
xus einer kleinen Arterie (↑↑).  
Vergrößerung 240/1.

Streck- und Beugeschnenapparates. Danach werden die Gefäße und Nerven versorgt. Die Haut wird meist nur locker adaptiert und bei Bedarf ein Spalthauttransplantat zur Deckung der Wunde aufgebracht.

Dieses einfache Vorgehen kann allerdings fast nur bei glatten Abtrennungen wie Hackverletzungen angewendet werden.

In den meisten anderen Fällen muß sowohl proximal wie distal der Amputationsstelle das geschädigte Gewebe, vor allem die Gefäße, reseziert werden. Spannungslose Gefäß- und Nerven Anastomosen können dann nur durch Knochenkürzung oder bei allzu langstreckiger Schädigung oder bei gelenknahen Abtrennungen durch Venen- und Nerven- transplantationen erreicht werden.

Ebenso wie an den peripheren Bezirken des Gefäßsystems (arteriovenöse Anastomosen) ist fallweise eine lückenhafte Reinnervation an den Hautanhangsgebilden (Abb. 9) auch in späteren Stadien nach Replantation vorhanden.

#### 4. Klinische Untersuchungen

36 Patienten aus dem Replantationskrankengut der I. Chirurgischen Universitätsklinik Wien wurden nachuntersucht.

Dabei handelt es sich um 33 Patienten mit Fingeramputationen und 3 Patienten, die proximal des Handgelenkes eine Amputation erlitten (2 Unterarme, 1 Oberarm).

Das Ziel der Untersuchung war, einen möglichen Zusammenhang zwischen Kältetoleranz, Sensibilität und Durchblutung aufzuzeigen.

Bei der Auswahl der Patienten wurde darauf geachtet, daß die Replantation mindestens ein Jahr zurücklag, daß alle Altersgruppen und Verletzungsmechanismen sowie verschieden lange Intervalle nach Replantation berücksichtigt wurden. Es handelte sich um 21 total und 15 subtotal amputierte Teile. Unter subtotal amputierten Teilen versteht man jene, die nur durch eine sehr schmale Gewebsbrücke mit der übrigen Extremität verbunden sind und keine Zeichen einer Durchblutung aufweisen.

Beiden Gruppen gemeinsam ist also, daß sie ohne Rekonstruktion der Gefäße keine Überlebenschancen haben. Aus dieser Nachuntersuchung wurden jene Fälle ausgeschlossen, die am verletzten Finger noch eine, wenn auch geringe Basisdurchblutung zeigten.

In der Gruppe der 23 Patienten mit Mikroreplantationen befinden sich 10 Patienten, bei denen beim Primäreingriff die Nerven nicht rekonstruiert werden konnten. Dabei handelt es sich um 4 Ausriß- und 5 Kreissägenverletzungen.

Die Beurteilung des Ausmaßes der Nervenschädigung war so schwierig, daß man in allen Fällen gezwungen war, die Nervenrekonstruktion auf einen Zweiteingriff zu verschieben. Bei Patient 10 dieser Gruppe handelte es sich um einen 66jährigen Mann mit einer inkompletten Daumenamputation in Höhe des ersten Metakarpalknochens; bei ihm war aus Altersgründen die Operationszeit so kurz wie möglich zu halten und die Sehnen- und Nervenrekonstruktion auf einen Zweiteingriff zu verschieben.

Für unsere Nachuntersuchung war diese Gruppe der nicht nervenrekonstruierten Replantate deshalb von besonderem Interesse, da es um die Frage ging, ob sensible Qualitäten wie Schmerz und Temperatur ohne Nervenrekonstruktion ausreichend wiederkehren können und ob und in welchem Ausmaß diese Patienten bei kalter Witterung Beschwerden angeben.

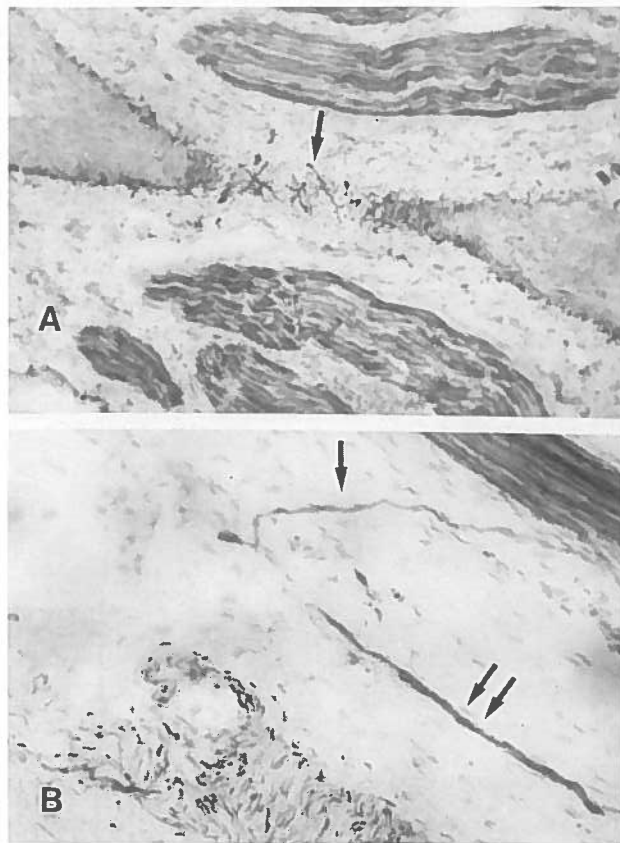


Abb. 7. Kaninchenohrmuskel – 8 Monate nach Replantation: spez. Cholinesterase.

A – Mittleres Ohrmuscheldrittel – zentrale Arterie mit inzipienter Innervation (↑) und regeneriertem zentralem Nerv. Vergrößerung 125/1.

B – Distales Ohrmuscheldrittel – ein kleiner Nerv zieht parallel zur Arterie, ohne Berührung mit dieser aufzunehmen (↑↑). Regenerierte auswachsende marklose Nervenfaser. Vergrößerung 125/1.

4 Patienten (über 55 Jahre) mit Daumenreplantation sind mit ihrem jetzigen Zustand zufrieden, so daß sie eine Nervenrekonstruktion abgelehnt haben, 3 Patienten mußten aus beruflichen Gründen die Zweitoperation immer wieder verschieben, sind aber noch zur Operation vorgezogen. Bei einem Patienten sind die Durchblutungsverhältnisse am replantierten Zeigefinger so grenzwertig schlecht, daß wir uns noch nicht zur Zweitoperation entschließen konnten. 2 Patientinnen mit Daumenreplantation sind voll freiberuflich tätig und konnten sich zu einem Zweiteingriff nicht entschließen.

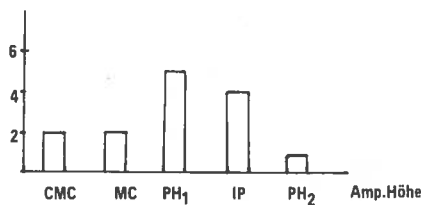
Bei jeder Replantation versuchen wir primär soviel wie möglich zu rekonstruieren, wobei zuerst der Knochen stabilisiert wird, gefolgt von der Rekonstruktion des

Tab. 6. Amputationshöhe und Anzahl der nachuntersuchten, replantierten Daumen und Langfinger.

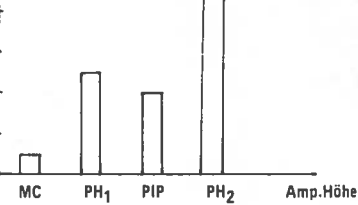
DAUMEN ( n = 14 )

LANGFINGER ( n = 19 )

Anzahl d. Daumen



Anzahl der Langfinger



sucht, eine Kongruenz mit dem Veneninterponat herzustellen.

Als Entnahmestelle der Veneninterponate bevorzugten wir die Beugeseite des distalen Unterarmdrittels, für lange Veneninterponate den Fußrücken.

Nervenrekonstruktion: Die Nerven wurden bei 18 Fingern durch direkte Naht wiederhergestellt, bei 4 Fingern durch primäre Nerventransplantation. 11 Finger wurden zur sekundären Kontinuitätswiederherstellung der Nerven vorgesehen, die bei einem Finger durch 2 Nerventransplantate erfolgte. Bei den restlichen Fingern wurde die sekundäre Nervenrekonstruktion aus oben angegebenen Gründen nicht oder noch nicht vorgenommen.

#### 4.1.3. Methoden der Nachuntersuchung

Folgende Untersuchungen wurden an den replantierten Fingern durchgeführt, wobei zu Vergleichszwecken immer der kontralaterale Finger herangezogen wurde.

4.1.3.1. *Klinische Beurteilung* der Trophik, der Temperatur, Nagelwachstum und Rillenbildung, Papillenhöhe und Zeichnung.

4.1.3.2. *Sensibilität*: Schmerz und Berührung, Kalt-Warm nach *Thissen*, Weber-2-Punkte-Diskriminierung mit dem Greulich-Stern, Auflesetest nach *Moberg*

Seit den Arbeiten von *Moberg* wird bei Nervenregeneration der Beurteilung der funktionellen Sensibilität wesentlich mehr Augenmerk geschenkt.

„Die Rückkehr der protektiven sensiblen Qualitäten wie Schmerz und Temperaturunterscheidung wird bei der modernen Nerven Chirurgie als selbstverständlich angenommen und ist für die gesamte Handfunktion nur mehr von akademischem Interesse“ (*Dellon*). Dasselbe gilt für die Prüfung der sudomotorischen Funktion, die nach *Onne* in allen Fällen wiederkommt.

Die für die sensiblen Qualitäten Schmerz und Temperatur verantwortlichen Fasern werden den A-Delta-Fasern zugezählt.

Sie und die dem vegetativen Nervensystem angehörenden C-Fasern, die für die Schweißsekretion und Gefäßreaktion verantwortlich sind, regenerieren auf Grund ihres geringen Faserdurchmessers rascher als die dickeren A-Alpha- und A-Beta-Fasern.

Da wir uns die Frage gestellt haben, ob nach der Replantation eine den unverletzten Fingern entsprechende Schmerz- und Temperaturempfindung sowie eine ausreichende Temperaturregulation und Schweißsekretion wieder eintritt, haben wir uns besonders mit der Regeneration der A-Delta- und der C-Fasern beschäftigt. Wir haben daher auch besonderes Augenmerk auf die Rückkehr der protektiven Sensibilität gelegt.

4.1.3.3. *Motorik* – aktive und passive Beweglichkeit nach dem Bewertungsschema der Handfunktion von *Millesi*

Für die Frage nach der Ursache der Kälteintoleranz spielt die motorische Funktion sowie der Auflesetest keine Rolle. Beide werden andernorts im Detail beschrieben.

4.1.3.4. *Durchblutungsmessungen*

Der Doppler-Flowmeter wurde zur Ortung der offenen Arterien herangezogen.

Die Registrierung des Volumenpulses erfolgte mittels Rheographie (*Kaindl et al., 1979*). Es wurde der prozentuelle Anteil des RQ des replantierten vom kontralateralen Finger berechnet.

4.1.3.5. *Prüfung der Schweißsekretion mit dem Mobergschen Schweißtest*

4.1.3.6. *Untersuchung der Kältetoleranz*

Bei Befragung der Patienten nach Beschwerden, Gebrauchsfähigkeit im Beruf, Integration im täglichen Leben, fiel auf, daß kalte Witterung am replantierten Finger als unangenehm, zum Teil als schmerzhaft empfunden wird.

Es wurde versucht, die von den Patienten angegebenen Beschwerden unter dem Begriff der *Kältetoleranz* in ein



Abb. 9. 5 Monate nach Kaninchenohrmuschelreplantation (PE aus dem distalen Ohrdrittel). Inkomplett reinnervierte ( $\uparrow$ ) Haarzwiebel. Spez. Cholinesterase, Vergrößerung 200/1.

Die Bedeutung des autologen Veneninterponates in der Replantationschirurgie wurde von uns andernorts ausführlich hervorgehoben (Piza, 1979).

Da es bisher trotz experimenteller Bemühungen noch nicht gelungen ist, synthetische Mikrogefäßprothesen in die Klinik einzuführen, gelten die am ganzen Körper zur Verfügung stehenden autologen Venen nach wie vor als ideales Überbrückungsmaterial zur Wiederherstellung von Mikrogefäßen. Wir konnten zeigen, daß bei Ausrißverletzungen Veneninterponate bis zu einer Länge von 10 cm erfolgreich angewendet wurden.

#### 4.1. Untersuchungen an Mikroreplantaten

##### 4.1.1. Krankengut

Alter: Das Alter der Patienten reicht von 2 bis 66 Jahren (mittleres Alter von 27 Jahren). Alters- und Geschlechtsverteilung sind in Tabelle 5 angegeben.

Geschlecht: 29 männliche stehen 4 weiblichen Patienten gegenüber.

Amputierte Finger: bei den 33 nachuntersuchten Fingern handelt es sich um 14 Daumen, 13 Zeigefinger, 4 Mittelfinger und 2 Ringfinger.

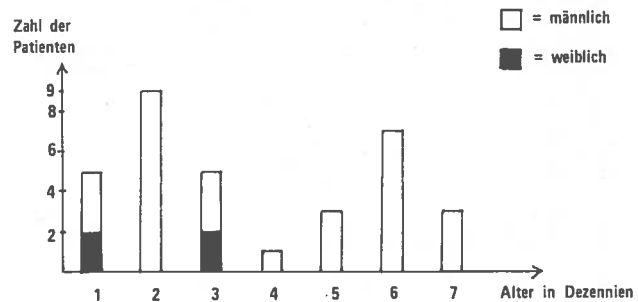
Bei 14 inkomplett amputierten Fingern bestand eine nur wenige Millimeter breite Hautbrücke (Typ 5 nach Biemer), ein Daumen hing an der langen Daumenbeugesehne (Typ 2 nach Biemer).

16 Patienten hatten neben der Amputation des nachuntersuchten Fingers zusätzliche Verletzungen an einem oder mehreren Fingern der betroffenen Hand.

Amputationshöhe: Die Amputationshöhe an Daumen und Langfingern ist aus Tabelle 6 zu ersehen.

Verletzungsmechanismus: 6 Hackverletzungen (18%), 17 Abtrennungen mit Kreissäge und landwirtschaftlichen Maschinen (52%) und 10 Ausrißverletzungen (30%).

Tab. 5. Anzahl der nachuntersuchten Patienten ( $n = 33$ ) mit Fingerreplantationen nach Geschlecht und Alter aufgeschlüsselt.



Nachuntersuchung in Jahren nach der Replantation: Der Mindestabstand von der Replantation betrug 1 Jahr, der größte zwischen 6. und 7. Jahr, im Mittel 3 Jahre (4 Patienten zwischen 1. und 2. Jahr, 7 zwischen 2. und 3. Jahr, 5 zwischen 3. und 4. Jahr, 8 zwischen 4. und 5. Jahr, 4 zwischen 5. und 6. Jahr und 5 zwischen 6. und 7. Jahr).

##### 4.1.2. Bei der Replantation verwendete Operationstechnik

Nach Entfernung geschädigten Gewebes wurde mit der Darstellung der Gefäße und Nerven sowie Sehnen begonnen.

Die Stabilisierung des Knochens erfolgte bei den nachuntersuchten Fingern in 24 Fällen durch einen oder mehrere Kirschner-Drähte, bei 5 Daumen durch eine Osteosynthese mit Platten oder Schrauben und bei 4 Langfingern konnte der Knochen mit Periostnähten stabilisiert werden. Letztere Methode wenden wir ausschließlich bei Kindern an, um nicht durch Traumatisierung der Epiphyse das Wachstum zu stören.

Nach Stabilisierung der Fraktur wurden die Sehnen versorgt, sofern sie nicht ausgerissen oder zu schwer traumatisiert waren.

Gefäßanastomosen: Bei 25 Fingern wurden die Arterien durch direkte Anastomose, bei 6 Fingern nur durch Verwendung von Veneninterponaten rekonstruiert. Bei 2 Fingern wurden für die Wiederherstellung von Arterien sowohl Veneninterponate als auch direkte Anastomosen durchgeführt.

Die Venen konnten bei 22 Fingern durch direkte Naht, bei 6 durch Veneninterponate und bei 4 Fingern sowohl durch Veneninterponate als auch direkte Naht vereinigt werden.

Bei einem Daumen (Phalange 2) wurde keine Vene rekonstruiert.

Die meisten Veneninterponate wurden end-zu-end eingenaht. Bei langen Veneninterponaten wurden Seitenäste des Interponates für die distale Anastomose verwendet oder durch Erweiterung des distalen Arterienendes ver-

Unter pathologischer Kalt-Warmempfindung verstehen wir eine verzögerte, raschere, stärkere oder schwächere Empfindung als an den Kontrollfingern. In der Gruppe der Replantate ohne Nervenwiederherstellung (N = 10) war ein Patient, der am Replantat eine den übrigen Fingern entsprechende Kalt-Warmempfindung angab (komplette Amputation im IP-Gelenk des Daumens).

Eine Patientin hatte eine normale Kalt- bei pathologischer Warmempfindung (komplette Amputation des Daumens), 2 normale Warm- bei pathologischer Kaltempfindung (ein inkomplett amputierter und ein komplett ausgeprägter Daumen). 3 Patienten hatten sowohl bei Kalt- als auch Warmprüfung eine veränderte Empfindung am Replantat (2 inkomplett und ein komplett amputierter Finger). 3 Patienten dieser Gruppe konnten am Replantat weder warm noch kalt empfinden (3 komplett amputierte Finger, davon eine Ausriß- und 2 schwere Kreissägenverletzungen).

2-Punkte-Diskriminierung (2PD) mit dem Greulich-Stern: Nach dem Vorschlag der Amerikanischen Gesellschaft für Handchirurgie haben wir die 2PD in 4 Gruppen eingeteilt: 2 bis 6 mm (normal), 7 bis 10 mm, 11 bis 15 mm und größer als 15 mm und keine 2PD.

Da über 15 mm eine 2PD funktionell unbrauchbar erscheint, haben wir diese Gruppe und die ohne 2PD zusammengefaßt. Es wurden die radialen und ulnaren Fingerseiten getrennt untersucht und beurteilt.

In der nervenrekonstruierten Gruppe (N = 23) ist bei 9 Fingern sowohl radial wie ulnar eine 2PD zwischen 2 und 6 mm, eine 2PD von 7 bis 10 mm an der radialen Seite bei 3 Fingern, an der ulnaren Seite bei 6 Fingern festzustellen. Eine 2PD von 11 bis 15 mm haben an der radialen Seite 6, an der ulnaren Seite 3 Finger.

2 Patienten haben eine 2PD über 15 mm, 3 keine 2PD. Von diesen 3 Patienten haben jedoch 2 eine Temperatur-

und Schmerz-, und ein Patient eine Temperaturempfindung.

Die Verteilung der 2PD in den beiden Gruppen komplett und inkomplett amputiert ist aus Tabelle 7 ersichtlich und zeigt keinen Unterschied zwischen beiden Gruppen.

In der Gruppe der nicht nervenrekonstruierten Replantate war lediglich bei einem inkomplett amputierten Daumen (Typ 5) mit einer 4 mm dorsoulnaren Hautbrücke eine 2PD von 12 mm festzustellen. Es müßte sich in diesem Fall praktisch um eine Sprossung handeln.

#### 4.1.4.3. Durchblutung

Zur Beurteilung der Durchblutung wurde der Volumepuls, gemessen mit der Rheographie, herangezogen. Zur Beurteilung der Amplitude hat Jantsch den rheographischen Quotienten eingeführt. Der RQ liefert die Pulsation in Promille des Volumens des Meßbereiches.

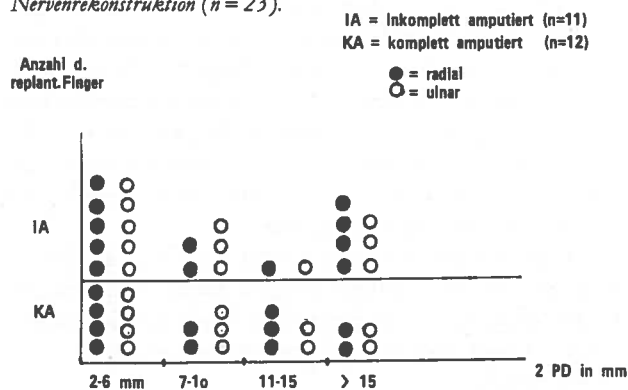
Es wurde der replantierte und kontralaterale gesunde Finger gemessen und der Quotient beider Werte berechnet. Der niedrigste Wert war 35% der Durchblutung der replantierten vom gesunden Kontrollfinger. Der höchste Wert war 100%.

Im Mittel lag das Pulsvolumen des replantierten Fingers bei 77% vom kontralateralen Finger. 4 Patienten hatten am replantierten Finger weniger als 65% des RQ vom kontralateralen Finger (Tab. 8).

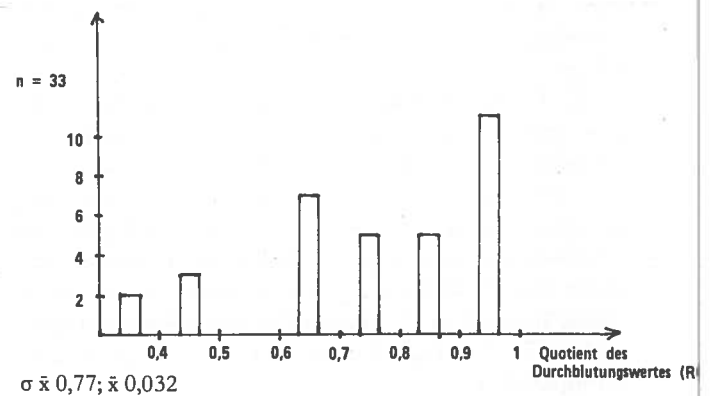
#### 4.1.4.4. Schweißsekretion (Tab. 9)

Die Prüfung erfolgte mit dem Ninhydrintest nach Moberg. Es wurde ein Fingerabdruck sowohl des replantierten als auch des kontralateralen Fingers angefertigt. 5 der Tests waren nicht beurteilbar, da an beiden Fingern keine Schweißproduktion feststellbar war. Ein Patient hatte am Replantat keine Schweißsekretion gegenüber dem Kon-

Tab. 7. 2-Punkte-Diskriminierung (mm) bei replantierten Fingern mit Nervenrekonstruktion (n = 23).



Tab. 8 Verteilung des Quotienten des Durchblutungswertes (RQ) des replantierten/gesunden Fingers (n = 33).



Schema einzuordnen, wobei der Patient, der die Kälte am replantierten Finger optimal toleriert, die höchste Nummer (Nr. 4) erhält.

Kältetoleranz 4 (CT 4): Bei Kälte verhält sich der replantierte Finger hinsichtlich Farbe, Temperatur, Kältegefühl und Wiedererwärmungszeit gleich wie die übrigen Finger und verursacht dem Patienten keinerlei Beschwerden.

CT 3: Der replantierte Finger ist bei kalter Witterung kühler als die übrigen, die Wiedererwärmungszeit ist verlängert, der Patient empfindet dies als unangenehm, aber nicht störend.

CT 2: Der Finger ist kühl, blau, die Wiedererwärmungszeit beträchtlich verlängert, zeitweilig treten Schmerzen auf.

CT 1: Bei Kälte extremes Kältegefühl mit Schmerzen, so daß ohne Handschuhe keine Außenarbeiten oder Sport möglich sind. Sehr verlängerte Wiedererwärmungszeit.

CT 0: Der replantierte Finger ist in kalter Jahreszeit sehr kalt, blau, mit einer sehr verlängerten Wiedererwärmungszeit. Gleichzeitig besteht keine oder nur mäßig ausgebildete protektive Sensibilität, so daß deshalb Erfrierungen auftreten können.

#### 4.1.4. Ergebnisse der Nachuntersuchung

##### 4.1.4.1. Klinische Untersuchung

In 15 Fällen war der replantierte Finger gegenüber dem kontralateralen Finger schmaler. Es waren dies 6 inkomplett amputierte Finger, 4 mit und 2 ohne Nervenrekonstruktion, sowie 9 komplett amputierte Finger, 5 mit und 4 ohne Nervenwiederherstellung.

16 Replantate hatten eine kühlere Hauttemperatur als der Vergleichsfinger, 14 dieser kühleren Finger sind auch schmaler, 2 weitere Finger mit kühlerer Temperatur zeigen keine Verschmälerung gegenüber dem Kontrollfinger.

1 Finger wies gegenüber dem Vergleichsfinger eine erhöhte Hauttemperatur auf (inkomplett amputiert mit Nervenrekonstruktion und 98% des RQ vom kontralateralen Finger).

Die Papillenzeichnung und -höhe war nur bei 12 Replantaten gleich wie am Kontrollfinger. Es waren dies ausschließlich nervenrekonstruierte Replantate, 3 davon waren inkomplett, 9 komplett amputiert. Bei den nicht nervenrekonstruierten Fingern zeigten 6 flachere Papillen mit verwaschener Zeichnung, während an 4 Teilen kaum mehr eine Papillenzeichnung vorhanden war. Rillen am Nagel konnten an 19 Replantaten nachgewiesen werden, wobei alle 10 nicht nervenrekonstruierten Finger in diese Gruppe fallen.

Ein Patient gab ein rascheres Nagelwachstum am replantierten Finger gegenüber den anderen Fingern an. Es war jener Patient, der am Replantat auch eine erhöhte Hauttemperatur aufwies.

Trophische Störungen am Replantat mit papierdünnere Haut und leichter Vulnerabilität wurde bei einem Patienten festgestellt. Bei ihm konnte man mit dem Doppler-Flowmeter keine offene Fingerarterie finden. Der RQ war mit 0,25 hoch pathologisch herabgesetzt.

##### 4.1.4.2. Sensibilität

Schmerzempfindung: Die Schmerzempfindung wurde durch Kneifen in die Fingerkuppe geprüft.

In der Gruppe der nervenrekonstruierten Replantate gaben 16 Patienten eine den übrigen Fingern entsprechende Schmerzempfindung an (8 Finger waren komplett und 8 inkomplett amputiert). 6 Patienten empfanden den Schmerz am replantierten Finger anders, abgeschwächt oder stärker als an den unverletzten Fingern (3 waren komplett und 3 inkomplett amputiert). 1 Patient gab am replantierten Daumen keine Schmerzempfindung an. Dabei handelt es sich um einen bei einer Kreissägenverletzung inkomplett amputierten Daumen mit einem durch ein 3 cm langes Nervenrekonstruktat vom N. suralis sekundär wiederhergestellten ulnaren Fingernerven. Dieser Patient gab bei der Temperaturprüfung nach *Thissen* eine normale Warm-, jedoch eine pathologische Kalt-Empfindung an. 2 Punkte konnten nicht voneinander unterschieden werden.

In der Gruppe der nicht nervenrekonstruierten Replantate gaben 2 Patientinnen eine den anderen Fingern entsprechende Schmerzempfindung (2 komplett amputierte Daumen), 6 eine pathologische (3 komplett und 3 inkomplett amputierte Finger) und 2 keine Schmerzempfindung an (2 komplett amputierte Daumen).

Temperaturempfindung: Bei der Kalt-Warm-Prüfung nach *Thissen* war in der Gruppe der nervenrekonstruierten Fälle (N = 23) an 9 replantierten Fingern eine den übrigen Fingern entsprechende Empfindung vorhanden (6 komplett und 3 inkomplett amputierte Finger), 6 Patienten gaben eine normale Warm- bei veränderter Kaltempfindung an (4 inkomplette und 2 komplette Amputationen). 2 Patienten hatten am Replantat eine den übrigen Fingern entsprechende Kalt- bei pathologischer Warmempfindung (beide waren inkomplett amputiert).

6 Patienten gaben sowohl bei der Kalt- als auch Warmprüfung eine den übrigen Fingern nicht entsprechende Empfindung an (3 inkomplett und 3 komplett amputierte Finger). Dabei empfanden 2 dieser Patienten kalt als warm und umgekehrt.

#### 4.1.5.1. Statistische Auswertung

Sensibilität: Es wurde versucht, zwischen den sensiblen Qualitäten (Schmerz-, Temperaturempfindung, 2PD) und dem Alter der Patienten, der Art der Verletzung, den Jahren nach Replantation, der Kältetoleranz und der Durchblutung einen Zusammenhang herzustellen.

Alter: Je jünger die Patienten sind, um so eher haben sie eine normale Schmerzempfindung ( $p = 0,0022$ ) und eine gute 2PD (2PDr  $p = 0,0019$ , 2PDu  $p = 0,0043$ ). Keine Korrelation besteht zwischen Alter und Warmempfindung, statistisch stark auffällig ist der Zusammenhang zwischen normaler Kälteempfindung und jüngeren Patienten ( $p = 0,0510$ ).

Kältetoleranz: Je besser die Kälte toleriert wird, um so eher ist die Schmerzempfindung normal ( $p = 0,0001$ ), die Kälteempfindung ( $p = 0,0003$ ), die Wärmeempfindung ( $p = 0,0357$ ) den übrigen Fingern gleich.

Je niedriger die 2PD, um so besser ist die Kältetoleranz (2PDr  $p = 0,0010$ , 2PDu  $p = 0,0103$ ).

Durchblutung: Je höher die Durchblutung im replantierten Finger, um so besser ist die 2PD (2PDr  $p = 0,0084$ , 2PDu  $p = 0,0072$ ).

Eine Korrelation besteht auch zwischen guter Durchblutung und normalem Schmerzgefühl ( $p = 0,0128$ ).

Kein Zusammenhang besteht zwischen Durchblutung und Kalt-Warmempfindung. Ebenfalls kein Zusammenhang konnte zwischen Art der Verletzung mit der Rückkehr der sensiblen Qualitäten gefunden werden. Es muß jedoch hervorgehoben werden, daß die Patienten erst frühestens 1 Jahr nach Replantation nachuntersucht wurden.

#### 4.1.5.2. Durchblutung

Alter: Je älter die Patienten, um so schlechter ist die Durchblutung im replantierten Finger ( $p = 0,0072$ ).

Kältetoleranz: Der Zusammenhang zwischen guter Durchblutung und guter Kältetoleranz ist statistisch nicht gesichert, aber auffällig ( $p = 0,0742$ ). Wahrscheinlich ist die Sicherung des Zusammenhanges bei größerer Stichprobenanzahl möglich.

Sensibilität: Die Korrelation zwischen Sensibilität und Durchblutung siehe oben.

Jahre nach Replantation: Auch hier besteht eine statistisch auffällige Korrelation ( $p = 0,0642$ ). Je länger die Replantation zurückliegt, um so schlechter ist die Durchblutung. Vielleicht kann diese Tatsache mit der Verbesserung der Gefäßanastomosetechnik im Laufe der Jahre erklärt werden.

Art der Verletzung: Es besteht kein Zusammenhang zwischen Art der Verletzung und der Durchblutung.

#### 4.1.5.3. Kältetoleranz

Alter: Je älter die Patienten sind, um so schlechter können sie die Kälte tolerieren ( $p = 0,0274$ ).

Sensibilität: siehe 4.1.5.1.

Durchblutung: siehe 4.1.5.2.

Art der Verletzung und Jahre nach Replantation: Für beide besteht kein Zusammenhang mit der Kältetoleranz.

#### 4.2. Untersuchungen an Makroreplantaten

Fall 1: 9jähriger Schüler, durch Mistaufbereitungsmaschine kam es zum Ausriß des linken Oberarmes am Übergang vom proximalen ins mittlere Drittel, zusätzlich zu einer Schlüsselbein- und Schulterblattfraktur.

Operation: Nach Perfusion der abgetrennten Extremität mit Collins-Lösung Kürzung des Knochens um insgesamt 6 cm, Stabilisierung des Humerus mittels Platte, End-zu-End-Anastomose der A. und V. brachialis, Naht der Muskulatur. Die Nerven (N. medianus, N. radialis und N. ulnaris), die am Unterarm ausgerissen sind, werden exakt adaptiert. Die Haut und Faszie des Unterarmes und das Retinaculum flexorum werden gespalten.

Die Dauer der gesamten Ischämiezeit beträgt 6 Stunden.

Sekundäreingriffe: Lappenplastik an der Replantationsstelle zur Vermeidung der strangulierenden zirkulären Narbe, Raffung der Strecksehnen am Handgelenk.

Kontrolluntersuchung 5 Jahre nach Replantation (über die gute motorische Funktion und den Auflesetest soll andernorts berichtet werden):

Trophik: Die Hauttemperatur ist gegenüber der rechten Hand etwas herabgesetzt, mehr im Hypothenar- als im Thenarbereich.

Fingernägel: Sie zeigen geringe Rillen, wachsen nach Angabe des Patienten jedoch gleich schnell wie die der anderen Hand.

Papillen: Etwas abgeflacht, Haut trocken.

Sensibilität: Schmerz und Berührung gleich wie rechts.

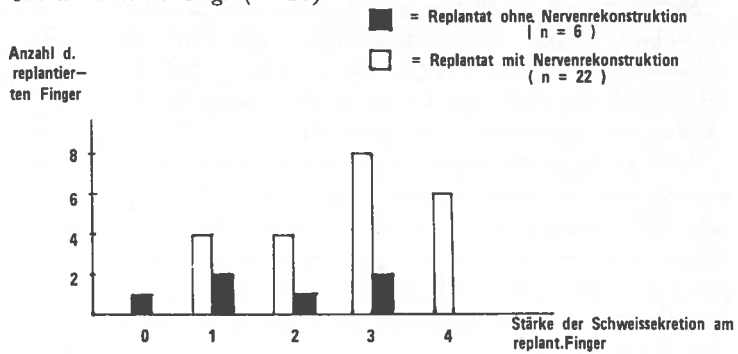
Temperaturempfindung: Am 4. und 5. Finger verzögerte Warmempfindung, sonst prompte und gleich intensive Kalt-Warmempfindung wie rechts.

2PD: radial	ulnar
1. Finger - 6 mm	6 mm
2. Finger - 4 mm	4 mm
3. Finger - 4 mm	4 mm
4. Finger - 4 mm	6 mm
5. Finger - 8 mm	10 mm

Durchblutung: Kein Unterschied zur rechten oberen Extremität.

Schweißtest nach *Moberg*: Nur einige wenige Punkte an allen Fingern der linken Hand.

Tab. 9. Schweißsekretion (Moberg) an replantierten Fingern in Vergleich zum kontralateralen Finger (n = 28).



Stärke der Schweißsekretion:

- 0 = keine Schweißsekretion am replantierten gegenüber dem kontralateralen Finger,
- 1 = vereinzelte Schweißpunkte am replantierten Finger,
- 2 = deutlich herabgesetzte Schweißsekretion gegenüber kontralateralem Finger,
- 3 = Schweißsekretion vorhanden, patzig, unregelmäßiges Bild,
- 4 = vom kontralateralen Finger kaum oder gar nicht zu unterscheiden.

trollfinger. 6 hatten gegenüber dem gesunden Finger am Replantat nur einige wenige Punkte im Abdruck.

Bei 5 weiteren Patienten war eine deutliche Verminderung der Schweißsekretion am replantierten Finger festzustellen. 10 Finger hatten eine patzige, unregelmäßige Schweißsekretion und nur bei 6 Patienten konnte zwischen gesundem und replantiertem Finger nicht unterschieden werden. Alle 6 Patienten gehörten in die Gruppe replantierter Finger mit Nervenrekonstruktion. 5 Patienten waren unter 6 Jahren und 1 Patient 44 Jahre. Bei ihm war die Amputationshöhe in der 2. Phalange des Daumens.

#### 4.1.5. Zusammenfassung und statistische Auswertung

Die Untersuchungsergebnisse der Durchblutung, der verschiedenen sensiblen Qualitäten, wie Schmerz, Temperaturempfindung und 2PD, wurden untereinander und mit anderen Variablen, wie Alter des Patienten zum Zeitpunkt der Replantation, Art der Verletzung, Zeit in Jahren nach der Replantation und Nervenrekonstruktion, in Abhängigkeit gebracht und statistisch von der Arbeitsgruppe für Biometrie (Dr. Schemper) der I. Chirurgischen Universitätsklinik Wien berechnet.

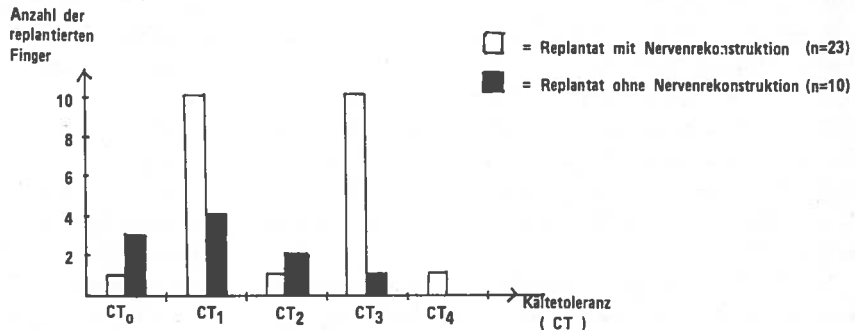
Für die Beschreibung der Stärke eines Zusammenhanges für 2 kontinuierliche Variable wurde Kendalls Tau (1962) herangezogen.

Hypothesen der Unabhängigkeit zweier Variabler wurden mit einem Test für Kendalls Tau überprüft. Sämtliche statistische Schlüsse sind den Problemen einer explorativen Analyse unterworfen. Es wurden keine Korrektur für multiple Testsituationen angebracht.

#### 4.1.4.5. Kältetoleranz

Die Verteilung der Kältetoleranz je nach Intensität zugeordnet den Replantaten mit und ohne Nervenrekonstruktion ist aus Tabelle 10 ersichtlich.

Tab. 10. Intensität der Kältetoleranz (CT<sub>0</sub> bis CT<sub>4</sub>) an replantierten Fingern mit und ohne Nervenrekonstruktion (Näheres siehe Text).



## 5. Diskussion

Die Ohrmuschelreplantation am Kaninchen stellt zur Übung der Mikrogefäßchirurgie ein beliebtes experimentelles Modell dar. Gelang es *Buncke* 1966 bei 40 Replantationsversuchen ein Ohr komplett zur Anheilung zu bringen, schlug *Leaf* 1970 zur Verbesserung der Anheilungsrate ein zweizeitiges Vorgehen vor und berichtete über 4 angeheilte von 12 operierten Ohren. Er begründete diese Verbesserung durch Anheben der Gewebstoleranz gegenüber subletaler Hypoxie und durch die Beschleunigung der Ausbildung lymphatiko-venöser Anastomosen.

In einer eigenen Versuchsserie (*Piza*, 1974) mit einzeitiger Operation wurde eine komplette Anheilung der Ohren bei 5 von 7 Tieren erzielt, so daß wir auf Grund unserer Erfahrung auch bei diesem Versuch beim einzeitigen Vorgehen blieben und nur den postoperativen Verband etwas modifizierten.

Von 30 replantierten Ohren heilten 25 komplett ein.

Das Kaninchenohr spielt ähnlich wie die peripheren Extremitäten beim Menschen in der Thermoregulation eine entscheidende Rolle, was sich im Reichtum von arterio-venösen Anastomosen ausdrückt (*Grant*). Diese arterio-venösen Anastomosen sind wie die übrigen Ohrgefäße von einem dichten Nervengeflecht umgeben.

Durch Reizung des Ganglion stellatum wies *Feldberg* die vasokonstriktorische Natur dieser Fasern nach. Spezifische vasodilatatorische Fasern dürften nicht vorhanden sein, so daß die Vasodilatation durch Nachlassen des Konstriktoronus erklärt wird.

Durch Sympathektomie und gleichzeitige Durchtrennung des N. auricularis magnus konnten *Grant* und *Thompson* 1963 keine vollständige Degeneration des Gefäßnervenplexus erzielen und versuchten, dies auf das mögliche Vorhandensein peripherer Ganglien zurückzuführen. Diese Annahme konnte bisher durch keine weitere Untersuchung bestätigt werden.

Um eine komplette Degeneration aller Fasern des vegetativen und afferenten Nervensystems zu erzielen, bedienten wir uns des Replantationsmodells. Nur so war es möglich, über den zeitlichen Ablauf sowie über das Ausmaß der De- und Regeneration der Nervenfasern beider Systeme einen Aufschluß zu bekommen.

Die vasomotorischen Reaktionen sind abhängig von der Innervation der Gefäße.

Da die Gefäßrekonstruktion bei einem Durchmesser von weniger als 1 mm und der zarten Wandbeschaffenheit oft technisch schwierig ist, kann trotz Anheilung des Ohres nichts über das Ausmaß der Durchblutung gesagt werden.

Wir mußten also vor Prüfung der Gefäßreaktion auf indirekte Reize, Aufschluß über die Ruhedurchblutung am replantierten Ohr im Vergleich zum gesunden erhalten.

Diese zeigte auf Grund der großen Anzahl von arterio-venösen Anastomosen bei der Xenon-133-Clearance sehr hohe Werte und keinerlei Unterschied zwischen gesundem und replantiertem Ohr.

Durch Erzeugung einer reaktiven Hyperämie und anschließender Durchblutungsmessung versuchten wir eventuell vorhandene Stenosen am rekonstruierten Gefäßsystem zu erfassen. Es fanden sich auch hier symmetrische Werte zwischen gesundem und replantiertem Ohr und somit kein Hinweis auf ein Strombahnhindernis.

Die Reaktionsfähigkeit der Gefäßwand auf direkte vasokonstriktorische Reize prüften wir mit Noradrenalin und erreichten ebenfalls eine symmetrische Antwort. Es kann somit angenommen werden, daß die Gefäßwandmuskulatur trotz der bei der Amputation entstandenen Ischämie weitgehend ihre Reaktionsfähigkeit auf direkte Reize beibehalten hat.

Nachdem also durch diese Durchblutungsmessung gezeigt werden konnte, daß replantierte und gesunde Ohren sowohl in Ruhe bei reaktiver Hyperämie und auf Noradrenalin symmetrisch reagierten, wurde mit der Prüfung der vasomotorischen Funktion der Ohrgefäße begonnen.

Den Versuchen von *Franck* (1876) und *Pickering* (1933) folgend, haben wir die reflektorischen Durchblutungsänderungen der Ohren durch Stammerwärmung und Abkühlung sowie die Wiedererwärmung geprüft. Bei der Durchblutungsmessung mit Xenon 133 erhielten wir bei indirekter Erwärmung von 10 Tieren keine signifikanten Unterschiede zwischen replantiertem und gesundem Ohr.

Da mit dieser Methode jedoch nur die spezifische Hautdurchblutung gemessen wird, d. h. die Durchblutung in einem sehr umschriebenen Areal, schien sie uns für die Beurteilung der gesamten Ohrdurchblutung ungeeignet zu sein.

Um über die globale Ohrdurchblutung eine Aussage treffen zu können, haben wir uns der Thermographie bedient.

Dabei zeigte sich, daß in Ruhe und nach Stammerwärmung das Temperaturmaximum nur gering ansteigt. Die Größe der maximalen Isotherme nimmt jedoch beträchtlich zu. Es wird also eine größere Masse des Ohres verstärkt durchblutet. Bei der indirekten Abkühlung nimmt die Größe der minimalen Isotherme beträchtlich zu. Der Unterschied zwischen replantiertem und gesundem Ohr war bei Stammerwärmung in der Gruppe 2 Monate nach Replantation signifikant. Dieser Unterschied konnte ein Jahr nach Ohrreplantation nicht mehr nachgewiesen werden.

**Kältetoleranz:** Im ersten Winter sehr starke Schmerzen, dauerndes Kältegefühl, Blauverfärbung.

Ab dem 2. Jahr deutliche Besserung; in der kalten Jahreszeit ist die Hand noch deutlich kühler als rechts, Wiedererwärmungszeit verlängert, für den Patienten jedoch nicht störend, wohl etwas unangenehm (CT 3).

Fall 2: 38jähriger Mann, durch Kreissäge Amputation des rechten Unterarmes im mittleren Drittel am Muskel-Sehnenübergang.

**Operation:** Nach Kürzung der beiden Unterarmknochen Osteosynthese mit zwei 6-Loch-Platten. Direkte spannungslose Anastomose der A. radialis und A. ulnaris; zur Rekonstruktion von 3 volaren Unterarmvenen Verwendung von bis zu 5 cm langen Veneninterponaten, dorsal werden 2 Venen durch direkte Anastomose wiederhergestellt. Direkte epineurale Naht der 3 Unterarmnerven.

Sehnen-Muskelanastomosen der Beuger und Strecker.

Fasziotomie bis in den Thenar und Deckung des Defektes durch Spalthaut.

Ischämiezeit: 4½ Stunden.

**Sekundäreingriffe:** Strecksehnenraffung der Langfinger. Wiederherstellung der langen Daumenstrecksehne durch Fascia-lata-Streifen.

**Kontrolluntersuchung 3 Jahre nach Replantation:**

**Trophik:** Hand-Hauttemperatur deutlich kühler als links, etwas bläulich.

**Nagel:** Rillen, am 2. Nagel Pilzbefall.

Papillen an den Fingerkuppen abgeflacht, Haut zart und glänzend, normales Haarwachstum, Haut trocken.

**Sensibilität:** Schmerz und Berührung gut, gleich wie links.

**Warm-Kaltempfindung:** sehr prompt, von gleicher Qualität wie links.

2PD: keine.

**Durchblutung:** 73,3% von links, bei offener A. ulnaris und A. radialis.

**Schweißtest nach Moberg:** An beiden Händen relativ wenig, sehr unregelmäßig.

**Kältetoleranz:** Bei Kälte bamstig und steif, ohne Handschuhe ausgeprägter Kälteschmerz, ab PIP-Gelenken sind Finger wie abgestorben. Wiedererwärmungszeit extrem verlängert.

Patient ist als Bauarbeiter berufstätig.

**Histologische Untersuchung:** Probeexzision aus der Haut des 3. Fingers rechts und einer dorsalen Vene vom selben Finger 2 Jahre nach Replantation (anlässlich der Strecksehnenrekonstruktion). Es besteht keine Atrophie der Haut, sie ist gleichmäßig verhornt, die Gefäße und Hautanhangsgebilde sind ohne Besonderheiten, keine zellige Infiltration der Subkutis. Die Vene ist in ihrem Aufbau ebenfalls unauffällig.

Die Reinnervation des afferenten Systems im Bereich der Haut erfolgt durch fein kalibrierte Nervenfasern, während stärkere Axone nur vereinzelt vorliegen. In der Subkutis fehlt die Gefäßinnervation und die Innervation der drüsigen Hautanhangsgebilde.

Die Vene ist minimal reinnerviert. Ganz vereinzelt sind der Venenwand einige dünne Nervenfasern zugeordnet, die jedoch keinen normalen Plexus bilden.

Fall 3: 21jähriger Patient, Ausriß des rechten Unterarmes schraubenförmig im mittleren und distalen Unterarmdrittel durch eine Förderschnecke.

**Operation:** Entfernung des Gewebes in einer breiten Quetschzone proximal und distal der Amputationslinie, Verplattung beider Unterarmknochen. Direkte Naht der A. radialis und ulnaris sowie von 3 dorsalen Venen. Der N. medianus und ulnaris werden adaptiert. Naht der Streck- und Beugesehnen.

**Zweiteingriff:** Lappenplastik, da es an der Dorsalseite des Unterarmes zu einer Haut- und Muskelnekrose kam.

Faszientransplantate zur Rekonstruktion der Strecksehnen.

**Kontrolluntersuchung 4 Jahre nach Replantation:**

**Trophik:** Haut dünn, kühler als links, etwas bläulich.

Papillen an den Fingerkuppen nicht sehr ausgeprägt, Haut feucht.

**Nägel:** Rillen, Nagelwachstum an der replantierten Hand rascher als links.

**Sensibilität:** Schmerz und Berührung gleich wie links, nur an der ulnaren Kante des 2. Fingers ruft leichte Berührung Kribbeln hervor.

**Temperatur:** An den Fingern der replantierten Hand wird Kalt und Warm prompter und von gleicher Intensität wie links empfunden.

2PD: radial	ulnar
1. Finger – 12 mm	12 mm
2. Finger – 12 mm	12 mm
2. Finger – 10 mm	10 mm
4. Finger – 10 mm	0
5. Finger – 0	0

**Durchblutung:** 68% der kontralateralen Seite.

In der A. radialis konnte durch die Doppler-Untersuchung eine Stromumkehr festgestellt werden.

**Kältetoleranz:** Patient muß bei kalter Witterung immer Handschuhe tragen, Hand wird bläulich und deutlich kälter als die linke Hand. Die Wiedererwärmungszeit ist sehr verlängert. Patient gibt jedoch an, daß der anfänglich sehr ausgeprägte Kälteschmerz besser geworden ist.

**Schweißtest nach Moberg:** Vermehrte Schweißsekretion an der replantierten Hand, zum Teil patzig und unregelmäßig.

Der Patient ist als Landwirt im eigenen Betrieb tätig.

Vielmehr ist der Temperatur- und Durchblutungsrückgang auf eine Tonuserhöhung zurückzuführen, deren Ursache bisher noch nicht geklärt werden konnte.

Unserer Erfahrung nach sinkt die erhöhte Hauttemperatur in den Replantaten nach Abtransport des Ödems und nach Abschluß der Wundheilung ab. In unserem nachuntersuchten Material war in 48% das Replantat kühler als die Nachbarfinger. Ruhedurchblutungswerte replantierter Finger erreichen in verschiedenen Nachuntersuchungen nur 70 bis 79% der Durchblutung des kontralateralen Fingers (*Gelbermann et al.*, *Meissl et al.*, *Sumner et al.*). Bei den 33 nachuntersuchten Fingern beträgt die mittlere Durchblutung 77% der kontralateralen Finger. *Ingerle et al.* konnten bei einer früheren Nachuntersuchung unseres Materials mit der Venenverschlußplethysmographie zusätzlich zeigen, daß die sonst sehr hohe Spontanvariation der Fingerdurchblutung bei Replantaten stark eingeschränkt ist.

Sensibilitätsprüfungen an replantierten Fingern zeigen unterschiedliche Beurteilungen der Ergebnisse. *Biemer* und *Duspiva* bezeichnen eine 2PD kleiner als 20 mm als gut und größer als 20 mm als schlecht. Sie konnten bei fast allen Patienten bei Amputationen in der Zone 3 nach 3 bis 4 Monaten eine Kalt-Warm- sowie eine Spitz-Stumpfuntercheidung feststellen. In der Nachuntersuchung von *Frey* wird bei 48% der 34 nachuntersuchten Patienten eine Sensibilität von  $S_4$  nach dem Schema von *Higbet* erreicht.

Die 2PD-Ergebnisse bei Replantation sind bei all diesen Nachuntersuchungen jedoch schlechter als bei Fingernervenrekonstruktionen nicht amputierter Finger (*Gelbermann*).

Bei Amputationen kommt es zusätzlich zur Denervierung noch die oft stundenlange Ischämiezeit dazu.

*Gelbermann* konnte in seiner Nachuntersuchung diesen Zusammenhang zwischen Ischämiezeit und Sensibilitätsrückkehr zeigen.

Der Grund dafür mag in der geringen Ischämietoleranz der Endkörperchen gesehen werden. „Trotz technisch einwandfreier Nervennaht stoßen dann die ausgewachsenen Axone auf die durch Denervierung und Ischämie geschädigten Endkörperchen“ (*Dellon*). Abgesehen von der Dauer der Ischämie vor Replantation spielt das Ausmaß der Durchblutung für die Sensibilitätsrückkehr im wiederangeheften Finger eine entscheidende Rolle.

Die gute Sensibilitätsrückkehr in Replantaten jüngerer Patienten wird von *Schlenker* besonders hervorgehoben. Auch in unserem Krankengut findet man einen Zusammenhang zwischen Rückkehr aller sensiblen Qualitäten und Alter. Die Tatsache, daß nach den Untersuchungen von *Ridley* bei Menschen unter 15 Jahren doppelt soviel

Tastkörperchen zu finden sind als bei Menschen über 40 Jahren, mag dabei eine entscheidende Rolle spielen.

Auch die Schweißdrüsen, die reichlich mit cholinergen Fasern versorgt sind, unterliegen bei Denervation reversiblen Veränderungen. Diese Degeneration betrifft vor allem die Ausführungsgänge und den sekretorischen Teil des Tubulus (*Silver*), während die Zellen selbst keine wesentlichen Veränderungen aufweisen. *Silver et al.* fanden ein Fehlen der spezifischen Cholinesterase in den Nerven rund um die Schweißdrüsen, einen Befund, den wir auch bei den Replantaten bestätigen können.

Wieweit jedoch auch hier das Zusammentreffen von Anoxie und Denervation die degenerativen Veränderungen beschleunigt, bleibt offen. Auffallend ist, daß „normale“ Schweißsekretionsbilder in unserem Material nur bei Kindern zu sehen sind. Diese weisen neben einer guten Rückkehr der übrigen sensiblen Qualitäten auch eine bessere Durchblutung im Replantat auf. Sie geben aber auch geringe Adaptionsstörungen gegen Temperaturänderungen an.

Bei jenen Fingern, bei denen keine Nervennaht ausgeführt wurde, kann in 5 Fällen ebenfalls eine sehr geringe Schweißproduktion nachgewiesen werden, was unserer Meinung nach nur durch aussprossende C-Fasern zu erklären ist.

Die mangelnde Kältetoleranz, eine von den Patienten mit replantierten Extremitäten am häufigsten geäußerte Beschwerde, stellt ein sehr komplexes Problem dar. Fanden *Schlenker et al.* eine signifikante Korrelation zwischen Kältetoleranz und Alter, keine zwischen Kältetoleranz und Sensibilität sowie Ischämiezeit und Amputationsmechanismus, konnte demgegenüber *Gelbermann* in seinem Material eine Korrelation zwischen Kältetoleranz und Sensibilität sowie Durchblutung nachweisen.

In unserer Nachuntersuchung konnten wir zeigen, daß das Ausmaß der Kälteintoleranz von mehreren Faktoren abhängt.

Wir fanden eine statistisch auffallende Korrelation ( $p = 0,0742$ ) zwischen schlechter Durchblutung und verminderter Kältetoleranz. Die Durchblutung der replantierten Finger ist in unserem Material im Mittel 77% der kontralateralen Finger. Diese bei einer Umgebungstemperatur von 21 bis 23 °C erhobenen Ruhedurchblutungswerte erlangen erst ihre besondere Bedeutung bei kalter Witterung und direkter Kälteeinwirkung auf die Extremität. Da in vielen Fällen der Temperaturgradient zwischen dem schlechter durchbluteten Finger und der kalten Umgebung kleiner ist als an den übrigen Fingern, tritt der Kälteschmerz schon früher ein (*Wolf und Hardy*). Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Schwere der Kälteintoleranz

Bei indirekter Abkühlung hingegen reagiert das replantierte Ohr noch 1 Jahr nach der Operation schlechter als das Vergleichs Ohr. Auch die Wiedererwärmungszeit ist sowohl 2 Monate als auch 1 Jahr nach Replantation beim wiederangnähten Ohr signifikant verlängert. Es konnte also mit der thermographischen Untersuchung gezeigt werden, daß die neural gesteuerte Regulation der Durchblutung bei Stammerwärmung und Stammabkühlung am replantierten Ohr wesentlich schwächer verläuft. Das heißt, daß die Reaktionsfähigkeit der Gefäße am replantierten Ohr auf nervale Reize deutlich herabgesetzt ist.

In einigen Fällen traten auf indirekte Temperaturänderungen sogar paradoxe Reaktionen im replantierten Ohr auf.

*Aziz* (1954) konnte bei sympathektomierten Patienten und *Partsch* (1978) bei Patienten mit ulzeromutilierenden Erkrankungen ähnliche paradoxe Reaktionen nachweisen. Beide Autoren kommen zu dem Schluß, daß diese Reaktion Ausdruck einer gestörten autonomen Gefäßinnervation sein muß.

Die bei unseren Untersuchungen nachgewiesene Störung der vasomotorischen Reaktion steht im Einklang mit den histologischen Befunden.

Der Gefäßnervenplexus degeneriert im replantierten Kaninchenohr in den ersten Wochen nach der Operation komplett.

Die neu auswachsenden Axone verlaufen meist in einer gewissen Distanz zur Gefäßwand und nehmen sogar in manchen Arealen keinen Kontakt zum Gefäß auf. Dadurch werden sie nicht in die *Schwannschen* Zellen des präexistenten Gefäßplexus distal der Durchtrennungsstelle invaginiert. Dies steht im Gegensatz zum peripheren Nerven, der durch seine Perineuralhülle eine Leitschiene für die auswachsenden Axone bietet.

Die Regeneration des zentralen afferenten Nerven geht rascher vor sich als die des Gefäßnervenplexus. Diese Tatsache könnte vielleicht durch die gute Nervenadaptation und das Bestehenbleiben der Leitstruktur erklärt werden. In der Peripherie sind allerdings auch hier Areale zu finden, in denen die Hautanhangsgebilde noch 14 Monate nach Replantation kaum oder gar nicht innerviert sind.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt *Palmer* bei der Reinnervation der Gefäße am Hautlappenmodell der Ratte. Ob dieser zum Teil mangelhaften Reinnervation der Gefäße am Lappen funktionelle vegetative Ausfälle entsprechen, wurde in diesem Modell nicht untersucht. *Kredel* und *Pheimister* beschäftigten sich dagegen mit der Frage der Rückkehr vasomotorischer, sudomotorischer und pilomotorischer Funktionen an Hautlappen.

Nach diesen Untersuchungen kehrt die Schweißsekretion am ehesten zurück. Die vasomotorische Reaktion ist

oft Jahre nach Anlegen des Lappens noch gestört, was sich in einer verlängerten Rötung auf Erwärmung, einer Überempfindlichkeit gegen Kälte und einem positiven Dermographismus ausdrückt. Das Ausmaß der Rückkehr der Funktionen des Vegetativums ist nach Meinung dieser Autoren sehr variabel.

In unserem experimentellen Modell konnten wir noch 1 Jahr nach Ohrreplantation thermoregulatorische Störungen im Replantat nachweisen. Dies könnte durch die mangelhafte Reinnervation des Gefäßplexus und die zum Teil inkomplette Reinnervation der Afferenzen in der Peripherie erklärt werden, da dadurch sowohl der spinale wie der Axonreflex gestört sind.

Liegen im tierexperimentellen Modell optimale Bedingungen für die Rekonstruktion aller Gebilde vor, wie glatte Abtrennung, kurze Ischämiezeit, spannungslose Gefäß- und Nerven Anastomosen, so sind die Verhältnisse bei menschlichen Amputationen meist weniger günstig. Die Gefäße und Nerven sind dabei oft über längere Strecken proximal und distal der Abtrennungsstelle geschädigt und die Ischämiezeit des Amputates beträgt meist viele Stunden. Obwohl wir grundsätzlich bei einer Replantation bestrebt sind, so viele Gefäße wie möglich zu rekonstruieren, müssen wir uns in vielen Fällen aus morphologischen Gründen auf die Wiederherstellung nur eines Gefäßbündels beschränken und oft weite Strecken mit einem Veneninterponat überbrücken.

Unmittelbar postoperativ kommt es bei guter Gefäßrekonstruktion im Replantat zu einer gegenüber den anderen Fingern erhöhten Hauttemperatur, die von Außentemperaturschwankungen unabhängig zu sein scheint.

*Uratkov* konnte diese Hauttemperaturerhöhung durch elektrothermische Messungen an replantierten Hundextremitäten objektivieren. Sie dürfte durch die Weitstellung der Gefäße auf Grund der Denervierung zustande kommen und zusätzlich die Folge der oft stundenlangen warmen und kalten Ischämie sein.

Nach *Schwarzacher* führt die Ischämie neben der Anhäufung von Stoffwechselprodukten und dadurch zu pH-Änderungen, zu einer erhöhten Hauttemperatur und zu erhöhter Permeabilität der Kapillaren. Im Hundexperiment normalisieren sich die erhöhten Hauttemperaturwerte ab der 8. Woche. Ein ähnlicher Verlauf der Hauttemperatur und Durchblutungswerte konnte bei sympathektomierten Extremitäten nachgewiesen werden (*Shepherd, Denck et al.*).

Der von *Uratkov* unternommene Erklärungsversuch, wonach das Absinken der Temperatur durch die rasche sympathische Reinnervation zustande kommt, kann durch unsere histologischen Untersuchungen jedoch nicht bestätigt werden.

ist die Sensibilität im replantierten Finger. Je schlechter die Sensibilität, um so größer ist die Kälteintoleranz.

In unserem Krankengut besteht außerdem ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen höherem Alter des Patienten und verminderter Kältetoleranz. *Schlenker* et al. konnten sogar zeigen, daß Patienten über 35 Jahren mit einer verminderten Kälteadaptation rechnen müssen.

Für uns auffallend war, daß kein Zusammenhang zwischen Stärke der Kälteintoleranz und Amputationsmechanismus sowie der Zeit nach der Replantation bestand. (Die früheste Nachuntersuchung führten wir 1 Jahr nach Replantation durch.)

Von 36 nachuntersuchten Patienten war nur einer, der den replantierten Finger (Phalange 2 des Daumens) bei kalter Witterung so wie die anderen Finger empfand (Tab. 10).

Alle übrigen gaben eine mehr oder weniger ausgeprägte Störung bei Temperaturwechsel an.

Da jedoch von den 36 Patienten einige am Replantat eine dem kontralateralen Finger entsprechende oder nur gering verminderte Durchblutung aufweisen und über eine „normale“ Sensibilität verfügen, können die oben angeführten Faktoren wohl zu einer Verstärkung der Kälteintoleranz führen, diese aber nicht verursachen.

Als eigentliche Ursache der Kälteintoleranz kann unserer Meinung nach daher eine mangelnde Gefäßreaktion auf Grund von Reinnervationsstörungen des autonomen Gefäßnervenplexus angesehen werden. Verstärkt wird die Kälteintoleranz durch mehrere Faktoren, wobei vor allem eine schlechte Durchblutung sowie eine mangelnde Sensibilitätsrückkehr zu erwähnen sind.

Auf Grund dieser Ergebnisse sollte man daher bei einer Replantation bestrebt sein, eine optimale Gefäß- und Nervenrekonstruktion zu erreichen. Die Frage nach der Möglichkeit einer Verbesserung der Regeneration des autonomen Gefäßnervensystems bleibt für weitere Untersuchungen offen.

#### Danksagung

Mein Dank gilt meinem klinischen Lehrer Herrn Prof. Dr. *H. Millesi* für die großzügige Unterstützung, sowohl bei meinen experimentellen wie klinischen Arbeiten.

Herrn Prof. *Lassmann* danke ich für die Durchführung der histologischen Untersuchungen.

Herrn Prof. *Mastböck* sowie Doz. *Partsch* bin ich für die Anregung und Hilfe bei den experimentellen Untersuchungen, Herrn Dr. *Schemper* für die statistischen Auswertungen zu großem Dank verpflichtet.

Für die gute Zusammenarbeit bei den experimentellen und klinischen Arbeiten sei Frau *Edith* und Fr. *Rinderer* besonders gedankt.

AGA IRS International hat dankenswerterweise die Apparaturen zur thermographischen Untersuchung zur Verfügung gestellt.

#### Literatur

- (1) Aziz, A.: Paradoxical Responses to Changes of Local Temperature in the Hands of a Recently Sympathectomized Hypohidrotic Subject. *Clin. Sci.* 13, 351 (1954).
- (2) Bauereisen, E.: Physiologie des Kreislaufs. Springer, Berlin-Heidelberg-New York 1971.
- (3) Berger, A., Freilinger, G., Frey, J., Holle, J., Mandl, H., Meissl, G., Millesi, H., Piza, H., Walzer, R.: Replantationschirurgie im peripheren Extremitätenbereich – Erzielbare Resultate. Kongreßber. der 19. Tag. der Österr. Ges. für Chirurgie. S. 424. Egermann, Wien 1978.
- (4) Biemer, E.: Klassifizierung von totalen und subtotalen Amputationen. *Handchirurgie* 9, 21 (1977).
- (5) Biemer, E., Duspiva, W.: Rekonstruktive Mikrogefäßchirurgie. Springer, Berlin-Heidelberg-New York 1980.
- (6) Buncke, H. J.: Total ear reimplantation in the rabbit utilizing microminiature vascular anastomosis. *Brit. J. Pl. Surg.* 19, 15 (1966).
- (7) Buncke, H. J., Schultz, W. P.: Experimental digital amputation and replantation. *Plast. Reconstr. Surg.* 36, 62 (1965).
- (8) Carrel, A., Guthrie, C. C.: Results of Replantation of the Thigh. *Science* 23, 393 (1906).
- (9) Dellon, A. L.: Evaluation of Sensibility and Re-education of Sensation in the Hand. Williams and Wilkins, Baltimore-London 1981.
- (10) De la Lande, I. S.: Adrenergic mechanisms in the rabbit ear artery. *Blood Vessels* 12, 137 (1975).
- (11) Denck, H., Weidinger, P.: Die thorakale Sympathektomie. In: Gefäßwand, Rezidivprophylaxe, Raynaud-Syndrom. Hrsg. H. Ehringer, E. Betz, A. Bollinger, E. Deutsch. Witzstrock, Baden-Baden 1979.
- (12) Eiken, O., Nabseth, D. C., Mayer, R. F., Deterling, R. A.: Limb Replantation – I. Technique and Immediate Results. *Arch. Surg.* 88, 48 (1964).
- (13) Eiken, O., Nabseth, D. C., Mayer, R. F., Deterung, R. A.: Limb Replantation – II. The Pathophysiological Effect. *Arch. Surg.* 88, 54 (1964).
- (14) Eiken, O., Nabseth, D. C., Mayer, R. F., Deterung, R. A.: Limb Replantation – III. Long-Term Evaluation. *Arch. Surg.* 88, 66 (1964).
- (15) Feldberg, W.: The Peripheral Innervation of the Vessels of the External Ear of the Rabbit. *J. Phys.* 61, 518 (1937).
- (16) Franck, F.: Physiologie expérimentelle. *Trav. Lab. Marey* 1, 1 (1876).
- (17) Frey, J., Mandl, H., Holle, J., Freilinger, G.: Funktionelle Spätergebnisse nach Replantationen im Hand- und Fingerbereich. *Plast. Chir.* 3, 234 (1979).
- (18) Gelbermann, R. H., Urbaniak, J. R., Bright, D. S., Levin, L. S.: Digital sensibility following replantation. *J. Hand Surg.* 3, 313 (1978).
- (19) Gootz, M., Herzog, F., Lassmann, G.: Methoden für neurohistologische Untersuchungen des peripheren und autonomen

- men Nervensystems an bioptisch gewonnenem Material. *Acta Neuropath. (Berl.)* 29, 269 (1974).
- (20) Grant, R. T.: Observations on Direct Communications Between Arteries and Veins in the Rabbit's Ear. *Heart* 15, 281 (1930).
- (21) Grant, R. T., Thompson, R. W. S.: Cholinesterase and the nerve supply to blood vessels in the rabbit's external ear. *J. Anat. (Lond.)* 97, 7 (1932).
- (22) Greulich, M.: Der Zweipunkt-Stern. *Handchirurgie* 8, 97 (1976).
- (23) Highet, zit. nach Nicholson, O. R., Seddon, H. J.: Nerve Repair in Civil Practice. Results of Treatment of Median and Ulnar Nerve Lesions. *Br. Med. J.* 2, 1065 (1957).
- (24) Höpfner, E.: Über Gefäßnaht, Gefäßtransplantation und Replantation von amputierten Extremitäten. *Arch. klin. Chir.* 70, 417 (1903).
- (25) Hume, W. E., Waterson, J. G.: The innervation of the rabbit ear artery. *Blood Vessels* 15, 348 (1978).
- (26) Hwa, W.: Chinese surgeons break another world medical barrier. *Acta Med. Philip.* 3, 221 (1967).
- (27) Ingerle, H., Ehringer, H., Piza, H., Meissl, G., Walzer, R., Laggner, A., Minar, E., Wöss, A., Wagner, M.: Zur Durchblutung replantierter und revascularisierter Finger. *Acta med. Austriaca* 6, 162 (1979).
- (28) Jacobson, J. H., Suarez, L. E.: Microsurgery in anastomosis of small vessels. *Surg. Forum* 2, 243 (1960).
- (29) Jantsch, H.: Die Rheographie als Wegweiser für die Therapie von arteriellen Durchblutungsstörungen der Extremitäten. *Med. Welt* 9, 431 (1965).
- (30) Kaendl, F., Polzer, K., Schuhfried, F.: Rheographie. Beiträge zur Kardiologie und Angiologie, Bd. 18. Steinkopff, Darmstadt 1979.
- (31) Kendall, M. G.: Rank correlation methods. Griffin & Comp., London 1962.
- (32) Komatsu, S., Tamai, S.: Successful replantation of a completely cut off thumb. A case report. *Plast. Reconstr. Surg.* 42, 374 (1968).
- (33) Krause, W.: Anatomie des Kaninchens. Engelsmann, Leipzig 1884.
- (34) Kredel, F. E., Phemister, D. B.: Recovery of sympathetic nerve function in skin transplants. *Arch. Neurol. Psychiatr.* 42, 403 (1939).
- (35) Lassen, N. A., Lindbjerg, I. F., Munck, O.: Measurement of blood flow through skeletal muscle by intramuscular injection of <sup>133</sup>Xenon. *Lancet* I, 686 (1964).
- (36) Lassmann, H., Lassmann, G.: Adrenerge Nervenfasern in verschiedenen Typen von Neurofibromen. In: Aktuelle Probleme der Neuropathologie. Hrsg. K. Jellinger, H. Gross. Bd. 4, S. 63. Facultas, Wien 1978.
- (37) Lassmann, G., Piza, H.: Autotransplants of the Rabbit's Ear. De- and Regeneration of Nerves and the Vascular Innervation. *J. Hand Surg. (im Druck)*, 1982.
- (38) Lapchinsky, A. G.: Recent results of experimental transplantation of preserved limbs and kidneys and possible use of this technique in clinical practice. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 87, 539 (1960).
- (39) Leaf, N., Zarem, H. K.: Microsurgical Transplantation of the Rabbit's Ear with Mature Transparent Chamber. *Plast. Reconstr. Surg.* 45, 332 (1970).
- (40) Malt, R. A., McKhann, C. F.: Replantation of severed arms. *JAMA* 189, 7 (1964).
- (41) Meissl, G., Berger, A., Holle, J., Mandl, H., Millesi, H.: Funktionelle Ergebnisse in der Replantationschirurgie – Erfahrungsbericht des Wiener Replantationsteams. Kongreßber. der 3. Deutsch-Österr.-Schweiz. Unfalltagung in Wien. In: Hefte zur Unfallheilkunde, S. 578. Springer, Berlin-Heidelberg-New York 1980.
- (42) Millesi, H., Ganglberger, J., Berger, A.: Erfahrungen mit der Mikrochirurgie peripherer Nerven. *Chir. Plast. Reconstr.* 3, 47 (1967).
- (43) Millesi, H.: Zum Problem der Überbrückung von defekten peripheren Nerven. *Wien. med. Wschr.* 118, 182 (1968).
- (44) Millesi, H., Rinderer, D.: A Method for Training and Testing Sensibility of Fingertips. Kongreßber. 7th Int. Congr. of the World Fed. of Occupational Therapists, Jerusalem, 12. bis 18. März 1978.
- (45) Moberg, E.: Objective methods of determining functional value of sensibility in the hand. *J. Bone Jt. Surg.* 40, 454 (1958).
- (46) Palmer, B.: Sympathetic denervation and reinnervation of cutaneous blood vessels following surgery. *Scand. J. Plast. Reconstr. Surg.* 4, 93 (1970).
- (47) Partsch, H.: Gestörte Gefäßregulation bei ulzeromotulierenden Neuropathien der unteren Extremitäten. *VASA* 119, XXX (1978).
- (48) Pickering, G. W., Hess, W.: Vasodilatation in the Hands and Feet in Response to Warming the Body. *Clin. Sci.* 1, 213 (1933).
- (49) Piza-Katzer, H.: Replantation abgetrennter Kaninchenohren. Kongreßber. der Österr. Ges. für Chirurgie, 15. Tagung in Linz, 5. bis 8. Juni 1974, S. 171.
- (50) Piza, H.: Mikrogefäßchirurgie im Tierexperiment. Kongreßband der 6. Jahrestag. der Österr. Ges. für Gefäßchirurgie, Klagenfurt 1973, S. 219. Karger, Basel 1975.
- (51) Piza-Katzer, H.: Analysis of Complications in Digital Vein Grafts. *Chir. plast.* 5, 23 (1979).
- (52) Ridley, A.: Silver staining of the innervation of Meissner corpuscles in peripheral neuropathy. *Brain*, 91, 539 (1968).
- (53) Shepherd, J. T.: Physiology of the circulation in human limbs in health and disease. W. B. Saunders Comp., Philadelphia-London 1963.
- (54) Silver, A., Versaci, A., Montagna, W.: Studies of sweating and sensory function in cases of peripheral nerve injuries of the hand. *J. Invest. Dermatol.* 40, 243 (1963).
- (55) Silver, A., Montagna, W., Versaci, A.: The effect of denervation on sweat glands and Meissner corpuscles of human hands. *J. Invest. Dermatol.* 42, 307 (1964).
- (56) Smith, J. W.: Microsurgery of peripheral nerves. *Plast. Reconstr. Surg.* 33, 317 (1964).
- (57) Sumner, D. S., Manke, D. A., van Beek, A. L., Lambeth, A.: Hemodynamic studies of replanted and revascularized fingers. Kongreßber. Int. Soc. of Angiology, London 1981.

- (58) Schlenker, J. D., Kleinkert, H. E., Tsu-Min, T.: Methods and results of replantation following traumatic amputation of the thumb in sixty-four patients. *J. Hand Surg.* 5, 63 (1980).
- (59) Schwarzacher, H. G.: Morphologie und Physiologie der peripheren Gefäße. *Österr. Apotheker-Ztg.* 31, 76 (1977).
- (60) Trnavsky, G.: Quantitative Durchblutungsmessungen bei Eisapplikation an vago-sympathikotomierten Patienten. *Wien. med. Wschr.* 130, 19 (1980).
- (61) Uratkov, E. F., Lapchinsky, A. G., Perestoronin, S. A., Kaveshnikov, A. I.: Further study on dynamics of skin thermo asymmetry in the period of restoration after replantation of extremities in dogs (Report II). *Acta chir. plast.* 20, 189 (1978).
- (62) Wolf, S., Hardy, J. D.: Studies on Pain. – Observations on Pain Due to Local Cooling and on Factors Involved in the "Cold Pressor" Effect. *J. Clin. Invest.* 20, 521 (1941).



---

Herausgeber: Österreichische Gesellschaft für Chirurgie. Eigentümer und Verleger: Verlagsbuchhandlung Brüder Hollinek & Co., GmbH. Alle: Gallgasse 40 a, A-1130 Wien. Für den Inhalt verantwortlich im Sinne des Pressegesetzes: Prof. Dr. Rainer Gottlob, Alser Straße 4, A-1090 Wien. Druck: Brüder Hollinek, A-2384 Breitenfurt/Wien, Hauptstraße 93.