

Aus der Klinik für Neurochirurgie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. med. Joachim Oertel

**Endoskopische versus mikroskopische Nahinfrarot-
Indocyaningrün-Videoangiographie in der intrakraniellen
Aneurysmachirurgie:
Eine retrospektive Analyse von 108 Fällen**

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät*

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2017

vorgelegt von: Jana Rediker
geb. am 02.06.1984 in Minden

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis _____	I
1 Zusammenfassung _____	1
1.1 Zusammenfassung _____	1
1.2 Summary _____	3
2 Einleitung _____	5
2.1 Einführung _____	5
2.2 Therapieoptionen der intrakraniellen Aneurysmen _____	8
2.2.1 Endovaskuläre Therapie _____	9
2.2.2 Offen chirurgische Therapie _____	10
2.3 Evaluation des Aneurysmaclippings _____	10
2.4 Methoden der intraoperativen Evaluation des Clipergebnisses _____	11
2.4.1 Die ICG-Videoangiographie mit dem Operationsmikroskop _____	12
2.4.2 Endoskopie und endoskopische ICG-Videoangiographie _____	13
2.5 Die Fragestellung dieser Arbeit _____	15
3 Patienten und Methoden _____	16
3.1 Einschlusskriterien _____	16
3.2 Patienten _____	16
3.2.1 Patienten mit SAB durch Aneurysmaruptur _____	16
3.2.2 Patienten ohne Aneurysmaruptur _____	18
3.3 Das chirurgische Prozedere _____	18
3.3.1 Der präoperative Ablauf _____	18
3.3.2 Die Aneurysma-Operationen _____	19
3.3.3 Das postoperative Follow-up _____	19
3.4 Der intraoperative Einsatz der ICG-VA _____	20
3.4.1 Der Fluoreszenzfarbstoff Indocyaningrün _____	20
3.4.2 Das Prinzip der ICG-VA in der Aneurysmachirurgie _____	21
3.4.3 Die ICG-VA mit dem Operationsmikroskop (mICG-VA) _____	23
3.4.4 Die ICG-VA mit dem Endoskop (eICG-VA) _____	24

3.5 Erfassung und Auswertung der Daten _____	26
3.5.1 Patientendaten _____	26
3.5.2 Vergleich zwischen den beiden Methoden der ICG-VA _____	26
3.5.3 Vergleich zwischen den Befunden der intraoperativen eICG-VA und der postoperativen DSA _____	27
3.5.4 Datenverwaltung _____	27
4 Ergebnisse _____	28
4.1 Alter und Geschlecht der Patienten _____	28
4.2 SAB vs. inzidentelles Aneurysma _____	28
4.3 Klinische Klassifikationen der Patienten mit SAB _____	28
4.3.1 Klassifikation nach Hunt und Hess _____	28
4.3.2 Glasgow-Coma-Scale _____	28
4.3.3 Klassifikation nach WFNS _____	29
4.4 Aneurysmalokalisation _____	29
4.5 Operationen multipler Aneurysmen _____	30
4.6 Vorausgegangene Behandlungen _____	30
4.7 Operativer Zugangsweg _____	30
4.8 Fälle, in denen die eICG-VA nicht angewendet wurde _____	31
4.9 Subjektiver Vergleich zwischen der mICG-VA und der eICG-VA zur Beurteilung des Clipergebnisses _____	32
4.9.1 Fälle, in denen beide Methoden gleichwertig waren _____	32
4.9.2 Fälle, in denen die eICG-VA überlegen war _____	32
4.9.3 Fälle, in denen die mICG-VA überlegen war _____	35
4.9.4 Fälle, in denen beide Methoden unbrauchbar waren _____	36
4.10 Objektiver Vergleich _____	37
4.10.1 Beurteilung des Aneurysmadoms _____	37
4.10.2 Beurteilung des Aneurysmahalses _____	37
4.10.3 Beurteilung der Muttergefäße _____	37
4.10.4 Beurteilung der abgehenden Äste _____	38
4.10.5 Beurteilung der perforierenden Arterien _____	38
4.11 Unerwünschte intraoperative Befunde _____	39
4.12 Intraoperative Komplikationen _____	39
4.12.1 Komplikationen aufgrund der ICG-VA _____	39

4.12.2	Komplikationen aufgrund des Einsatzes des Endoskops _____	39
4.12.3	Intraoperative Aneurysmaruptur _____	39
4.13	Befunde der postoperativen DSA _____	40
4.14	Kasuistiken _____	41
4.14.1	Patientin (50 Jahre) mit inzidentellem MCA-Aneurysma rechts _____	41
4.14.2	Patientin (30 Jahre) mit inzidentellem AComA- sowie MCA-Aneurysma rechts _____	43
5	Diskussion _____	45
5.1	Darstellbarkeit und Beurteilbarkeit der Gefäßstrukturen _____	46
5.1.1	Beurteilung des vollständigen Aneurysmaverschlusses _____	46
5.1.2	Beurteilung des Aneurysmahalses _____	47
5.1.3	Beurteilung der Muttergefäße _____	48
5.1.4	Beurteilung der abgehenden Äste _____	49
5.1.5	Beurteilung der beteiligten perforierenden Arterien _____	49
5.2	Vergleich mit der postoperativen DSA _____	50
5.3	Komplikationen _____	50
5.3.1	Spezifische Komplikationen _____	50
5.3.2	Intraoperative Aneurysmaruptur _____	50
5.4	Vor- und Nachteile der beiden Methoden _____	51
5.4.1	Vorteile der eICG-VA _____	51
5.4.2	Nachteile der eICG-VA _____	51
5.4.3	Vorteile der mICG-VA _____	52
5.4.4	Nachteile der mICG-VA _____	52
5.5	Aktuelle Literatur zur ICG-VA mit dem Endoskop _____	53
5.6	Kritikpunkte _____	54
5.6.1	Stärken dieser Arbeit _____	54
5.6.2	Schwachpunkte dieser Arbeit _____	54
5.6.3	Neue Aspekte dieser Arbeit _____	55
5.7	Schlussfolgerung _____	55
6	Literaturverzeichnis _____	57

7	Abbildungsverzeichnis	64
8	Tabellenverzeichnis	66
9	Publikationen	67
10	Danksagungen	68
11	Lebenslauf	69

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
A1 bzw. A2	Segment 1 bzw. 2 der A. cerebri anterior
Abb.	Abbildung
AComA	A. communicans anterior bzw. anterior communicating artery
AChOA	A. choroidea anterior bzw. anterior choroidal artery
aSDH	Akutes Subduralhämatom
AVM	Arteriovenöse Malformation
BA	A. basilaris bzw. basilar artery
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
(c)CT	(craniale) Computertomographie
cm	Zentimeter
cMRT	craniale Magnetresonanztomographie
Da	Dalton
DSA	digitale Subtraktionsangiographie
EC-/IC-Bypass	extrakraniell-intrakranieller Bypass
eICG-VA	endoskopische ICG-Videoangiographie
et al.	und andere
EVD	externe Ventrikeldrainage
GCS	Glasgow Coma Scale
GDC	Guglielmi Detachable Coils
Geschl.	Geschlecht
ggf.	gegebenenfalls
ICA	A. carotis interna bzw. internal carotid artery
ICG	Indocyaningrün
ICG-VA	Indocyaningrün-Videoangiographie
IH	interhemisphärischer Zugangsweg
ITN	Intubationsnarkose
i.v.	intravenös
kg	Kilogramm
li.	links
m	männlich

M2	Segment 2 der A. cerebri media
MCA	A. cerebri media bzw. middle cerebral artery
mICG-VA	mikroskopische ICG-Videoangiographie
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
NIR	Nahinfrarot
nm	Nanometer
OP	Operation
OphthA	A. ophthalmica
Pat.	Patient
PComA	A. communicans posterior bzw. posterior communicating artery
PerA	A. pericallosa bzw. pericallosal artery
PICA	A. inferior posterior cerebelli bzw. posterior inferior cerebellar artery
Pter	pterionaler Zugangsweg
re.	rechts
RM	retromastoidaler Zugang
SAB	Subarachnoidalblutung
s.o.	siehe oben
SO	supraorbitaler Zugangsweg
sog.	sogenannt
s.u.	siehe unten
Subocc	suboccipitaler Zugang
$t_{1/2}$	Halbwertszeit
u.	und
u.a.	unter anderem
USB	Universal Serial Bus
U.S. FDA	United States Food and Drug Administration
V4	Segment 4 der A. vertebralis
v.a.	vor allem
WFNS	World Federation of Neurological Surgeons
z.B.	zum Beispiel
Z.n.	Zustand nach

1 Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung

Endoskopische versus mikroskopische Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie in der intrakraniellen Aneurysmachirurgie: Eine retrospektive Analyse von 108 Fällen

Die Qualität der neurochirurgischen Aneurysmaoperationen hängt entscheidend von dem vollständigen Aneurysmaverschluss bei gleichzeitig unbeeinträchtigter Perfusion der beteiligten Ursprungsgefäße, Gefäßabgänge und perforierenden Arterien ab. Seit einiger Zeit ist eine fast nicht-invasive und kosteneffektive Methode zur intraoperativen Evaluation des Blutflusses in den beteiligten Gefäßstrukturen verfügbar: die in das Operationsmikroskop integrierte Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie. Diese Methode liefert Echtzeit-Informationen über den Blutfluss im Aneurysma und seinen beteiligten Gefäßstrukturen. Bei der Beurteilung von in der Tiefe des Operationsgebietes lokalisierter Strukturen, vor allem bei kleinen Kraniotomien, kommt sie jedoch an ihre Grenzen. Um diese Nachteile zu kompensieren, wurde ein Endoskop mit integrierter Technologie der Indocyaningrün-Videoangiographie entwickelt. Gegenstand dieser Arbeit ist es, den Einsatz dieser Methode der intraoperativen Gefäßdarstellung zu evaluieren und mit den Ergebnissen der mikroskopischen Variante zu vergleichen.

Zwischen Januar 2011 und Januar 2015 wurden 216 Patienten mit insgesamt 248 intrakraniellen Aneurysmen in der Klinik für Neurochirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes in Homburg operativ behandelt. Bei 95 dieser Aneurysma-Operationen (insgesamt 108 Aneurysmen) wurde neben der mikroskopischen zusätzlich auch die endoskopische Indocyaningrün-Videoangiographie in Rahmen der intraoperativen Evaluation angewendet. Nach der Clipapplikation wurden mit beiden Methoden der komplette Verschluss des Aneurysmas und seines Halses sowie der Blutfluss in den Ursprungsgefäßen, den abgehenden Ästen und den perforierenden Arterien beurteilt. Die intraoperative Anwendbarkeit der beiden Methoden wurde dann miteinander und im Verlauf auch mit den Ergebnissen der postoperativen digitalen Subtraktionsangiographie als Standardmethode verglichen.

Sowohl die Darstellbarkeit und Beurteilung des kompletten Aneurysmaverschlusses, des Aneurysmahalses sowie des Blutflusses in den beteiligten relevanten Gefäßstrukturen war mit der endoskopischen Indocyaningrün-Videoangiographie in mehr Fällen erfolgreicher als mit der mikroskopischen Technik. Dabei waren die Unterschiede bei der Evaluation des Halses am größten (88,9% versus 69,4%). In 63,9% der Fälle (n=69) haben sich beide Methoden als gleichwertig erwiesen, aber in 30,6% der Fälle konnten mit der endoskopischen

Indocyaningrün-Videoangiographie bessere Resultate erzielt werden. Bei fünf Patienten hatten die zusätzlichen Informationen, die das Endoskop lieferte, sogar entscheidenden Einfluss auf den weiteren Verlauf der Operation. Durch seinen zusätzlichen Einsatz konnten ein Aneurysmarest, zwei Halsreste und zwei akzidentelle Verschlüsse abgehender Äste verhindert werden. Im Rahmen der postoperativen digitalen Subtraktionsangiographie wurden trotzdem zwei Aneurysmareste und sechs Halsreste gefunden.

Zusammenfassend kann die endoskopintegrierte Indocyaningrün-Videoangiographie als eine Methode angesehen werden, die die Qualität der Aneurysmaoperationen verbessern kann, indem sie zusätzliche intraoperative Informationen liefert. Sie bietet bessere Lichtverhältnisse, vergrößerte Bilder und einen erweiterten Blickwinkel. Die entscheidenden Vorteile zeigten sich unter anderem bei der Darstellung und Evaluation tief gelegener Aneurysmen, besonders in Fällen von kleinen Kraniotomien. Aber weitere Studien sind erforderlich, um fundiertere Aussagen treffen zu können.

1.2 Summary

Endoscope- vs. microscope-integrated near-infrared indocyanine green video angiography (ICG-VA) in intracranial aneurysm surgery: a retrospective analysis of 108 cases

The quality of surgical treatment of intracranial aneurysms is determined by complete aneurysm occlusion, while at the same time preserving blood flow in the involved parent, branching and perforating arteries. A nearly noninvasive and cost-effective technique for intraoperative blood flow evaluation has been available for some time: the near-infrared indocyanine green video angiography integrated into the surgical microscope. This method provides real-time information about the blood-flow in the aneurysm and the involved vessels. However, when it comes to assessing structures located in the depth of the operating area, especially in small craniotomies, it reaches its limits. To compensate for these weak points, an endoscope with integrated technology of indocyanine green video angiography was developed. The objective of this analysis is to assess the use of this method for intraoperative blood flow evaluation and to compare these results to the microscopic version.

In a period between January 2011 and January 2015, 216 patients with a total of 248 intracranial aneurysms were treated surgically at the Department of Neurosurgery of the Saarland University Medical Center in Homburg/Germany. In 95 of these aneurysm surgeries (a total of 108 aneurysms), in addition to the microscopic, the endoscopic indocyanine green video angiography was also used for intraoperative evaluation. After clipping, the complete aneurysm occlusion as well as the blood flow in the parent, branching and perforating arteries was assessed with both methods. Intraoperative applicability of each technique was compared to each other and also to the results of postoperative digital subtraction angiography as standard evaluation technique. Both the visualization and evaluation of the complete aneurysm occlusion, the aneurysm neck and the blood flow in the relevant involved arteries was more successful with the endoscope-integrated indocyanine green video angiography than with the microscopic method. The differences in the assessment of the aneurysm neck were the highest (88.9% versus 69.4%). In 63.9% of the cases (n=69), both techniques were proven to be equivalent. But in 30.6% of the cases, the endoscopic indocyanine green video angiography provided better results for evaluating the post-clipping situation. In five patients, the additional information given by the endoscope had decisive influence on the further course of the surgical procedure. Due to its additional use, one residual aneurysm, two neck remnants, and two accidental occlusions of branching vessels could be prevented.

Nevertheless, two incomplete aneurysm occlusions and six neck remnants were revealed during the postoperative digital subtraction angiography.

In summary, endoscope-integrated indocyanine green video angiography can be viewed as a method that might improve the quality of aneurysm surgery by providing additional intraoperative information. It offers a higher illumination, magnification and an extended viewing angle. Its key advantages were found in the visualization and assessment of deep seated aneurysms especially in cases of small craniotomies. However, to make more profound statements, further studies are required.

2 Einleitung

2.1 Einführung

Intrakranielle Aneurysmen sind pathologische, fokale Aussackungen der das Gehirn versorgenden Blutgefäße und treten typischerweise an den Aufzweigungsstellen der großen Arterien der Hirnbasis auf ^{7,53}. Es handelt sich hierbei überwiegend um Aneurysmae verae, die mit 95-98% fast ausschließlich sakkulär bzw. beerenförmig konfiguriert sind ⁵⁷. Neben dem eigentlichen Sack bzw. Dom des Aneurysmas grenzt man morphologisch den Hals ab. Als weitere relevante Gefäßstrukturen sind die Muttergefäße, sowie die abgehenden Äste und Perforatoren zu erwähnen. Beispiele sind in Abbildung 1 und 2 dargestellt. Die Prävalenz der intrakraniellen Aneurysmen beträgt ca. 1-6%, was in diversen Autopsie- und Angiographiestudien ermittelt werden konnte ^{7,24,53}. Der Anteil der weiblichen Patienten überwiegt gegenüber den männlichen in einem Verhältnis von 2-3:1 ⁶⁴.

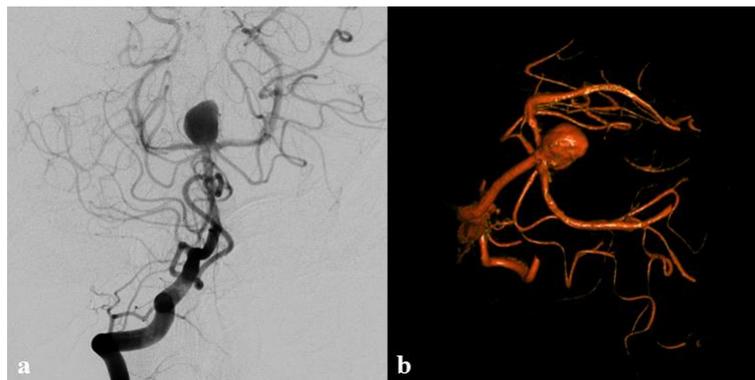


Abb. 1: Aneurysma der BA in der DSA (a) und in der 3D-Rekonstruktion (b)

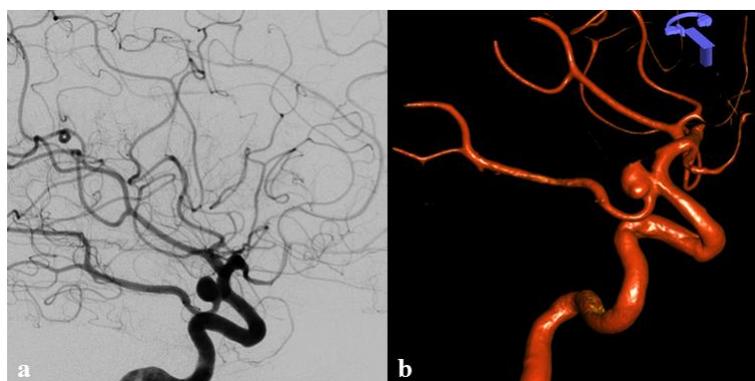


Abb. 2: Aneurysma der ICA in der DSA (a) und in der 3D-Rekonstruktion (b)

Etwa 80-95% der Aneurysmen bilden sich an den großen Arterien der vorderen Zirkulation, also im Stromgebiet der A. carotis interna^{24,53,57}. Nur 5-20% bilden sich demnach an den großen Arterien der hinteren Zirkulation, also im vertebrobasilären Stromgebiet^{24,53,57}. In 20-30% der Fälle treten Aneurysmen multipel auf^{53,64}. Zur Häufigkeitsverteilung der Aneurysmen nach ihrer Lokalisation gibt es in der Literatur verschiedene und sich zum Teil deutlich unterscheidende Angaben. Oft ist die folgende Verteilung (s. Tabelle 1) zu finden:

Lokalisation	Häufigkeit in %
AComA	30
ICA und PComA	25
MCA	20
ICA-Bifurkation	7,5
BA	7-10
PerA	4
PICA und VA	3-5
Sonstige	3,5

Tabelle 1: Lokalisationen der Aneurysmen nach Häufigkeit^{7,23,57}

Das Gefährliche an einem intrakraniellen Aneurysma ist die Möglichkeit seiner Ruptur und einer damit einhergehenden Subarachnoidalblutung (SAB). Hierbei handelt es sich um ein gefürchtetes und schwerwiegendes Ereignis, das mit einer hohen Mortalität und schlechten Prognose vergesellschaftet ist (s.u.). Die Inzidenz der SAB liegt in Europa (außer Finnland) und Nordamerika bei ca. 6–10/100.000 pro Jahr^{24,50,57}. Am höchsten ist die Inzidenz in Finnland und Japan mit 20–30/100.000 pro Jahr^{50,57}. Der Altersgipfel der SAB liegt zwischen 55 und 60 Jahren^{7,22}. Insgesamt überwiegt auch hier das weibliche Geschlecht mit 1,5-2:1^{7,64}. In 75-85% der Fälle einer spontanen SAB liegt die Ursache in einem rupturierten intrakraniellen Aneurysma^{23,56} und 22-25% der zerebrovaskulären Todesfälle sind durch eine SAB verursacht⁵⁰. Insgesamt liegt die Mortalität der SAB bei ca. 30-50%^{22,24,56}.

Allgemein ist eine Zunahme der Anzahl der asymptomatischen Aneurysmen zu beobachten, da durch die immer größere Verfügbarkeit von CT- und MRT-Untersuchungen intrakranielle Aneurysmen entsprechend häufiger zufällig entdeckt werden. Wenn es ohne Ruptur zu Symptomen kommt, dann meistens durch den raumfordernden Effekt großer Aneurysmen. Hierbei kann es je nach Lokalisation des Aneurysmas in seltenen Fällen auch zu fokalen neurologischen Symptomen wie z.B. einer Okulomotoriusparese bei Aneurysmen der PComA, ICA oder BA kommen^{23,53}.

Wenn ein intrakranielles Aneurysma platzt, kommt es zu der oben schon erwähnten Subarachnoidalblutung (s. Abb. 3). Das Kardinalsymptom dieses Krankheitsbildes ist der

akute, plötzlich einsetzende „Vernichtungskopfschmerz“, der von den Patienten charakteristisch als „so stark wie noch nie dagewesen“ beschrieben wird. Zusätzliche typische Symptome sind Übelkeit, Erbrechen, Lichtempfindlichkeit, Bewusstseinsstörungen bis hin zum Koma sowie fokale neurologische Defizite oder Krampfanfälle^{50,53,57}. Ein Meningismus ist ebenfalls typisch, tritt jedoch erst nach sechs bis 24 Stunden²³ aufgrund einer meningealen Reizung durch Blutabbauprodukte im Subarachnoidalraum auf⁵³. Auch okkuläre Blutungen können im Rahmen einer aneurysmatischen SAB mit einer Häufigkeit von 20-40% auftreten²³. Je nach Ausprägung und Schwere der vorhandenen Symptome teilt man die Subarachnoidalblutungen in verschiedene klinische Schweregrade ein. Hierfür stehen mittlerweile viele verschiedene Klassifikationssysteme zur Verfügung, am häufigsten verwendet werden allerdings die Klassifikation nach Hunt und Hess, die Klassifikation nach der World Federation of Neurological Surgeons (s. Kapitel 3.2.1), sowie die Klassifikation nach Fisher, welche sich an radiologischen Kriterien orientiert^{14,23,26}.

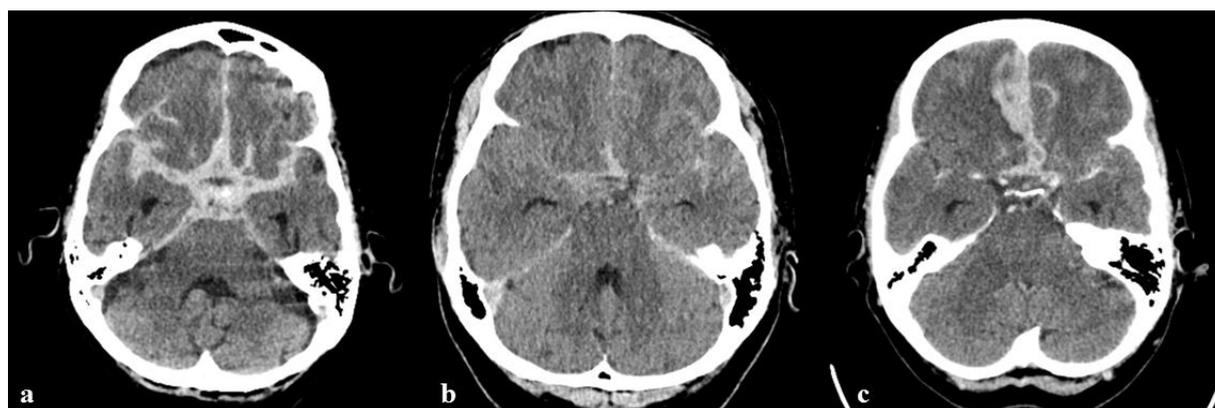


Abb. 3: Subarachnoidalblutungen in der Computertomographie (a: Ruptur eines Aneurysmas der ICA rechts, b und c: jeweils Ruptur eines Aneurysmas der AComA)

In 10–60% der SAB-Fälle kommt es einige Tage bis zu drei Wochen vor dem Ereignis zu einer milden Form des akuten Kopfschmerzereignisses, das oft fehlgedeutet wird. Dieses prodromale Kopfschmerzereignis wird als „warning leak“ oder „warning headache“ bezeichnet. Es wird durch das Austreten kleiner Mengen Blut in die Wand des Aneurysmas oder in den Subarachnoidalraum verursacht und stellt bereits eine Form der SAB dar^{50,53,57}. Schon bei dem geringsten Verdacht auf eine SAB sollte daher unverzüglich eine entsprechende Diagnostik erfolgen.

Die SAB kann mit einigen schwerwiegenden Komplikationen einhergehen, hierbei unterscheidet man die primären von den sekundären. Zu den primären Komplikationen gehören akute subdurale, intraventrikuläre oder intrazerebrale Hämatome^{57,66}. Letztgenannte treten bei etwa 20% der Aneurysmarupturen auf⁵⁷. Eine weitere primäre Komplikation ist mit

20-25% der akute Hydrocephalus occlusus, der innerhalb der ersten Stunden bis wenige Tage nach dem Blutungsereignis auftreten kann. Ursächlich hierfür wird eine Liquorabflussstörung durch intraventrikuläre Blutansammlungen angesehen. Diese primären Komplikationen haben einen sich oft schnell entwickelnden intrakraniellen Druckanstieg zur Folge und bedürfen daher einer schnellen neurochirurgischen Behandlung^{57,66}.

Zu den sekundären Komplikationen gehören die Rezidivblutung, der zerebrale Vasospasmus, der Hydrocephalus malresorptivus, Elektrolytstörungen, kardiale Komplikationen, epileptische Anfälle und intensivmedizinische Komplikationen. Das hohe Risiko einer Rezidivblutung begründet das möglichst frühzeitige Ausschalten eines rupturierten Aneurysmas. Kommt es zu einem Zweitereignis, sind die Patienten in einem schlechteren klinischen Zustand und auch die Mortalität ist mit 50-80%^{57,66} im Gegensatz zur Initialblutung mit 30-50%^{22,24,56} deutlich erhöht. Die Wahrscheinlichkeit für eine erneute Blutung ist innerhalb des ersten Tages mit ca. 4% am höchsten^{23,57,66}, beträgt innerhalb der ersten zwei Wochen ca. 1,5-2% pro Tag^{23,66} und im ersten halben Jahr insgesamt ca. 50%^{23,57,66}. Danach sinkt das Risiko für eine Rezidivblutung auf ca. 2-3% pro Jahr^{23,57,66} für unbehandelte Aneurysmen. Das Risiko für behandelte, aber unvollständig verschlossene Aneurysmen liegt mit ca. 5% pro Jahr etwas höher, was vermutlich den ungünstigeren hämodynamischen Verhältnissen innerhalb des Aneurysmarestlumens zuzuschreiben ist^{57,66}. Die Prognose der SAB ist schlecht, da dieses Krankheitsbild mit einer hohen Morbidität und Mortalität einhergeht. Etwa 10-15% der SAB-Patienten versterben bereits, bevor sie medizinische Hilfe erreicht, also vor Eintreffen des Notarztes oder vor Erreichen des Krankenhauses^{23,24,53}. Die Gesamtmortalität beträgt 30-50%^{22,24,56}. Etwa ein Drittel der Überlebenden hat mit mittelschweren bis schweren Behinderungen zu leben^{23,53,57}. Die anderen zwei Drittel erlangen wieder eine gewisse Unabhängigkeit in ihrem alltäglichen Leben. Diese ist allerdings nicht automatisch mit einer guten Lebensqualität gleichzusetzen, weil etwa die Hälfte der Überlebenden neuropsychologische Defizite, wie Probleme mit dem Kurzzeitgedächtnis oder Aufmerksamkeitsschwierigkeiten, hat.

2.2 Therapieoptionen der intrakraniellen Aneurysmen

Die Gefahr, dass ein intrakranielles Aneurysma rupturieren und somit eine SAB mit ihrer hohen Morbidität und Mortalität verursachen kann, begründet die Notwendigkeit seines Verschlusses. Gleiches gilt für bereits geplatzte Aneurysmen, um eine erneute SAB mit einer noch schlechteren Prognose (s.o.) zu verhindern. Bei letzteren ist möglichst zeitnahe eine entsprechende Therapie indiziert. Im Falle von inzidentellen Aneurysmen wird individuell

unter Berücksichtigung der Größe, Konfiguration und Lokalisation des jeweiligen Aneurysmas sowie körperlichem Befinden des Patienten die Indikation zur Behandlung gestellt.

Ziel ist es, das Aneurysma komplett zu verschließen, sodass es von der Zirkulation ausgeschlossen ist, nicht mehr perfundiert ist und somit nicht mehr wachsen und rupturieren kann. Dadurch soll aber der Blutfluss in allen anderen beteiligten Gefäßstrukturen nicht beeinträchtigt werden^{23,50,53}. Intrakranielle Aneurysmen können sowohl offen chirurgisch (v.a. Clipping) als auch endovaskulär (v.a. Coiling) verschlossen werden.

2.2.1 Endovaskuläre Therapie

Die ursprüngliche Methode des endovaskulären Aneurysmaverschlusses durch ablösbare Ballons wurde 1960 von Serbinenko eingeführt. Seit 1991 stehen jedoch die sogenannten Guglielmi Detachable Coils (GDC) zur Verfügung. Bei dieser Variante werden ablösbare Platinspiralen im Rahmen einer Angiographie in das Aneurysmalumen platziert (sog. Coiling). Der endovaskuläre Zugang erfolgt über die Leiste bis in die intrakraniellen Arterien (s. Abb. 4). Die dicht gepackten Spiralen füllen das Lumen des Aneurysmas jedoch nicht vollständig aus, vielmehr bilden sich im Verlauf ein Thrombus und später narbiges Bindegewebe, sodass auf diese Weise ein Bluteinstrom in das Aneurysma verhindert wird^{23,50,53}. Diese Methode eignet sich vor allem für Aneurysmen mit breitem Dom und schmalem Hals. Um auch Aneurysmen mit breitem Hals erfolgreich verschließen zu können, stehen mittlerweile z.B. auch Stents zur Verfügung, die verhindern sollen, dass die Platinspiralen über den breiten Hals in das Gefäßlumen zurückgelangen⁵⁰.

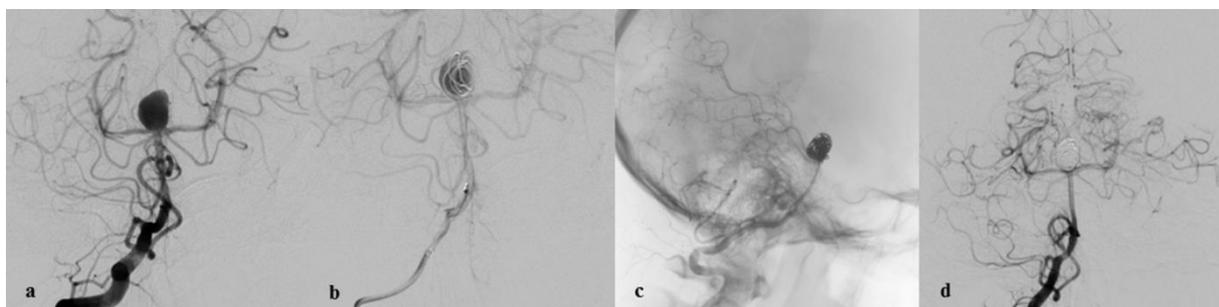


Abb. 4: Coiling eines Aneurysmas der BA (**a:** Angiographie vor Beginn des Coilings, **b** und **c:** Darstellung der Coilspiralen innerhalb des Aneurysmas, **d:** abschließende Angiographie zur Bestätigung des vollständigen Aneurysmaverschlusses)

2.2.2 Offen chirurgische Therapie

Die Methode der Wahl der chirurgischen Aneurysmaversorgung ist der Verschluss des Aneurysmas mittels eines Clips, der um den Hals der Gefäßaussackung platziert wird und das Aneurysma so von der Zirkulation ausschaltet (sog. Clipping). Diese Form des Aneurysmaverschlusses wurde erstmals 1936 von Walter Dandy durchgeführt und hat sich bis heute als eine sehr zuverlässige und definitive Methode erwiesen⁵³. Über eine Kraniotomie und anschließende mikrochirurgische, atraumatische, arachnoidale Präparation wird das Aneurysma dargestellt und mittels eines oder mehrerer Clips verschlossen (s. Abb. 5). Neben dem Verschluss steht zudem die Rekonstruktion des Gefäßverlaufs im Vordergrund. Weitere Möglichkeiten der neurochirurgischen Aneurysmaversorgung sind das Wrapping und das Trapping. Beim Wrapping wird das Aneurysma bzw. seine Rupturstelle mit Muskel-, Faszien- oder Fremdmaterial wie Teflon umhüllt. Diese Methode wurde früher z.B. bei sehr breitbasigen Aneurysmen durchgeführt, ist aber weniger effizient^{23,50}. Beim Trapping wird das Trägergefäß vor und nach der aneurysmatischen Aussackung mit Hilfe von Clips ausgeschaltet. Es ist ebenfalls eine sichere Methode, aber nur bei bestimmten Lokalisationen (z.B. AComA oder V4-Segment) oder zusammen mit einem EC-/IC-Bypass anwendbar^{23,50}.

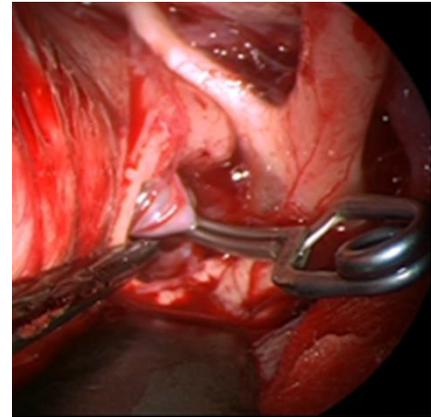


Abb. 5: Endoskopische intraoperative Inspektion eines geclippten AComA-Aneurysmas

2.3 Evaluation des Aneurysmaclippings

Die Qualität der Operation hängt entscheidend davon ab, ob das Aneurysma komplett verschlossen wird und der Blutfluss in den Muttergefäßen, abgehenden Ästen und Perforatoren unbeeinträchtigt bleibt. Ein unvollständiger Aneurysmaverschluss oder Halsrest kann dazu führen, dass das Aneurysma wieder wächst und im schlimmsten Fall (wieder) platzt^{11,19,25}. Das Risiko einer erneuten Ruptur nach stattgehabter SAB ist bei unvollständig versorgten Aneurysmen sogar noch höher als bei nicht versorgten^{57,66}. Akzidentelle intraoperative Verschlüsse von Muttergefäßen, abgehenden Ästen oder perforierenden Arterien sind entscheidende Gründe für schlechte Ergebnisse nach einer Aneurysma-Operation, da sie zu Ischämien und irreversiblen Schäden führen können^{9,35}. Die Standardtechnik, um die anatomischen Verhältnisse nach einem Aneurysma-Clipping zu beurteilen und den vollständigen Aneurysmaverschluss zu bestätigen, ist die postoperative

digitale Subtraktionsangiographie (DSA). Postoperativ entdeckte unerwünschte Befunde können eine erneute Operation mit Veränderung der Clipposition notwendig machen, allerdings sind die Ergebnisse dieser korrigierenden Eingriffe fraglich. Im Falle von akzidentellen Gefäßverschlüssen ist es oft auch schon zu spät, um neurologische Defizite zu vermeiden³⁵.

2.4 Methoden der intraoperativen Evaluation des Clipergebnisses

Mittlerweile stehen dem Neurochirurgen mehrere Methoden zur Verfügung, bereits intraoperativ das Clipergebnis und die Durchblutung in den beteiligten Gefäßen zu beurteilen. So kann bei Bedarf sofort interveniert und die Clipposition verändert bzw. zusätzliche Clips appliziert werden. Hierbei sind vor allem folgende Fragen entscheidend:

- Ist das Aneurysma vollständig ohne Restperfusion verschlossen?
- Bleibt die Perfusion der beteiligten Gefäßstrukturen durch den applizierten Clip unbeeinträchtigt?

Viele Autoren sehen die intraoperativ durchgeführte DSA als die Methode der Wahl an, wenn es darum geht, einen nicht korrekt platzierten Clip unmittelbar erkennen und korrigieren zu können. Sie schlagen daher ihren routinemäßigen bzw. selektiven Einsatz vor^{32,40,43,63}. Diese Methode ist aber letztendlich nicht in die Routine übergegangen, denn sie ist teuer, invasiv, technisch anspruchsvoll, nur begrenzt verfügbar, erfordert zusätzliches Personal und kostet zusätzliche OP-Zeit^{30,32}. Außerdem bietet sie nur eine begrenzte Auflösung und dauert mindestens 20 Minuten. Das wäre zu lange, falls es zu einem akzidentellen Gefäßverschluss gekommen ist, da die ischämische Toleranz des Gehirns -je nach Gefäßterritorium- möglicherweise bereits überschritten wäre⁴⁸.

Weniger invasive und leichter verfügbare Alternativen der intraoperativen Gefäßdarstellung sind die mikrovaskuläre Dopplersonographie, die mikroskopintegrierte ICG-Videoangiographie (mICG-VA), die Endoskopie sowie neuerdings auch die endoskopintegrierte ICG-Videoangiographie (eICG-VA). Um die drei letztgenannten Methoden soll es im Folgenden genauer gehen.

2.4.1 Die ICG-Videoangiographie mit dem Operationsmikroskop

Die Methode der intraoperativen Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie (ICG-VA) wurde erstmals 2003 von Raabe *et al.* beschrieben⁴⁶. Diese Technik ist mittlerweile in einige der kommerziell erhältlichen neurochirurgischen Operationsmikroskope integriert. Die ersten Erfahrungen mit dieser Weiterentwicklung wurden ebenfalls 2005 von Raabe *et al.* veröffentlicht^{27,47,48}. Sowohl vor als auch vor allem nach der Clipapplikation liefert diese Methode der intraoperativen Gefäßdarstellung mittels eines Fluoreszenzfarbstoffes wichtige Informationen über den Blutfluss und indirekt auch über die Anatomie und Konfiguration der am Aneurysma beteiligten Gefäßstrukturen. Das ermöglicht zum einen die Beurteilung des korrekten Aneurysmaverschlusses durch den zuvor positionierten Clip, aber auch die Durchgängigkeit der Muttergefäße, der abgehenden Äste und der kleinen perforierenden Arterien. Diese Methode liefert Echtzeit-Informationen über die Durchblutung der zerebralen Gefäße, die sich analog zur Katheterangiographie in eine arterielle, kapillare und venöse Phase unterteilen lässt^{27,46,48}. Das genaue Prinzip und die Durchführung der ICG-VA während einer Aneurysma-Operation sind im Kapitel 3.4 beschrieben.

In den vielen zu dem Thema veröffentlichten Studien hat sich die ICG-VA als eine einfache, sichere, schnell und wiederholt durchführbare, kostengünstige und leicht reproduzierbare Methode erwiesen^{5,10,17,27,48,62}. Ihr Vorteil liegt vor allem in der Möglichkeit, auch kleine Gefäße mit einem Durchmesser unter 1,0 mm darstellen zu können, wie zum Beispiel kleine kortikale oder perforierende Arterien. Dieses ist im Rahmen einer DSA aufgrund der schlechteren Auflösung und durch die mikrovaskuläre Dopplersonographie nicht bzw. nur eingeschränkt möglich^{10,17,48,62}. Außerdem ist eine Beurteilung des Aneurysmahalses zum Ausschluss von Residuen möglich, was mit der mikrovaskulären Dopplersonographie nicht gelingt¹⁷. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Position des Mikroskops nicht verändert und die Operation für die Evaluation des Clipergebnisses nicht unterbrochen werden muss. Auf diese Weise ist unmittelbar ein Ergebnis vorhanden, das es dem Operateur ermöglicht, im Falle eines akzidentellen Gefäßverschlusses durch Reposition des Clips zu intervenieren, bevor eine schwere zerebrale Ischämie und möglicherweise irreversible Schäden entstehen^{5,27,47,48,62}.

Als nachteilig hat sich jedoch erwiesen, dass sich die durch die ICG-VA erhaltenen Bilder nur auf das OP-Feld beschränken. Das bedeutet, dass nur die Strukturen, die vom Operateur durch das OP-Mikroskop gesehen werden, auch durch die Fluoreszenzangiographie dargestellt und beurteilt werden können. Gefäßstrukturen, die von koaguliertem Blut, Hirngewebe oder anderen Gefäßen verdeckt sind, können also nicht visualisiert werden^{27,39,46,48,52,62}. Ein weiterer Nachteil ist, dass im Gegensatz zur DSA nur ein kleiner Gefäßabschnitt eingesehen

und beurteilt werden kann^{5,48}. Vor allem bei der Beurteilung tiefer gelegener Gefäßstrukturen und bei der Beurteilung durch kleine Kraniotomien stößt diese Methode an ihre Grenzen und eine suffiziente Darstellung und Beurteilung ist in diesen Fällen nur teilweise oder inadäquat möglich^{5,10,17}.

2.4.2 Endoskopie und endoskopische ICG-Videoangiographie

Der unterstützende Einsatz eines Endoskops beim mikrochirurgischen Aneurysmaclipping wurde erstmals 1994 beschrieben. Hierbei handelte es sich um ein flexibles, fiberoptisches Endoskop, dessen Position nicht fixiert werden konnte¹⁸.

Nach Weiterentwicklung und Etablierung von starren Endoskopen mit Linsensystemen und verschieden gewinkelten Optiken (z.B. 0°, 30° oder 70°) wurden diese auch in der Neurochirurgie zunehmend genutzt. Sie bieten eine höhere Auflösung und somit bessere Bildqualität als die flexiblen Modelle^{29,44}. Vor allem Perneczky hat einen großen Beitrag auf dem Gebiet der endoskopisch-assistierten Neurochirurgie geleistet und prägte den Begriff der endoskopisch-assistierten Mikroneurochirurgie sowie den Trend zu immer kleineren Kraniotomien in der Neurochirurgie (sog. Schlüssellochzugänge). Dabei machte er die Erfahrungen, dass die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes bei diesen Zugängen reduziert sind und sich ebenfalls der Betrachtungswinkel verkleinert. Diese beiden Defizite können jedoch durch die Verwendung von starren Endoskopen während der Operation ausgeglichen werden. Der Einsatz des Endoskops ermöglicht neben den verbesserten Lichtverhältnissen im OP-Gebiet und dem erweiterten Blickwinkel ebenfalls eine detailliertere Inspektion aus naher Position. Auf diese Weise können verborgene Strukturen ohne zusätzliche Retraktion und Manipulation an diesen sichtbar gemacht werden. Vor allem bei tief gelegenen Prozessen und engen Platzverhältnissen bietet diese Methode einen enormen Vorteil^{21,42}.

Im Rahmen einer Aneurysma-Operation kann das Endoskop vor und nach sowie in einigen Fällen auch während der Clipapplikation eine Bereicherung darstellen. Es wird unter mikroskopischer Sicht in die Umgebung des Aneurysmas geführt und ermöglicht mit seiner höheren Vergrößerung, seiner besseren Beleuchtung und seiner Möglichkeit, „um die Ecke“ zu blicken, zusätzliche Informationen, die mit dem OP-Mikroskop nicht erlangt werden können. Vor der Clipapplikation kann der Operateur durch die endoskopische Begutachtung zusätzliche visuelle Informationen über die Anatomie und Konfiguration des Aneurysmas, seiner Muttergefäße, seiner Äste, der beteiligten kleinen perforierenden Arterien und sonstiger relevanter Strukturen in der unmittelbaren Umgebung erhalten. Auf diese Weise können das

Ausmaß der Präparation und Manipulation am Aneurysma selbst sowie seiner beteiligten Strukturen minimiert werden. Um die Rückseite des Aneurysmas einzusehen, muss es z.B. gar nicht oder nur wenig retrahiert werden. Letztendlich wird somit auch das Risiko einer intraoperativen Ruptur sowie einer Traumatisierung der Umgebungsstrukturen reduziert^{16,29,31,41,44,65}. Auch die Dauer und Notwendigkeit eines temporären Clippings der Muttergefäße können so reduziert werden^{16,29,44}. Eine weitere Möglichkeit das Endoskop im Rahmen einer Aneurysma-Operation einzusetzen, ist das endoskopisch-assistierte Clipping. Hierbei wird der Clip unter endoskopischer Sicht appliziert. Nach dem Platzieren des Aneurysmaclips kann mit dem Endoskop evaluiert werden, ob der Aneurysmahals komplett erfasst ist und ob keine anderen Gefäßstrukturen eingefasst sind oder durch den Clip komprimiert werden^{16,29,31,41,44}.

In den bis jetzt zu dem Thema veröffentlichten Studien hat sich der Einsatz des starren Endoskops in der Aneurysmachirurgie als eine Methode erwiesen, die durch zusätzlichen visuellen Informationsgewinn zu einer erhöhten Sicherheit, verbesserten Qualität und reduzierten Morbidität beitragen kann^{16,29,31,44,41,54,65}.

Mittlerweile steht auch die Möglichkeit der ICG-VA mit dem Endoskop zur Verfügung. Hier werden die Vorteile der mikroskopischen ICG-VA mit denen der Endoskopie vereint. So kann der Neurochirurg mit Hilfe des Fluoreszenzfarbstoffes ICG den vollständigen Verschluss des Aneurysmas und den Blutfluss in den relevanten beteiligten Gefäßstrukturen intraoperativ in Echtzeit darstellen und aus unmittelbarer Nähe beurteilen. Die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Gebietes könnten so im Rahmen der ICG-VA verbessert werden und durch den vergrößerten Blickwinkel könnten Strukturen besser dargestellt werden, welche hinter anderen verborgen liegen. Der so vermutete Vorteil der eICG-VA gegenüber der mICG-VA wird vor allem bei der Beurteilbarkeit tiefer liegender Gefäßstrukturen oder bei eingeschränkten Lichtverhältnissen durch kleine Kraniotomien vermutet.

Zu Beginn dieser Arbeit war in der Literatur keine Publikation zu finden, die die klinische Anwendung der endoskopischen ICG-VA in der intrakraniellen Aneurysmachirurgie thematisierte. Im Verlauf wurden jedoch zwei Berichte über die ersten klinischen Erfahrungen mit der eICG-VA publiziert^{8,38}. Zudem veröffentlichten Mielke *et al.* die erste Studie über den Vergleich zwischen der mICG-VA und der eICG-VA. Insgesamt wurde die ICG-VA mit dem Endoskop bislang als eine sinnvolle Weiterentwicklung beschrieben, die die Qualität des Aneurysmaclippings verbessern könnte.

2.5 Die Fragestellung dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit soll der Vergleich zwischen der mikroskopischen und der endoskopischen ICG-VA im Rahmen der intraoperativen Evaluation bei intrakraniellen Aneurysma-Operationen sein. Hierbei sollen vor allem folgende Fragen beantwortet werden:

- Inwieweit ist eine sichere Darstellung und Beurteilbarkeit des vollständigen Aneurysmaverschlusses mit beiden Methoden möglich?
- Kann der Aneurysmahals mit Hilfe der beiden Methoden sicher dargestellt und beurteilt werden?
- Ist der Blutfluss in den Muttergefäßen, abgehenden Ästen und perforierenden Arterien jeweils mit den beiden Methoden sicher darstell- und beurteilbar?
- Wo liegen die Vor- und Nachteile der beiden Methoden?
- Gibt es Komplikationen, die auf die jeweiligen Methoden zurückzuführen sind?
- Inwieweit stimmen die intraoperativen Befunde der Gefäßdarstellung mittels eICG-VA und mICG-VA mit den Befunden der postoperativen DSA überein?
- Stellt die endoskopische ICG-VA eine Verbesserung zur mikroskopischen ICG-VA dar?

3 Patienten und Methoden

3.1 Einschlusskriterien

In die Auswertung dieser Arbeit wurden alle Aneurysmen eingeschlossen, welche zwischen Januar 2011 und Januar 2015 in der Klinik für Neurochirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes in Homburg (Direktor: Prof. Dr. med. Joachim Oertel) geclippt wurden und bei deren operativer Versorgung sowohl die mikroskopische als auch zusätzlich die endoskopische ICG-VA zum Einsatz kamen.

Insgesamt wurden im genannten Zeitraum 248 Aneurysmen in 216 Operationen mittels Clipping verschlossen. Von diesen ist bei 108 Aneurysmen (95 Operationen, 88 Patienten) intraoperativ neben der mikroskopischen auch die endoskopische ICG-VA verwendet worden. Die Indikationen für den zusätzlichen Einsatz dieser weiteren Modalität der intraoperativen Evaluation waren ein zusätzlich erwarteter Informationsgewinn und eine erhöhte Sicherheit in Fällen, in denen die mikroskopische Methode an ihre Grenzen zu kommen vermochte, zum Beispiel in Fällen von tief lokalisierten Aneurysmen und/oder kleinen Kraniotomien. Die 95 erfassten Operationen wurden von zwei verschiedenen Operateuren durchgeführt. Als Einschlusskriterium spielten kein Rolle, wie groß die Aneurysmen waren, wo sie lokalisiert und wie sie konfiguriert waren (sofern operativ zugänglich und behandelbar) und wie viele Aneurysmen pro Operation versorgt werden sollten. Auch die Tatsache, ob das Aneurysma nach Ruptur durch eine SAB auffällig geworden oder zufällig entdeckt worden war, war unerheblich. Eine Vorbehandlung im Vorfeld, egal welcher Art, war ebenfalls kein Ausschlusskriterium.

3.2 Patienten

Erfasst wurden 88 Patienten zwischen 30 und 87 Jahren mit insgesamt 108 Aneurysmen, die in 95 Operationen versorgt wurden. Von den 108 Aneurysmen waren 17 rupturiert und äußerten sich durch eine SAB. Die restlichen 91 waren zufällig entdeckt worden und wurden elektiv behandelt.

3.2.1 Patienten mit SAB durch Aneurysmaruptur

Bei den Patienten mit SAB wurde der klinische Schweregrad bei Aufnahme in die Klinik für Neurochirurgie mit Hilfe der Klassifikation nach Hunt und Hess, der Glasgow Coma Scale (GCS) und der Klassifikation nach der World Federation of Neurological Surgeons (WFNS) eingeteilt.

Die Klassifikation nach Hunt und Hess (s. Tabelle 2) wurde 1968 von William E. Hunt und Robert M. Hess publiziert. Sie soll den klinischen Schweregrad von Patienten mit aneurysmatischer Subarachnoidalblutung angeben, der mit dem Operationsrisiko korreliert ²⁶.

Grad	Beschreibung
I	Asymptomatisch oder minimale Kopfschmerzen und leichter Meningismus
II	Mäßige bis schwere Kopfschmerzen, deutlicher Meningismus, keine neurologischen Defizite außer Hirnnervenausfälle
III	Schläfrigkeit, Verwirrtheit oder leichte fokale Defizite
IV	Stupor,mäßige bis schwere Hemiparese, evtl. frühe Dezebrationsstarre und vegetative Beeinträchtigungen
V	Tiefes Koma, Dezebrationsstarre, moribundes Erscheinen

Tabelle 2: Klassifikation der SAB nach Hunt und Hess ²⁶

Die Glasgow Coma Scale (s. Tabelle 3) wurde 1974 von Graham Teasdale und Bryan Jennett beschrieben ^{59,60}. Sie ist heutzutage die am meisten allgemein anerkannte Skala zur Beurteilung von Bewusstseinsstörungen, wird insbesondere in der Intensivmedizin und hier speziell bei Schädel-Hirn-Traumata eingesetzt. Sie eignet sich aber auch zur Beurteilung von Bewusstseins Einschränkungen anderer Ursachen ⁶⁰.

Kategorie	Reaktion	Punkte
Augenöffnen	Spontan	4
	Auf Ansprache	3
	Auf Schmerzreiz	2
	Keine	1
Verbale Antwort	Orientiert, Konversation möglich	5
	Desorientiert, Konversation möglich	4
	Nichtzusammenhängende Worte, keine Konversation möglich	3
	Unverständliche Laute, keine Konversation möglich	2
Motorische Reaktion	Keine	1
	Befolgt Aufforderungen	6
	Gezielte Schmerzabwehr	5
	Ungezielte Schmerzabwehr, Wegziehen	4
	Abnorme Beugereaktion	3
	Strecksynergismen	2
	Keine	1

Tabelle 3: Die Glasgow Coma Scale ⁶⁰

Die Klassifikation der WFNS (s. Tabelle 4) ist die modernste der drei hier relevanten klinischen Einteilungen der SAB. Sie wurde 1988 als universelle Skala zur Einstufung des Schweregrads von SABs veröffentlicht. Sie basiert auf der Erkenntnis, dass die beiden wichtigsten Prognosefaktoren zum einen der Bewusstseinsgrad und zum anderen das Vorhandensein oder die Abwesenheit von motorischen Störungen und/oder Aphasie sind. Die Einschätzung des Bewusstseinsgrades erfolgt hierbei mittels der GCS ¹⁴.

Grad	GCS	Motorisches Defizit
I	15	Nicht vorhanden
II	14-13	Nicht vorhanden
III	14-13	Vorhanden oder Aphasie
IV	12-7	Vorhanden oder nicht vorhanden
V	6-3	Vorhanden oder nicht vorhanden

Tabelle 4: Die WFNS-Klassifikation zur Einteilung der SAB ¹⁴

Nachdem die SAB in der cCT-Bildgebung entdeckt wurde, schloss sich zur weiteren Diagnostik eine Gefäßdarstellung zum Aneurysmanachweis an. Sofern es der klinische Zustand des Patienten zuließ, wurde hierfür eine DSA durchgeführt, andernfalls eine CT-Angiographie.

3.2.2 Patienten ohne Aneurysmaruptur

Bei diesen Patienten war im Vorfeld aus unterschiedlichen Gründen eine kraniale Bildgebung (meist cMRT aber auch cCT) gemacht worden, deren Befund den Verdacht auf ein intrakranielles Aneurysma aufkommen ließ. Bei diesen Patienten wurde zur weiteren Diagnostik eine DSA durchgeführt.

3.3 Das chirurgische Prozedere

3.3.1 Der präoperative Ablauf

Nach angiographischer Sicherung der Diagnose wurde für jedes Aneurysma -ob akut oder elektiv- in einer interdisziplinären Falldiskussion mit den Neuroradiologen des Universitätsklinikums des Saarlandes die geeignete Behandlungsmethode festgelegt. Hierbei waren u.a. die Lokalisation, Größe und Konfiguration des Aneurysmas sowie das Alter und mögliche Vorerkrankungen des Patienten ausschlaggebend. Der Befund und die möglichen Therapieoptionen mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen sowie Risiken wurden, sofern es möglich war, im Anschluss mit dem Patienten ausführlich besprochen und nach umfassender

Aufklärung und genügend Bedenkzeit konnten die Patienten im Sinne eines „informed consent“ in die Operation schriftlich einwilligen. Bei den Patienten mit SAB lief das präoperative Prozedere entsprechend dringlicher ab. Die Operationen waren meist Notfall-Eingriffe die neben dem Verschluss des Aneurysmas auch noch andere operative Maßnahmen wie die Anlage einer EVD oder Ausräumung eines aSDH beinhalteten.

3.3.2 Die Aneurysma-Operationen

Die Aneurysma-Operationen erfolgten in ITN und standardmäßig in mikrochirurgischer Technik, in den meisten Fällen über supraorbitale oder pterionale, aber auch über interhemisphärische, retromastoidale und subokzipital mediale Zugänge. Der supraorbitale Schlüssellochzugang beinhaltet einen Hautschnitt in der lateralen Augenbraue und eine ca. 3,0 x 2,0 cm messende Kraniotomie (s. Abb. 6). Der klassische pterionale Zugang wird über einen bogenförmigen Hautschnitt hinter der Stirn-Haar-Grenze von oberhalb des Tragus bis hin zur Mittellinie und einer ca. 5,0 x 5,0 cm großen Kraniotomie durchgeführt (s. Abb. 7).

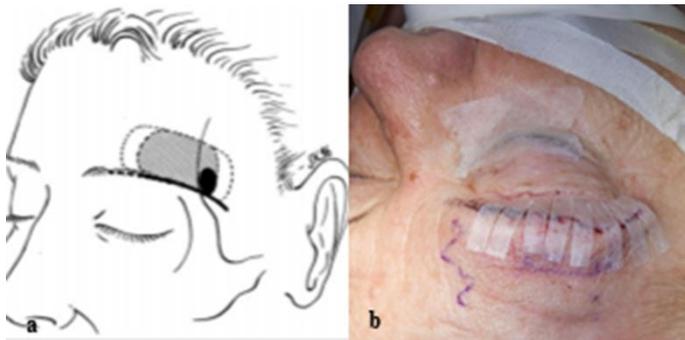


Abb. 6: Der supraorbitale Zugang schematisch⁶¹ (a) und im OP nach Hautverschluss (b)

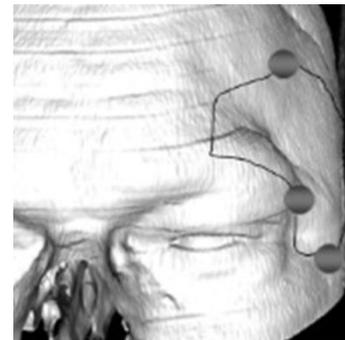


Abb. 7: Der pterionale Zugang⁵⁴

3.3.3 Das postoperative Follow-up

Die Patienten stellen sich im Rahmen der Nachsorge ca. sechs Wochen nach der Operation in der ambulanten vaskulären Sprechstunde vor. Dort wird dann die Kontrollangiographie und ggf. kraniale Bildgebung geplant, die etwa drei bis sechs Monate postoperativ stattfinden. Die weiteren Verlaufskontrollen werden individuell geplant.

3.4 Der intraoperative Einsatz der ICG-VA

Bevor die beiden in dieser Erhebung verwendeten Varianten der ICG-Videoangiographie dargestellt werden, erfolgt zuerst eine Beschreibung des eingesetzten Fluoreszenzfarbstoffes und des Prinzips der ICG-VA.

3.4.1 Der Fluoreszenzfarbstoff Indocyaningrün

Der Fluoreszenzfarbstoff Indocyaningrün (ICG) wurde 1955 im Forschungslabor von Kodak ursprünglich für die Nahinfrarot-Fotografie entwickelt und erhielt bereits ein Jahr später von der United States Food and Drug Administration (U.S. FDA) die Zulassung für den klinischen Gebrauch im Rahmen der Leber- und Herz-Kreislauf-Funktionsdiagnostik. Im Jahr 1975 erweiterte die U.S. FDA das Zulassungsspektrum um den Einsatz in der ophthalmologische Angiographie^{2, 46, 47}.

Gerade auf dem Gebiet der Gefäßdarstellung ist ICG seitdem immer mehr zur Anwendung gekommen. In der Neurochirurgie wurde 2001 erstmals der experimentelle Einsatz von ICG unter dem Operationsmikroskop berichtet², 2003 veröffentlichten Raabe *et al.* dann die ersten klinischen Erfahrungen mit dem Einsatz der Nahinfrarot-ICG-Videoangiographie bei neurovaskulären Operationen⁴⁶. Aktuell ist die ICG-VA eine etablierte Methode der intraoperativen Gefäßdarstellung in der vaskulären Neurochirurgie und wird vor allem bei Aneurysma-, EC-IC-Bypass- und AVM-Operationen sowie bei der Versorgung von duralen Fisteln eingesetzt.

Die aktuellen Einsatzgebiete des Farbstoffes außerhalb der Neurochirurgie sind heutzutage unter anderem die Herz-Kreislauf-Diagnostik, die Leberfunktionsdiagnostik und die ophthalmologische Angiographie. Neuerdings kommt sie aber auch zur Beurteilung der Gefäßanastomosen und der Durchblutung bei fasziokutanen Lappenplastiken in der rekonstruktiven plastischen Chirurgie sowie zur Identifikation von Sentinel-Lymphknoten bei verschiedenen Malignomen zum Einsatz². Der Fluoreszenzfarbstoff mit der Summenformel $C_{43}H_{47}N_2NaO_6S_2$ gehört zu den Tricarbocyanin-Farbstoffen und ist ein negativ geladenes Ion mit einem Molekulargewicht von 774,96 Da². Das hier verwendete Indocyaningrün ist das ICG-PULSION[®] der Firma PULSION Medical Systems AG, München, Deutschland. Nach Lösung in entsprechender Menge an Aqua ad iniectabilia, liegt eine dunkelgrüne, klare Flüssigkeit mit einer Konzentration von 5 mg/ml zur i.v.- Injektion vor. Laut Fachinformation ergeben sich Gegenanzeigen vor allem aus dem je nach Charge etwas unterschiedlichen Anteil an Natriumjodid. ICG-PULSION[®] ist kontraindiziert bei Patienten mit einer manifesten Hyperthyreose sowie einer Überempfindlichkeit gegenüber ICG oder

Natriumjodid. Nebenwirkungen wurden nur sehr selten beschrieben. Bis jetzt traten sie laut Fachinformation in Form von Übelkeit, anaphylaktoiden oder anaphylaktischen Reaktionen oder einem Koronarspasmus auf. Bei Übertritt der Injektionslösung in das Gewebe kann ICG lokale Schädigungen verursachen. In der Literatur sind die Komplikationen durch die Verwendung des Fluoreszenzfarbstoffes mit 0,05-0,2% angegeben^{5,46}. Allerdings sind in den Studien zur Verwendung der ICG-VA in der vaskulären Neurochirurgie keine Komplikationen, die auf die Anwendung von ICG zurückzuführen sind, aufgetreten^{10,12,17,33,39,46-48,62}.

Die empfohlene Dosis für die ICG-Videoangiographie liegt bei 0,2 bis 0,5 mg/kg Körpergewicht. Die Tageshöchstdosis von 5 mg/kg Körpergewicht sollte nicht überschritten werden. Nach der intravenösen Injektion des Farbstoffes bindet er innerhalb von ein bis zwei Sekunden nahezu komplett an Plasmaproteine. Dadurch ist er bei unbeeinträchtigter Gefäßpermeabilität auf das vaskuläre Kompartiment beschränkt^{27,46,62}. ICG unterliegt im Körper keinem bekannten Metabolismus. Er wird ausschließlich durch die Leber unkonjugiert in die Gallenflüssigkeit ausgeschieden und im Dünndarm nicht reabsorbiert. Somit unterliegt er auch keinem enterohepatischen Kreislauf^{12,48,62}. Die Plasmaelimination verläuft in zwei Phasen mit einer ersten Halbwertszeit $t_{1/2}$ von 3 bis 4 Minuten und einer zweiten, dosisabhängigen $t_{1/2}$ von ca. 60 bis 80 Minuten. Durch die kurze Verweildauer im Blut sind wiederholte Gaben unter Berücksichtigung der maximalen Tagesdosis möglich.

ICG absorbiert hauptsächlich Wellenlängen zwischen 700 und 850 nm und emittiert nach Induktion der Fluoreszenz Wellenlängen zwischen 780 und 950 nm^{27,48}. Im Blut, also an Plasmaproteine gebunden, liegen das Absorptionsmaximum von Indocyaningrün bei 805 nm und das Emissionsmaximum bei 835 nm, also jeweils im nahen Infrarotbereich.

3.4.2 Das Prinzip der ICG-VA in der Aneurysmachirurgie

Die ICG-Videoangiographie ist eine einfache Methode, mit der sich durch einen Fluoreszenzfarbstoff der Blutfluss in Gefäßen darstellen lässt. Sie liefert Informationen über die Durchgängigkeit von arteriellen und venösen Gefäßen aller relevanten Durchmesser, inklusive kleiner Arterien und Perforatoren (< 1,0 mm), sofern diese für den Operateur sichtbar und nicht von Blutkoagel oder Gewebe der Umgebung verdeckt sind⁴⁶. Diese Methode wird während Aneurysma-Operationen hauptsächlich nach der Clipapplikation durchgeführt. Mit Hilfe dieser Methode kann direkt und in Echtzeit evaluiert werden, ob das Aneurysma vollständig verschlossen ist, kein Halsrest vorhanden ist und ob die Durchblutung in den beteiligten Gefäßen durch den Clip nicht beeinträchtigt wird. Im Bedarfsfall kann so

unmittelbar die Clipposition verändert bzw. können weitere Clips appliziert werden. Aber auch vor dem Clipping kann sich die ICG-VA als hilfreich erweisen, indem sie Informationen über die anatomische Konfiguration und den Blutfluss in den beteiligten Gefäßstrukturen liefert.

Bei Aktivierung des ICG-Modus wird das Operationsfeld mit einer Lichtquelle beleuchtet, deren Licht einen Teil des ICG-Absorptionsbandes (700-850 nm, Maximum: 805 nm) abdeckt, also im nahen Infrarotbereich (NIR) liegt^{27,48}. Das Anregungslicht sollte keine Fluoreszenzwellenlängen beinhalten, ansonsten sollte je nach Lichtquelle ein Filter verwendet werden, der diese Wellenlängen blockiert².

Die ICG-Lösung wird i.v. als Bolus von ca. 2-3 ml appliziert. Sobald die Farbstofflösung den zu untersuchenden Gefäßabschnitt erreicht hat, wird die Fluoreszenz durch das auf ihn gerichtete NIR-Licht induziert. Die Fluoreszenz (780-950 nm, Maximum: 835 nm) wird von einer nicht-intensivierten Videokamera aufgezeichnet^{27,48}. Voraussetzung dafür ist ein optischer Filter auf Seiten des Sensors, der nur die vom ICG emittierten Wellenlängen durchlässt und sowohl das Umgebungslicht als auch das Anregungslicht blockiert (s. Abb. 8). So wird möglichst nur die vom ICG ausgehende Fluoreszenz detektiert^{2,27,48}. Die Bilder, die dabei entstehen, können sowohl in Echtzeit auf dem Video-Bildschirm angesehen als auch für spätere Analysen aufgezeichnet und gespeichert werden.

Der Ablauf der ICG-Videoangiographie lässt sich analog zur digitalen Subtraktionsangiographie in eine arterielle, kapillare und venöse Phase unterteilen^{12,27,48}. Durch die schnelle Elimination ist eine erneute Gabe von ICG für eine erneute Angiographie bereits nach 3-10 Minuten möglich^{39,46}.

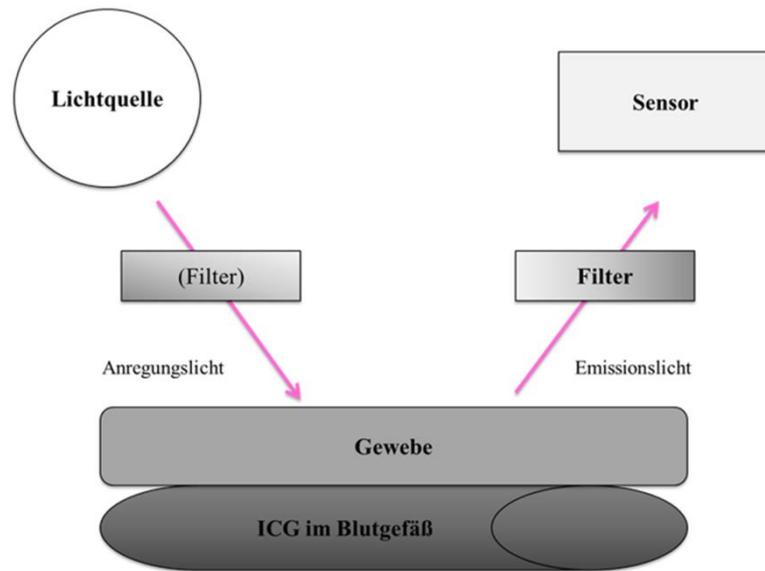


Abb. 8: Schematische Darstellung des Prinzips der ICG-VA ²

3.4.3 Die ICG-VA mit dem Operationsmikroskop (mICG-VA)

Die mikroskopische ICG-Videoangiographie wurde mit einem Operationsmikroskop (OPMI[®] Pentero[™], Carl Zeiss, Oberkochen, Deutschland) durchgeführt, in das die ICG-VA-Technologie integriert ist. Dieses Mikroskop kommt im Rahmen von mikrochirurgischen Eingriffen standardmäßig zum Einsatz. Seine Position muss für die ICG-VA nicht verändert werden. Es ist lediglich ein einfaches Umschalten in den ICG-Modus notwendig. Die Angiographie wird mit einer Standarddosis ICG-PULSION[®] von 0,5 mg/kg Körpergewicht durchgeführt. Die Injektionslösung mit dem Fluoreszenzfarbstoff wird dabei auf Signal des Operateurs vom anwesenden Anästhesisten peripher intravenös verabreicht. Die Bilder der mICG-VA sind in Echtzeit auf dem Bildschirm des Operationsmikroskops zu sehen. Sie können direkt auf der integrierten Festplatte gespeichert werden, von der sie später auch auf CD gebrannt oder auf einen USB-Stick kopiert werden können. So ist es möglich, dass die Videos für eine erneute Ansicht und spätere Analysen jederzeit zur Verfügung stehen. Abbildung 9 zeigt den Aufbau und die Situation im Operationssaal. Abbildung 10 illustriert die intraoperative, mikroskopische Darstellung eines Aneurysmas im Weißlicht- und ICG-Modus.



Abb. 9: Einsatz des OP-Mikroskops bei einer Aneurysma-OP

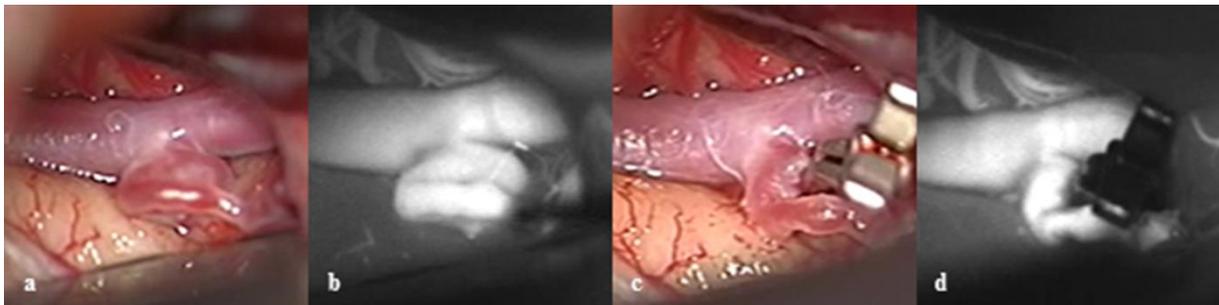


Abb. 10: Clipping eines Aneurysmas der MCA rechts über einen supraorbitalen Zugang bei einer 56-jährigen Patientin (a: Ansicht durch das OP-Mikroskop, b: ICG-VA mit OP-Mikroskop vor dem Clipping, c: Ansicht durch das OP-Mikroskop, d: ICG-VA mit dem OP-Mikroskop nach dem Clipping)

3.4.4 Die ICG-VA mit dem Endoskop (eICG-VA)

Die ICG-Videoangiographie mit dem Endoskop wurde mit einem Nahinfrarot-Endoskop-System (NIR, KARL STORZ GmbH & Co KG, Tuttlingen, Deutschland) durchgeführt. Es besteht aus der D-Light P Lichtquelle, der TRICAM[®] SL II 3-Chip CCU Kamera und einem NIR-optimierten TRICAM[®] PDD 3-Chip Kamerakopf. Das Endoskop selbst hat eine 0°-Optik, einen Außendurchmesser von 5,8 mm und eine Schaftlänge von 19 cm. Durch ein Fluid-Lichtkabel mit einem Durchmesser von 3 mm und einer Länge von 250 cm ist das Endoskop mit dem Kamerakopf verbunden⁸. Das NIR-System kombiniert also Anregung, Emission und Observation. Die Endoskop-Kamera des hier benutzten Gerätes kann die Fluoreszenz des ICGs nicht detektieren, wenn das Licht des Operationsmikroskops das OP-Feld beleuchtet. Daher muss das Mikroskop vor der Durchführung der eICG-VA zur Seite geschwenkt werden, sodass sein Licht nicht mehr auf das zu untersuchende Gebiet gerichtet

ist (s. Abb. 11). Mit einem Drehschalter kann der Operateur zwischen dem Standard-Weißlicht- und dem ICG-Modus wechseln.

Die Angiographie wird mit einer Standarddosis ICG-PULSION® von 0,5 mg/kg Körpergewicht durchgeführt. Die Injektionslösung mit dem Fluoreszenzfarbstoff wird dabei auf Anweisung des Operateurs vom anwesenden Anästhesisten peripher intravenös verabreicht. Die Bilder der eICG-VA sind in Echtzeit auf dem Bildschirm des Endoskopie-Turms zu sehen und können auch hier direkt auf der integrierten Festplatte gespeichert werden, von der sie später auch auf einen USB-Stick kopiert werden können. So ist es möglich, dass die Videos für eine erneute Ansicht und spätere Analysen jederzeit zur Verfügung stehen.



Abb. 11: Endoskopie-Turm (a) und Einsatz des ICG-Endoskops während einer Aneurysma-OP (b)



Abb. 12: Clipping eines kleinen Aneurysmas der MCA rechts bei einer 50-jährigen Patientin über einen supra-orbitalen Zugang (a: endoskopische Inspektion, b: ICG-VA mit Endoskop vor dem Clipping, c: endoskopische Inspektion, d: ICG-VA mit Endoskop nach dem Clipping)

3.5 Erfassung und Auswertung der Daten

3.5.1 Patientendaten

Sämtliche Daten und Informationen zu den Patienten und Operationen, inklusive der diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen im Vorfeld, während des stationären Aufenthalts zur Operation sowie im weiteren Verlauf wurden dem Dokumentations- und Verwaltungsprogramm SAP-Frontend für Windows 720 Final Release entnommen.

3.5.2 Vergleich zwischen den beiden Methoden der ICG-VA

Die Auswertung der hier erfassten Fälle erfolgte durch eine retrospektive Analyse der intraoperativ aufgezeichneten Videos und zum Teil auch durch Anwesenheit bei den jeweiligen Operationen und Gesprächen mit dem jeweiligen Operateur. Bei jeder der hier erfassten Aneurysma-Operationen wurde nach dem Verschluss jedes Aneurysmas das Clipergebnis sowohl mit der mikroskopischen als auch mit der endoskopischen Variante der ICG-VA evaluiert. Dadurch, dass die beiden Methoden jeweils bei derselben Operation, also bei demselben Aneurysma, denselben anatomischen Gegebenheiten, über denselben operativen Zugangsweg und durch denselben Operateur angewendet wurden, waren optimale Bedingungen für einen direkten Vergleich gegeben.

Zum einen wurde subjektiv verglichen: Nach der Clipapplikation wurde für jedes Aneurysma beurteilt, wie sich die beiden Methoden im direkten Vergleich bezüglich der Visualisierung und Beurteilbarkeit des Clipergebnisses dargestellt haben. Es ging vor allem darum, wie sich die beiden Methoden bei der Dokumentation des kompletten Aneurysmaverschlusses und der unbeeinträchtigten Durchblutung der beteiligten Gefäßstrukturen bewährten. Hierbei wurde jedem der 108 Fälle eines der folgenden Kriterien zugeordnet:

- Beide Methoden waren gleichwertig gut, keine war der anderen subjektiv überlegen
- Die ICG-VA mit dem Endoskop war besser als mit dem Mikroskop, unterteilt in:
 - Hilfreiche Ergänzung (z.B. durch zusätzliche visuelle Informationen)
 - Entscheidender Einfluss auf die Operation (z.B. durch Clipreposition, Applikation eines weiteren Clips aufgrund der zusätzlichen Informationen)
- Die ICG-VA mit dem Mikroskop war besser als mit dem Endoskop
- Beide Methoden waren unbrauchbar bzw. nicht anwendbar

Um den Vergleich zwischen der mikroskopischen und der endoskopischen Variante der ICG-VA auch möglichst objektiv zu gestalten, wurde für jedes der 108 Aneurysmen während der Operation evaluiert, wie viele der vorhandenen Strukturen (Aneurysmadom, Aneurysmahals, Muttergefäße, abgehende Äste, perforierende Arterien) mit den jeweiligen Methoden darstellbar und beurteilbar waren.

3.5.3 Vergleich zwischen den Befunden der intraoperativen eICG-VA und der postoperativen DSA

Da die postoperative digitale Subtraktionsangiographie nach wie vor den Goldstandard darstellt, wenn es um die Beurteilung des Operationsergebnisses in der Aneurysmachirurgie geht, wurden die intraoperativen Befunde der mICG-VA und eICG-VA im weiteren Verlauf auch mit den Befunden der postoperativen Kontrollangiographie verglichen. Zum einen wurde evaluiert, in wie vielen Fällen der vollständige und regelrechte Verschluss des Aneurysmas ohne Beeinträchtigung des Blutflusses in den beteiligten Gefäßstrukturen dokumentiert werden konnte und in wie vielen Fällen unerwünschte Befunde wie unvollständige Aneurysmaverschlüsse, Halsreste, akzidentelle Astverschlüsse und akzidentelle Verschlüsse von Muttergefäßen entdeckt wurden. Außerdem konnte daraufhin die Re-Operations- bzw. Re-Interventionsrate bestimmt werden.

3.5.4 Datenverwaltung

Die Daten wurden sowohl in der für diese Erhebung konzipierten Tabelle (Microsoft Office Excel 2007) als auch in der allgemeinen Aneurysma-Datenbank (Microsoft Office Excel 2007) erfasst und ausgewertet. So stehen sie auch für die Untersuchung anderer Fragestellungen jederzeit zur Verfügung.

4 Ergebnisse

4.1 Alter und Geschlecht der Patienten

Die Patienten (n=88) waren zum Zeitpunkt der Operation zwischen 30 und 87 Jahre alt, mit einem Mittelwert von 56,4 Jahren. Von ihnen waren 67% (n=59) weiblich und 33% (n=29) männlich, was einem Verhältnis von ca. 2:1 entspricht (s. Abb. 13).

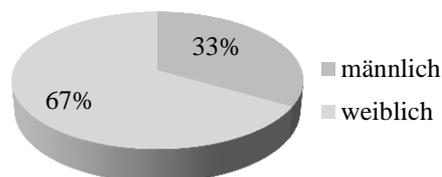


Abb. 13: Geschlechterverteilung

4.2 SAB vs. inzidentelles Aneurysma

Von den insgesamt 108 hier erfassten Aneurysmen wurden 15,7% (n=17) durch Ruptur und daraus resultierender SAB auffällig, die anderen 84,3% (n=91) waren zufällig entdeckt worden, sind also als inzidentelle Aneurysmen anzusehen (s. Abb. 14).

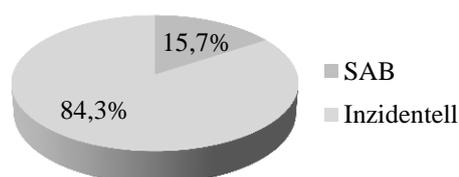


Abb. 14: SAB vs. inzidentell

4.3 Klinische Klassifikationen der Patienten mit SAB

4.3.1 Klassifikation nach Hunt und Hess

Von den 17 Patienten zwischen 34 und 87 Jahren (Mittelwert 57,2 Jahre) mit einer Subarachnoidalblutung waren sieben bei Aufnahme in einem klinischen Zustand, der dem Grad IV der Klassifikation nach Hunt und Hess (s.o.) entspricht. Jeweils vier Patienten waren als Hunt und Hess Grad I bzw. II einzuordnen, zwei Patienten als Grad III und kein Patient als Grad V (s. Tabelle 5).

Hunt und Hess Grad	Anzahl der Patienten	%
I	4	23,5
II	4	23,5
III	2	11,8
IV	7	41,2
V	0	0

Tabelle 5: Klinischer Zustand der Patienten mit SAB (n=17) nach Hunt und Hess

4.3.2 Glasgow-Coma-Scale

Die Einschätzung einer Bewusstseinsstörung mit Hilfe der Glasgow-Coma-Scale ergab folgende Resultate: Jeweils drei Patienten kamen auf eine Punktzahl von fünf bzw. sechs,

jeweils ein Patient war mit vier bzw. sieben bzw. elf Punkten einzustufen und acht Patienten waren bei Aufnahme ohne Einschränkung des Bewusstseins und konnten mit der Maximalpunktzahl von 15 eingestuft werden.

4.3.3 Klassifikation nach WFNS

Mit der Punktzahl aus der GCS konnte anschließend auch die WFNS-Klassifikation angewendet werden, wonach sieben Patienten dem Grad V, zwei Patienten dem Grad IV und die restlichen acht Patienten dem Grad I entsprachen (s. Tabelle 6).

WFNS-Grad	Anzahl der Patienten	%
I	8	47,0
II	0	0
III	0	0
IV	2	11,8
V	7	41,2

Tabelle 6: Klinischer Zustand der Patienten mit SAB (n=17) nach der WFNS-Klassifikation

4.4 Aneurysmalokalisation

Die hier erfassten 108 neurochirurgisch behandelten Aneurysmen gingen in über der Hälfte der Fälle von der A. cerebri media (n=62) aus, gefolgt von der A. communicans anterior (n=26), A. carotis interna (n=6), A. pericallosa (n=4), A. choroidea anterior (n=3), A. inferior posterior cerebelli (n=3), A. basilaris (n=3) und der A. ophthalmica (n=1). Es handelt sich hier überwiegend um Aneurysmen des vorderen Kreislaufs (94,4%) und nur in sechs Fällen um Aneurysmen des hinteren Kreislaufs (5,6%). Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Lokalisation	Anzahl	%
MCA	62	57,4
AComA	26	24,1
ICA	6	5,6
PerA	4	3,7
AChoA	3	2,8
PICA	3	2,8
BA	3	2,8
OphthA	1	0,9

Tabelle 7: Lokalisation der Aneurysmen (n=108)

4.5 Operationen multipler Aneurysmen

Während 11 der 95 Operationen (11,6%), wurde mehr als ein Aneurysma in derselben Sitzung über denselben Zugang verschlossen. Das erklärt, warum die Anzahl der Operationen nicht der Anzahl der Aneurysmen entspricht. In neun Fällen waren es jeweils zwei und in zwei Fällen waren es sogar drei Aneurysmen (s. Tabelle 8). Sieben Patienten mit multiplen Aneurysmen wurden jeweils zweimal operiert, daher ist die Anzahl der Patienten (n=88) kleiner als die der Operationen (n=95).

Anzahl Aneurysma	Anzahl OP	Lokalisation	%
2	9	BA + MCA MCA + MCA AComA + MCA AComA + MCA MCA+MCA BA+AComA AComA+MCA MCA+MCA MCA+ICA	9,5
3	2	MCA + MCA + AChoA AChoA+MCA+MCA	2,1

Tabelle 8: Anzahl der Aneurysmen, wenn mehr als ein Aneurysma in einer OP behandelt wurde (n=11)

4.6 Vorausgegangene Behandlungen

Für sechs Aneurysmen (5,6%) war die hier erfasste Operation nicht die erste Behandlung. Zwei AComA- und ein PICA-Aneurysma waren in der Vergangenheit bereits endovaskulär mittels Coils verschlossen worden. Ein MCA-, ein AComA- und ein ICA-Aneurysma waren jeweils schon einmal geclippt worden. Aufgrund einer Reperfusion bzw. eines Restbefundes war eine erneute Behandlung indiziert.

4.7 Operativer Zugangsweg

Die 95 Operationen erfolgten in ca. der Hälfte der Fälle (n=47) über den supraorbitalen Zugangsweg. Aber auch der pterionale (n=41), der interhemisphärische (n=4), der retromastoidale (n=2) sowie der suboccipitale mediale (n=1) Zugangsweg wurden für die Eingriffe dieser Analyse gewählt. Sie waren in allen Fällen ipsilateral (s. Tabelle 9).

Zugang	Anzahl OP	%
SO	47	49,5
Pter	41	43,2
IH	4	4,2
RM	2	2,1
Subocc medial	1	1,1

Tabelle 9: Operativer Zugangsweg (n=95)

4.8 Fälle, in denen die eICG-VA nicht angewendet wurde

Im erfassten Zeitraum zwischen Januar 2011 und Januar 2015 wurden insgesamt 248 intrakranielle Aneurysmen in 216 Operationen verschlossen. Während 95 dieser Operationen (44,0%) bzw. bei 108 Aneurysmen (43,5%) wurde im Rahmen der intraoperativen Evaluation des Clipergebnisses neben der mICG-VA zusätzlich die eICG-VA eingesetzt. Das waren Fälle, in denen eine eingeschränkte Darstell- und Beurteilbarkeit bei Verwendung der mikroskopischen ICG-VA bzw. ein ergänzender Informationsgewinn durch die endoskopische Variante zu erwarten waren.

Die Fälle, in denen das ICG-Endoskop nicht zusätzlich zur Anwendung kam, waren z.B.:

- Große Kraniotomien (wie z.B. pterionaler Zugang) und/oder
- Geringe Distanz zwischen Kraniotomie und Aneurysma ohne relevante Limitierung der Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes (z.B. distal lokalisierte Aneurysmen der MCA) und /oder
- Generelle limitierte Durchführbarkeit der ICG-VA durch (starke) Blutungen
- Operateur ist nicht mit dem Einsatz des Endoskops im Rahmen des Aneurysma-Clippings vertraut
- Kleine und einfach konfigurierte Aneurysmen

4.9 Subjektiver Vergleich zwischen der mICG-VA und der eICG-VA zur Beurteilung des Clipergebnisses

4.9.1 Fälle, in denen beide Methoden gleichwertig waren

In 63,9% der Fälle (n=69) waren beide Methoden gleichwertig, um das Ergebnis der Clip-Applikation zu beurteilen. Das bedeutet, dass sich die am Aneurysma beteiligten relevanten Strukturen, also der Aneurysmadom, der Aneurysmahals, die Muttergefäße, die abgehenden Äste sowie die Perforatoren, sowohl mit der mICG-VA als auch mit der eICG-VA gleich gut darstellen und beurteilen ließen. Auch wenn das nicht immer komplett und vollkommen möglich war, konnte mit beiden Varianten in den 69 Fällen eine gute und sichere Beurteilung erzielt werden, ohne dass eine Methode der anderen überlegen war.

4.9.2 Fälle, in denen die eICG-VA überlegen war

Bei der Beurteilung des Clipergebnisses von 33 Aneurysmen, also in 30,6% der Fälle, war jedoch die ICG-VA mit dem Endoskop der mikroskopischen Variante überlegen. In 25,9% der Fälle (n=28) lieferte die eICG-VA hilfreiche Ergänzungen zur intraoperativen Evaluation des Clip-Ergebnisses. Darunter sind die Fälle, in denen die Anwendung des Endoskops durch eine bessere Auflösung die schärferen und detaillierteren Bilder lieferte und in denen der Blutfluss in bestimmten relevanten Gefäßstrukturen nur mit der endoskopischen Variante dargestellt und beurteilt werden konnte. Dieses war zuvor mit der mICG-VA nicht sicher möglich, da die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes zu schlecht waren. An dieser Stelle konnten nun die Vorzüge des Endoskops zum Einsatz kommen, da es direkt in die Tiefe an das Aneurysma gebracht werden konnte und somit die Lichtverhältnisse verbessern und ausgleichen konnte. Insgesamt hat also der Einsatz der ICG-Endoskopie in den gerade genannten 28 Fällen zu zusätzlichen und detaillierteren Informationen und somit letztendlich zu einer erhöhten Sicherheit beigetragen.

In vier der Fälle war die mICG-VA gar nicht anwendbar. Es handelte sich hierbei um die drei BA-Aneurysmen, die jeweils über einen pterionalen Zugang geclippt wurden und ein AChoA-Aneurysma, das über einen supraorbitalen Zugang verschlossen wurde. Diese Aneurysmen sind tief gelegen und relativ weit von der z.T. sehr kleinen Kraniotomie entfernt, sodass gerade nach Applikation der Clips die Lichtverhältnisse im Operationsgebiet so schlecht waren, dass die ICG-VA mit dem Mikroskop nicht möglich war. Das Endoskop jedoch konnte in drei der vier Fälle (s. Kapitel 4.9.4) direkt an die zu untersuchenden Gefäßstrukturen

gebracht werden und lieferte so eine bessere Beleuchtung zur Induktion sowie eine kürzere Distanz zur Detektion der Fluoreszenz.

In den fünf anderen der 33 Fälle (4,6%) hatte die Anwendung des Endoskops sogar entscheidenden Einfluss auf die Operation, denn erst durch die eICG-VA konnten zwei akzidentelle Astverschlüsse, zwei Halsreste und ein unvollständiger Aneurysmaverschluss mit Restperfusion im Dom detektiert werden. Diese Befunde waren zuvor mit der mICG-VA nicht zu sehen. Durch Clipreposition bzw. Applikation zusätzlicher Clips konnten diese unerwünschten Ergebnisse korrigiert und durch eine erneute Fluoreszenzangiographie bestätigt werden. Im Rahmen dieser Analyse konnten also mit Hilfe der ICG-Endoskopie insgesamt zwei akzidentelle Astverschlüsse, zwei Halsreste und ein unvollständiger Aneurysmaverschluss verhindert werden, was in der postoperativen DSA schließlich auch bestätigt werden konnte. In Tabelle 10 sind die Fälle, in denen die eICG-VA der mICG-VA überlegen war, zusammengefasst dargestellt.

	Geschl.	Alter	Aneurysma-Lokalisation	Zugang	Kommentar	Konsequenz des zusätzlichen Einsatzes der eICG-VA
1	m	48	MCA li.	SO li.	Halsrest nur mit eICG-VA sichtbar	Zusätzlicher Clip
2	w	30	AComA	SO re.	Regelrechte Durchgängigkeit der kontralateralen A2 nur mit eICG-VA sicher nachweisbar	Erhöhte Sicherheit
3	w	65	MCA re.	SO re.	Bessere Auflösung mit eICG-VA, daher schärferes u. detaillierteres Bild	Erhöhte Sicherheit
4	w	50	MCA re.	SO re.	Unvollständiger Verschluss mit Restperfusion erst mit eICG-VA sichtbar	Zusätzlicher Clip
5	w	61	MCA re.	Pter re.	Astverschluss nur mit eICG-VA sichtbar	Clipreposition
6	m	62	AComA	SO re.	Hals und Perfusion der kontralateralen A1 u. A2 nur mit eICG-VA sicher beurteilbar	Erhöhte Sicherheit
7	w	46	MCA li.	Pter li.	Bessere Auflösung mit eICG-VA, schärferes u. detaillierteres Bild	Erhöhte Sicherheit

8	w	47	ACoMA	SO li.	Bessere Auflösung mit eICG-VA, daher schärferes u. detaillierteres Bild	Erhöhte Sicherheit
9	w	48	AChoA re.	SO re.	mICG-VA unbrauchbar, da Lichtverhältnisse in der Tiefe zu schlecht; Beurteilung nur mit eICG-VA möglich	Erhöhte Sicherheit
10	m	44	AChoA li.	SO li.	Hals nur mit eICG-VA sicher darstellbar	Erhöhte Sicherheit
11	m	59	ACoMA	SO re.	Astverschluss nur mit eICG-VA sichtbar	Clipreposition
12	m	60	MCA re.	Pter re.	Perforator nur mit eICG-VA sichtbar	Erhöhte Sicherheit
13	w	63	BA	Pter re.	Nach Clipapplikation bessere, jedoch auch eingeschränkte Darstellbarkeit mit eICG-VA	Erhöhte Sicherheit
14	w	30	AChoA re.	Pter re.	Hals, Ast u. Perforator nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
15	w	73	ACoMA	SO li.	Bessere Lichtverhältnisse mit eICG-VA, aber Hals mit beiden Methoden nicht darstellbar	(Erhöhte Sicherheit)
16	w	51	MCA re.	SO re.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
17	w	52	MCA li.	SO li.	Darstellung M2 nur mit eICG-VA möglich	Erhöhte Sicherheit
18	m	53	MCA li.	SO li.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
19	m	73	ACoMA	SO li.	Kontralaterale A2 u. Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
20	w	52	BA	Pter re.	mICG-VA unbrauchbar, relevante Gefäßstrukturen nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
21	w	52	MCA re.	Pter re.	Perforator mit beiden Methoden nicht darstellbar, aber einer der beiden Äste nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
22	w	67	MCA re.	SO re.	Hals besser mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
23	m	31	ACoMA	SO li.	Halsrest nur mit eICG-VA darstellbar	Clipreposition

24	m	50	MCA re.	Pter re.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
25	m	51	MCA li.	Pter li.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
26	w	49	ICA li.	Pter li.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
27	w	63	ACoMA	SO li.	Vollständiger Verschluss nur mit eICG-VA sicher beurteilbar	Erhöhte Sicherheit
28	m	51	MCA re.	SO re.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
29	m	59	ACoMA	Pter re.	Bessere Auflösung mit eICG-VA, daher schärferes u. detaillierteres Bild	Erhöhte Sicherheit
30	w	39	ACoMA	SO li.	Äste nur mit eICG-VA darstellbar, jedoch mit mICG-VA schärferes Bild	Erhöhte Sicherheit
31	w	62	MCA li.	Pter li.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit
32	w	62	MCA li.	Pter li.	Bessere Auflösung mit eICG-VA, daher schärferes u. detaillierteres Bild	Erhöhte Sicherheit
33	w	53	ICA li.	Pter li.	Hals nur mit eICG-VA darstellbar	Erhöhte Sicherheit

Tabelle 10: Fälle (n=33), in denen die eICG-VA der mICG-VA überlegen war

4.9.3 Fälle, in denen die mICG-VA überlegen war

In 4,6% der Fälle (n=5) zeigte sich die mikroskopische ICG-VA gegenüber der endoskopischen Variante überlegen. In allen fünf Fällen lieferte mICG-VA jeweils die schärferen und detaillierteren Bilder, sodass mit dieser Methode eine sichere Beurteilung möglich war. Die Fälle, in denen die mICG-VA der eICG-VA überlegen war, sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

	Geschl.	Alter	Aneurysma-Lokalisation	Zugang	Kommentar
1	w	56	MCA re.	SO re.	Schärferes und detaillierteres Bild mit mICG-VA
2	w	64	ACoMA	SO re.	Schärferes und detaillierteres Bild mit mICG-VA
3	m	55	MCA re.	Pter re.	Schärferes und detaillierteres Bild mit mICG-VA
4	w	53	MCA li.	Pter li.	Schärferes und detaillierteres Bild mit mICG-VA, Perforator nur mit mICG-VA darstellbar
5	w	52	ACoMA	SO re.	Schärferes und detaillierteres Bild mit mICG-VA, Perforator nur mit mICG-VA darstellbar

Tabelle 11: Fälle (n=5), in denen die mICG-VA der eICG-VA überlegen war

4.9.4 Fälle, in denen beide Methoden unbrauchbar waren

Für ein Aneurysma (0,9%) waren beide Methoden nicht anwendbar. Hierbei handelte es sich um ein Aneurysma der A. basilaris, das über einen pterionalen Zugang geclippt wurde. Für die mikroskopische ICG-VA waren die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes so eingeschränkt, dass eine ausreichende Darstellung der relevanten Strukturen mit dieser Methode nicht möglich war. An dieser Stelle würde theoretisch das Endoskop greifen. Die räumlichen Verhältnisse in der Cisterna interpeduncularis waren nach der Clip-Applikation jedoch so eingeschränkt, dass das für diese Arbeit benutzte Modell in seinem Durchmesser zu groß (5,8 mm) war, um es durch die Zisterne zu dem Aneurysma zu führen. So war in diesem Fall auch die Verwendung der eICG-VA unmöglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in dieser Analyse die ICG-VA mit dem Endoskop in nur fünf Fällen (4,6%) schlechter war als die ICG-VA mit dem Mikroskop. In allen anderen 103 Fällen war sie mindestens gleichwertig. Die mICG-VA war in insgesamt vier Fällen (3,7%) unbrauchbar, die eICG-VA in einem Fall (0,9%). Die Ergebnisse des subjektiven Vergleichs sind noch einmal in Tabelle 12 zusammengefasst.

	Anzahl	%
Beide Methoden gleichwertig	69	63,9
eICG-VA überlegen	33	30,6
• Hilfreich	28	25,9
• Entscheidend	5	4,6
mICG-VA überlegen	5	4,6
Beide Methoden nicht brauchbar	1	0,9

Tabelle 12: Zusammenfassung subjektiver Vergleich zwischen eICG-VA und mICG-VA

4.10 Objektiver Vergleich

4.10.1 Beurteilung des Aneurysmadoms

Nach der Clipapplikation konnte der Aneurysmadom und somit die Frage nach seinem kompletten Verschluss mit der endoskopischen ICG-VA in 99,1% der Fälle und mit der mikroskopischen ICG-VA in 94,4% der Fälle beurteilt werden. Mit dem Mikroskop war es in den vier oben genannten Fällen (drei BA- und ein AChoA-Aneurysma) und je einem Aneurysma der AComA und MCA bei kleinen Kraniotomien (SO-Zugang) mit reduzierten Lichtverhältnissen in der Tiefe des OP-Feldes nicht möglich. Mit dem Endoskop war die Beurteilung in dem oben genannten Fall (BA-Aneurysma) nicht möglich, bei dem beide Methoden nicht anwendbar waren.

4.10.2 Beurteilung des Aneurysmahalses

Die Beurteilung des Aneurysmahalses gelang mit der eICG-VA in 88,9%, mit der mICG-VA nur in 69,4% der Fälle. Gründe dafür waren zum Beispiel eingeschränkte Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes -vor allem bei kleinen Kraniotomien-, tief lokalisierte Aneurysmen (BA, AChoA, ICA), versteckte Gefäßstrukturen, ein limitierter Blickwinkel des Mikroskops und seine visuelle Auflösung. Aber auch die endoskopische Variante kam hierbei an ihre Grenzen, insbesondere in den Fällen, in denen die visuelle Auflösung Defizite aufwies.

4.10.3 Beurteilung der Muttergefäße

Der Blutfluss in den insgesamt 129 vorhandenen Muttergefäßen konnte mit der endoskopischen Variante in 99,2% (n=128) und mit der mikroskopischen Variante in 96,1% (n=124) der Fälle dargestellt und beurteilt werden. Neben den schon genannten drei BA-Aneurysmen und dem AChoA-Aneurysma konnte ebenfalls bei einem Aneurysma der MCA, das über einen supraorbitalen Zugang geclippt wurde, aufgrund der begrenzten Lichtverhältnisse und des Blickwinkels durch das Mikroskop das Muttergefäß nicht visualisiert werden. Mit der endoskopischen Variante war die Evaluation bei dem bereits genannten BA-Aneurysma nicht möglich.

4.10.4 Beurteilung der abgehenden Äste

Bei den insgesamt 206 abgehenden Ästen war die Beurteilung des Blutflusses mit der eICG-VA in 99,0% (n=204), mit der mICG-VA in 92,7% (n=191) der Fälle erfolgreich. Auch hierbei kam das Mikroskop durch seinen limitierten Blickwinkel, reduzierte Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes nach dem Clipping und/oder bei kleinen Kraniotomien sowie bei tief gelegenen Aneurysmen (BA, AChoA) schneller an seine Grenzen als das Endoskop.

4.10.5 Beurteilung der perforierenden Arterien

Von den 61 identifizierten Perforatoren ließen sich 86,9% (n=53) mit der eICG-VA und 82,0% (n=50) mit der mICG-VA beurteilen.

Eingeschränkte Lichtverhältnisse, hinter anderen Strukturen versteckte Perforatoren und ein limitierter Blickwinkel waren hierbei ebenfalls Gründe für die schlechteren Ergebnisse der mikroskopischen Technik.

Abbildung 15 fasst diese Ergebnisse graphisch zusammen.

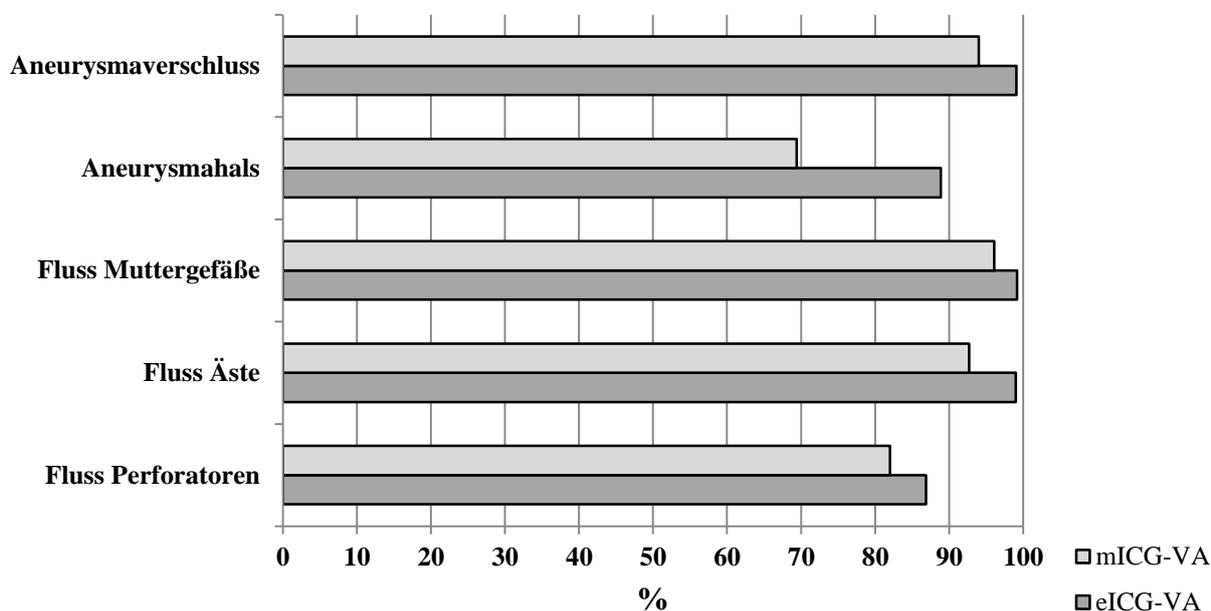


Abb. 15: Erfolgreiche intraoperative Darstellung und Beurteilung der verschiedenen Aneurysmastrukturen

4.11 Unerwünschte intraoperative Befunde

In insgesamt 18 Fällen wurden intraoperativ akzidentelle Astverschlüsse, inkomplette Aneurysmaverschlüsse und Halsreste detektiert, die durch sofortiges Intervenieren in Form einer Clipreposition oder Applikation zusätzlicher Clips behoben werden konnten. Welche unerwünschten intraoperativen Befunde mit welcher Methode jeweils dargestellt werden konnten, ist in der folgenden Tabelle 13 dargestellt. Wie oben schon erwähnt, hat sich gezeigt, dass durch den zusätzlichen Einsatz der endoskopischen ICG-VA zur Evaluation des Clipergebnisses zwei akzidentelle Astverschlüsse, zwei Halsreste und ein inkompletter Aneurysmaverschluss verhindert werden konnten.

Befund	mICG-VA	eICG-VA
Astverschluss	1	3
Inkompletter Aneurysmaverschluss	4	5
Halsrest	8	10
Verschluss Muttergefäß	0	0

Tabelle 13: Unerwünschte intraoperative Befunde nach dem Clipping und mit welcher Methode sie dargestellt werden konnten

4.12 Intraoperative Komplikationen

4.12.1 Komplikationen aufgrund der ICG-VA

Im Rahmen der hier erfassten Operationen ereigneten sich keinerlei Komplikationen, die auf die Verwendung des Fluoreszenzfarbstoffes Indocyaningrün oder auf die Anwendung der ICG-VA zurückzuführen sind. Die speziell auf die ICG-VA bezogene Komplikationsrate beträgt somit 0%.

4.12.2 Komplikationen aufgrund des Einsatzes des Endoskops

Auch auf den zusätzlichen Einsatz des Endoskops waren keine Komplikationen zurückzuführen.

4.12.3 Intraoperative Aneurysmaruptur

Die Ruptur eines Aneurysmas während der Operation ereignete sich nur in einem Fall. Hierbei handelte es sich um einen 53-jährigen Patienten, bei dem es zuvor zu einer SAB durch Ruptur eines Aneurysmas der AComA gekommen war. Das sehr große und teilthrombosierte Aneurysma wurde über einen supraorbitalen Zugang verschlossen. Bei der

Darstellung des kontralateralen Aneurysmateils kam es zur erneuten Ruptur. In diesem Fall wurde vor der Clipapplikation keine endoskopische Inspektion und ICG-VA durchgeführt, sodass hier nicht von der potenziellen Reduktion der Manipulation an den beteiligten Gefäßstrukturen profitiert werden konnte. Ob die erneute Ruptur jedoch tatsächlich durch den Einsatz des Endoskops zu verhindern gewesen wäre, bleibt reine Spekulation.

4.13 Befunde der postoperativen DSA

Von 91 der 108 Aneurysmen liegt ein postoperativer Angiographiebefund vor. In der postoperativen Kontroll-DSA der 91 Aneurysmen konnte in insgesamt 91,2% der Fälle (n=83) der vollständige und regelrechte Verschluss des Aneurysmas ohne Beeinträchtigung des Blutflusses in den beteiligten Gefäßstrukturen nachgewiesen werden. In 2,2% der Fälle (n=2) wurden in der postoperativen Kontrolle eine Restperfusion des Aneurysmas gefunden. Der vollständige Verschluss dieser beiden Aneurysmen erfolgte anschließend in einem Fall durch endovaskuläres Coiling und in dem anderen Fall durch eine erneute neurochirurgische Operation. Halsreste konnten bei 6,6% der kontrollierten Aneurysmen (n=6) detektiert werden (s. Tabelle 14). Bei keinem der sechs Halsreste bestand jedoch zum Zeitpunkt ihrer Entdeckung die Indikation für einen Wiedereingriff. Es wurde kein akzidenteller Astverschluss gefunden. Das bedeutet, dass in dieser Analyse alle unerwünschten Befunde dieser Art durch die eICG-VA bereits intraoperativ detektiert und sofort korrigiert werden konnten. Die Befunde der postoperativen DSA bestätigen also die schon oben gemachte Aussage, dass in dieser Studie durch den Einsatz des ICG-Endoskops zwei akzidentelle Astverschlüsse verhindert werden konnten. Akzidentelle Verschlüsse von Muttergefäßen wurden in dieser Arbeit nicht beobachtet, weder in der postoperativen Kontroll-Angiographie, noch im Rahmen der intraoperativen Gefäßdarstellung mittels mICG- und eICG-VA.

Befund	Anzahl	%
Regelrechter Verschluss	83	91,2
Unvollständiger Aneurysmaverschluss	2	2,2
Halsrest	6	6,6
Akzidenteller Astverschluss	0	0
Akzidenteller Verschluss Muttergefäß	0	0

Tabelle 14: Befunde der postoperativen DSA (n=91)

Da die Perforatoren meist in ihrem Durchmesser zu klein sind, kann mit Hilfe der DSA der Blutfluss in diesen Gefäßen nach dem Aneurysma-Clipping nicht sicher beurteilt werden. Ein direkter Vergleich zwischen den Befunden der postoperativen Angiographie und den intraoperativen Befunden der beiden ICG-VA-Methoden ist also nicht möglich. In sieben Fällen konnte jedoch auf den postoperativen cCT-Bildern, die von jedem Patienten vorliegen, ein kleines Infarktareal durch Verschluss eines Perforators identifiziert werden, die aber klinisch weitestgehend ohne Relevanz blieben und nur in zwei Fällen zu einer transienten Aphasie bzw. transienten Hemiparese führten.

4.14 Kasuistiken

4.14.1 Patientin mit inzidentellem MCA-Aneurysma rechts

Der Verdacht auf ein zerebrales Aneurysma ergab sich durch eine cMRT-Untersuchung zur Abklärung der Schwindelsymptomatik der 50-jährigen Patientin, die ansonsten ohne weitere neurologische Beschwerden war. Die daraufhin durchgeführte DSA der zerebralen Gefäße bestätigte den Verdacht und ergab den Befund eines ca. 6mm großen Aneurysmas an der rechten Mediabifurkation. Eine Indikation zur operativen Versorgung wurde gestellt.

Die OP erfolgte in ITN über eine rechtsseitige, supraorbitale, osteoplastische Kraniotomie (ca. 3,0 x 2,0 cm) in mikrochirurgischer, endoskopisch-assistierter Technik. Vor der Clipapplikation wurde die anatomische Situation mit der mICG-VA und der eICG-VA dargestellt. Das Aneurysma wurde mit einem leicht gebogenen Clip verschlossen und zur Kontrolle des Clipergebnisses wurden erneut die beiden eben genannten Methoden eingesetzt. Diese lieferten jedoch keine einheitlichen Befunde: Während das Aneurysma in der mICG-VA vollständig verschlossen erschien, konnte in der eICG-VA jedoch eine Restperfusion detektiert werden, woraufhin ein zusätzlicher Clip eingesetzt wurde. Der komplette Verschluss konnte nun mit beiden Methoden sowie der Mikrodopplersonographie bestätigt und die Operation beendet werden.

Der postoperative Verlauf gestaltete sich komplikationslos und die Kontrollangiographie zeigte einen regelrechten Verschluss des Aneurysmas ohne Hinweis auf eine Restperfusion (s. Abb. 16).

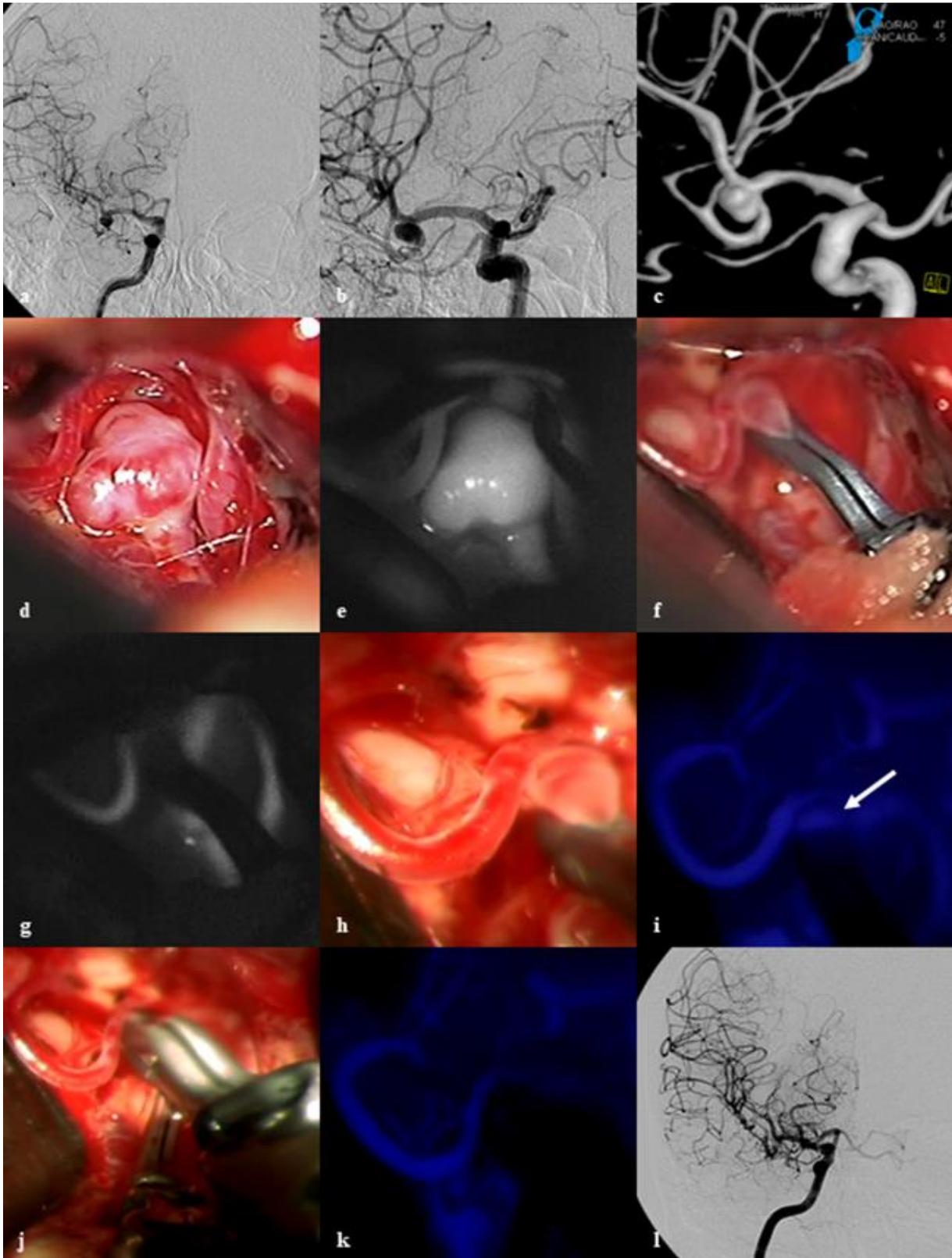
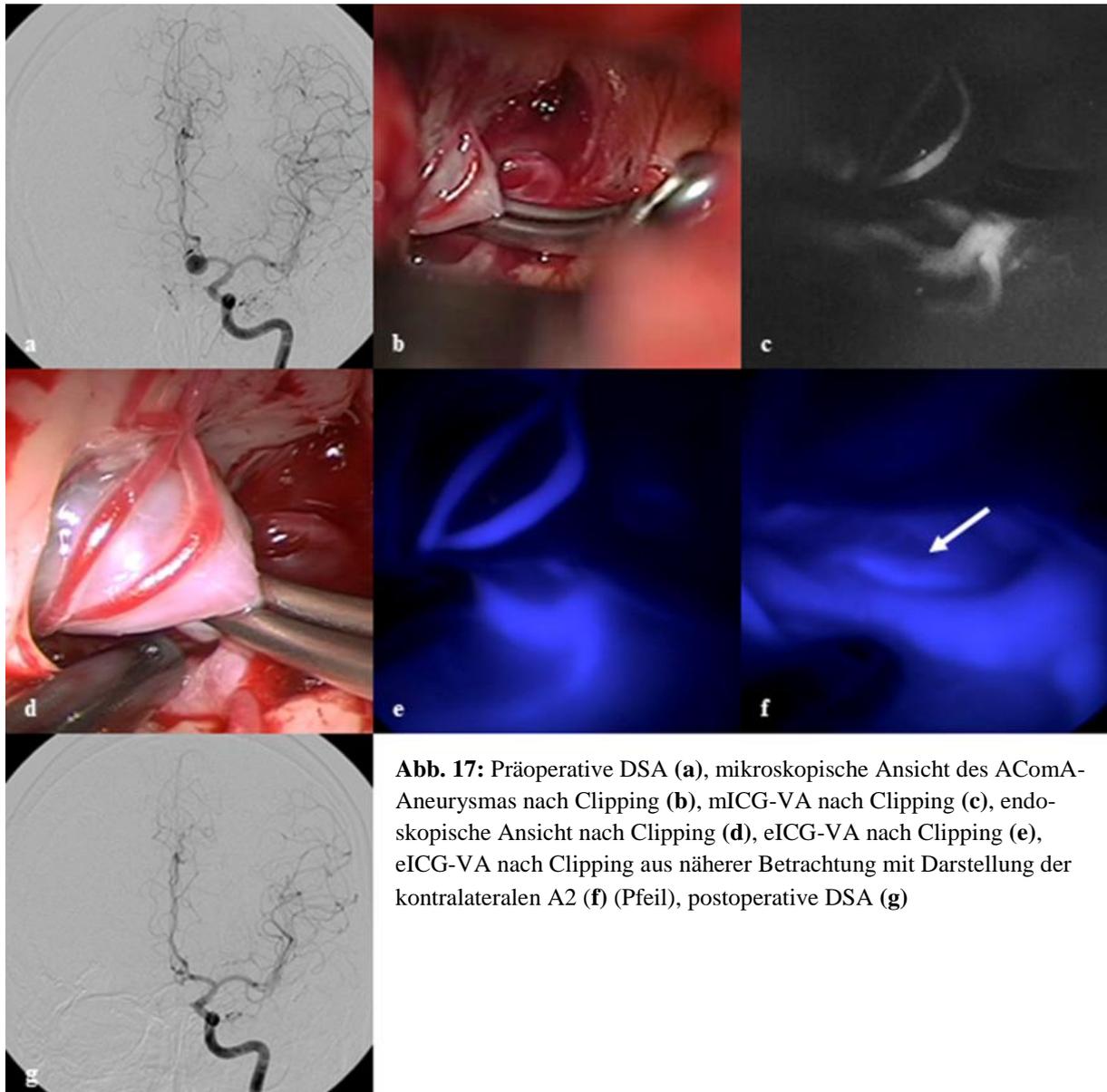


Abb. 16: DSA vor Operation (a, b) mit 3D-Rekonstruktion (c), mikroskopische Ansicht vor Clipping (d), mICG-VA vor Clipping (e), endoskopische Ansicht vor Clipping (f), mICG-VA nach Clipping (g), endoskopische Ansicht nach Clipping (h), eICG-VA nach Clipping zeigt Restperfusion (i) (Pfeil), endoskopische Ansicht nach 2.Clip (j), eICG-VA nach 2.Clip (k), postoperative DSA-Kontrolle (l)

4.14.2 Patientin mit inzidentellem AComA- sowie MCA-Aneurysma rechts

Bei der 30-jährigen Patientin wurde im Rahmen der Abklärung ihrer Schwindel-, Übelkeit- und Kopfschmerzsymptomatik eine cMRT-Aufnahme angefertigt, die den Verdacht auf ein inzidentelles Aneurysma der AComA erbrachte. Eine DSA zeigte neben dem ca. 0,5 x 0,6 cm messenden AComA-Aneurysma auch ein Aneurysma der rechten MCA im M2-Segment mit einer Größe von ca. 2,7 mm. Die Indikation zur operativen Versorgung wurde gestellt. Die OP erfolgte in ITN über eine rechtsseitige, supraorbitale, osteoplastische Kraniotomie (ca. 3,0 x 2,0 cm) in mikrochirurgischer, endoskopisch-assistierter Technik. Zunächst wurde das MCA-Aneurysma nach problemloser Präparation verschlossen und das Ergebnis sowohl mit der mikroskopischen als auch mit der endoskopischen ICG-Videoangiographie überprüft. Mit beiden Methoden konnte gleichwertig gut und sicher gezeigt werden, dass das Aneurysma vollständig verschlossen ist, kein Halsrest vorhanden ist und sowohl die beteiligten Muttergefäße als auch die Äste und Perforatoren regelrecht perfundiert sind. Als nächstes wurde das große AComA-Aneurysma verschlossen. Im Anschluss daran wurden wieder die beiden Methoden der ICG-VA zur Beurteilung des Clipergebnisses verwendet. Hierbei zeigte sich die endoskopische Variante als Überlegen, denn nur mit ihr war letztendlich der sichere Nachweis möglich, dass das kontralaterale A2-Segment in seiner Durchgängigkeit durch die Clipapplikation nicht beeinträchtigt ist und weiterhin suffizient perfundiert ist. Durch die kleine Kraniotomie waren die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes für die Beurteilung des eben genannten Astes zu stark eingeschränkt, um sie mit der mikroskopischen ICG-VA sicher beurteilen zu können. Dadurch, dass das ICG-Endoskop in unmittelbare Nähe der relevanten Strukturen gebracht werden konnte, kam es bei Anwendung dieser Methode zu keiner Einschränkung der Lichtverhältnisse, außerdem hat der visuelle Informationsgewinn aus verschiedenen Blickwinkeln sein Übriges zur Überlegenheit dieser Methode beigetragen. Der postoperative Verlauf war komplikationslos und drei Monate später konnte in der Kontrollangiographie der vollständige und regelrechte Verschluss bestätigt werden (s. Abb. 17).



5 Diskussion

Die Ziele des neurochirurgischen Aneurysmaclippings sind zum einen der vollständige Verschluss des Aneurysmas, sodass es von der Zirkulation ausgeschlossen ist, und zum anderen die unbeeinträchtigte Durchblutung der relevanten beteiligten Gefäßstrukturen. Die Qualität der Operation hängt hiervon entscheidend ab. Akzidentelle Verschlüsse von Muttergefäßen, abgehenden Ästen oder perforierenden Arterien sind entscheidende Gründe für ein schlechtes Ergebnis nach einer Aneurysma-Operation^{9,35}. Ein unvollständiger Aneurysmaverschluss oder Halsrest kann dazu führen, dass das Aneurysma wieder wächst und im schlimmsten Fall (wieder) platzt^{11,19,25}. Das Risiko einer erneuten Ruptur nach stattgehabter SAB ist bei unvollständig versorgten Aneurysmen sogar noch höher als bei nicht versorgten^{57,66}. Die Standardtechnik, um die anatomischen Verhältnisse zu beurteilen und den vollständigen Aneurysmaverschluss zu bestätigen, ist die postoperative DSA. Postoperativ entdeckte unerwünschte Befunde können eine erneute Operation mit Veränderung der Clipposition nötig machen, allerdings sind die Ergebnisse dieser korrigierenden Eingriffe limitiert. Im Falle von akzidentellen Gefäßverschlüssen ist es oft auch schon zu spät, um permanente neurologische Defizite zu vermeiden³⁵. Die Rate an postoperativ entdeckten Aneurysmaresten wird in der Literatur mit 2-8%^{1,4,6,15,20,35,36}, Halsreste mit 4-19%^{3,13,35,45,49,58} und akzidentelle Verschlüsse von beteiligten Gefäßstrukturen mit 0,3-12% angegeben^{3,13,35,45,49}. Diese Erkenntnisse zeigen, dass es einen enormen Vorteil bietet, bereits intraoperativ das Clipergebnis und die Durchblutung in den beteiligten Gefäßen zu beurteilen. So kann bei Bedarf sofort interveniert werden und die Clipposition verändert bzw. zusätzliche Clips appliziert werden. Viele Autoren sehen die intraoperativ durchgeführte DSA als die Methode der Wahl an, wenn es darum geht, einen nicht korrekt platzierten Clip unmittelbar erkennen und korrigieren zu können und schlagen ihren routinemäßigen bzw. selektiven Einsatz vor^{32,40,43,63}. Diese Methode ist aber nicht in die Routine übergegangen, denn sie ist teuer, invasiv, technisch anspruchsvoll, nur begrenzt verfügbar, erfordert zusätzliches Personal und kostet zusätzliche OP-Zeit^{30,32}. Außerdem ist auch sie nicht fehlerfrei, da es auch trotz ihres intraoperativen Einsatzes zu unerwünschten postoperativen Befunden kommen kann. Bei Payner *et al.* wurden zum Beispiel nach intraoperativer Angiographie postoperativ in 3,2% der Fälle unvollständige Aneurysmaverschlüsse und in 1,9% der Fälle Astverschlüsse gefunden⁴⁰. Zwei weniger invasive und leichter verfügbare alternative Techniken der intraoperativen Gefäßdarstellung sind die bereits seit einigen Jahren etablierte mikroskopische und auch die endoskopische ICG-VA.

In den vielen bis jetzt zu dem Thema veröffentlichten Studien hat sich die mikroskopische ICG-VA als eine einfache, sichere, schnell und wiederholt durchführbare, kostengünstige, leicht reproduzierbare Methode erwiesen, die eine hohe räumliche Auflösung aufweist^{5,10,17,27,48,62}. Ihr Vorteil liegt vor allem in der Möglichkeit, auch kleine Gefäße mit einem Durchmesser unter 1,0 mm darstellen zu können, wie zum Beispiel kleine kortikale oder perforierende Arterien. Dieses ist mittels einer DSA aufgrund der schlechteren Auflösung und durch die mikrovaskuläre Dopplersonographie nicht bzw. schwierig möglich^{10,17,48,62}. Außerdem ist eine Beurteilung des Aneurysmahalses zum Ausschluss von Residuen möglich, was mit der mikrovaskulären Dopplersonographie nicht suffizient gelingt¹⁷. Auf diese Weise ist bereits nach weniger als zwei Minuten ein Ergebnis vorhanden. So ist es dem Operateur möglich, im Falle eines akzidentellen Gefäßverschlusses innerhalb weniger Minuten durch Reposition des Clips zu intervenieren, bevor eine schwere zerebrale Ischämie und möglicherweise irreversible Schäden entstehen^{5,27,47,48,62}. Fischer *et al.* haben in ihrer Studie, in der die ICG-VA mit der mikrovaskulären Dopplersonographie verglichen wurde, gezeigt, dass die ICG-VA mit dem Operationsmikroskop vor allem bei der Beurteilung tiefer gelegener Gefäßstrukturen und bei kleinen Kraniotomien an ihre Grenzen stößt und eine suffiziente Darstellung und Beurteilung in diesen Fällen oft nicht oder nur inadäquat möglich ist¹⁷. Auch in anderen Studien zeigte sich eine Einschränkung bei tiefer gelegenen Strukturen^{5,10}.

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, wie sich die Methode der endoskopischen ICG-VA im Vergleich zu der bereits seit einigen Jahren etablierten mikroskopischen Variante darstellt, was zu Beginn der Datenerfassung in der Literatur noch nicht zu finden war.

5.1 Darstellbarkeit und Beurteilbarkeit der Gefäßstrukturen

5.1.1 Beurteilung des vollständigen Aneurysmaverschlusses

Von den hier erfassten 108 Aneurysmen konnten 94,4% nach der Clipapplikation mittels der mICG-VA bezüglich ihres vollständigen Verschlusses beurteilt werden. Mit der in das Endoskop integrierten Variante gelang es sogar in 99,1% der Fälle, anders gesagt in allen Fällen, in denen die eICG-VA angewendet werden konnte. In einer zuvor veröffentlichten Studie von Fischer *et al.* konnten 90% der Aneurysmen hinsichtlich ihres Verschlusses mittels der mikroskopischen ICG-VA evaluiert werden¹⁷. Bei den Fällen der gegenwärtigen Analyse, in denen das Endoskop dem Mikroskop überlegen war, handelte es sich um tief lokalisierte Aneurysmen (BA, AChoA) oder einen supraorbitalen Zugangsweg, da die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes für die mikroskopische Methode zu eingeschränkt waren. In einem

Fall hatte die zusätzliche Evaluation mit der eICG-VA entscheidenden Einfluss auf die Operation. Denn nur durch sie konnte die Restperfusion eines Aneurysmas nach dem Clipping detektiert werden, was sich zuvor mit der mICG-VA nicht darstellen ließ. Durch sofortige Applikation eines weiteren Clips konnte der vollständige Aneurysmaverschluss erreicht werden. Somit konnte durch die ICG-VA mit dem Endoskop ein inkompletter Verschluss verhindert werden. Insgesamt ließen sich mit der mikroskopischen vier und mit der endoskopischen ICG-VA fünf Restperfusionsen nach Clipapplikation detektieren. Die Darstellung des kompletten Aneurysmaverschlusses war bei den hier erfassten Fällen nicht immer korrekt, denn in der postoperativen DSA-Kontrolle zeigten sich zwei Restperfusionsen (2,2%) im jeweiligen Dom des Aneurysmas, welche eine Nachbehandlung mittels erneuter OP bzw. Coilings bedurften. Diese beiden Aneurysmen zeigten sich intraoperativ sowohl mit der mikroskopischen als auch mit der endoskopischen ICG-VA als vollständig obliteriert. Der Anteil der inkomplett verschlossenen Aneurysmen in der postoperativen DSA-Kontrolle dieser Arbeit liegt innerhalb des in der Literatur angegebenen Wertes von 0-3%^{10,17,33,55} nach Aneurysmaclipping mit alleiniger intraoperativer Evaluation mittels mICG-VA.

5.1.2 Beurteilung des Aneurysmahalses

Die suffiziente Darstellung und Beurteilung des Aneurysmahalses und somit die Evaluation seines korrekten Verschlusses war in dieser Auswertung mit der in das OP-Mikroskop integrierten ICG-VA in 69,4% der Fälle möglich. Mit der endoskopischen Methode konnten 88,9% der Aneurysmahäse dargestellt und beurteilt werden. In einer vorherigen Studie konnte mit der mICG-VA ein Ergebnis von 82% erzielt werden¹⁷. Bei der Evaluation des Aneurysmahalses gab es in dieser Arbeit den größten Unterschied zwischen den beiden Techniken. Generell gibt es verschiedene Faktoren, die es dem Neurochirurgen erschweren, nach der Clipapplikation den Bereich des Aneurysmahalses mittels intraoperativer ICG-VA hinsichtlich seines vollständigen Verschlusses zu beurteilen. Zum einen ist es der Abschnitt der Gefäßpathologie, der von den Branchen des Clips umfasst wird. Dieses limitiert die Sichtbarkeit einer möglichen Restperfusion. Zum anderen ist die Rückseite des Halses mit dem Mikroskop entweder gar nicht oder nur mit Manipulation und Retraktion am Aneurysma einsehbar. Das ist ebenfalls der Fall, wenn er hinter anderen Strukturen versteckt ist. Hierbei konnte ein Vorteil der eICG-VA gesehen werden, da es so möglich war, den Blickwinkel zu verändern und in einem gewissen Ausmaß „um die Ecke“ zu blicken. Auch bei sehr kleinen Halsresten, die aufgrund von schlechten Lichtverhältnissen mit der mICG-VA schlechter oder gar nicht detektiert werden konnten, konnten zum Teil mit der endoskopischen Variante

sicherer dargestellt werden, da das Endoskop direkt an den Ort des Interesses gebracht werden konnte und somit bessere Lichtverhältnisse und ein vergrößertes Bild mit besserer Auflösung erzielt wurden. Mit Hilfe der mICG-VA konnten in dieser Arbeit insgesamt acht Halsreste intraoperativ entdeckt werden, mit der eICG-VA waren es zwei mehr. So konnten durch deren zusätzlichen Einsatz und sofortiges Intervenieren im Sinne einer Clipreposition zwei Halsreste verhindert werden. Nichtsdestotrotz zeigten sich in der postoperativen DSA-Kontrolle sechs Halsreste (6,6%), die allerdings jeweils so klein waren, dass sie vorerst keiner Nachbehandlung bedurften und regelmäßig radiologisch kontrolliert werden. Diese Zahl deckt sich mit dem in der Literatur angegebenen Anteil an Halsresten als unerwünschte postoperative Befunde nach Aneurysmaclipping mit alleiniger intraoperativer Evaluation durch die mICG-VA von 0,9-9,1%^{10,17,39,52,55}. Von den sechs postoperativen Halsresten war in vier Fällen intraoperativ der Bereich des Aneurysmahalses mit beiden Methoden nicht einsehbar, in den anderen beiden Fällen wohl. Jedoch konnte die Restperfusion jeweils nicht detektiert werden. Intraoperativ unentdeckte Halsreste werden als ein Hauptnachteil der mICG-VA angesehen⁵², treten regelmäßig auf und machen eine Verbesserung der bisherigen Evaluationsmethoden erforderlich. Die endoskopische Variante zeigte sich hierbei zwar als überlegen, aber auch sie war in den hier erfassten Fällen nicht unfehlbar. Aufgrund der durch diese Arbeit gewonnen Ergebnisse und der Tatsache, dass die Beurteilung des Aneurysmahalses mit der Mikrodopplersonographie nicht möglich ist¹⁷, dürfte sie sich jedoch aktuell am besten als Alternative zur intraoperativen DSA eignen.

5.1.3 Beurteilung der Muttergefäße

Die intraoperative Beurteilung der Muttergefäße nach der Clipapplikation war in dieser Arbeit mit der mICG-VA in 96,1% der Fälle und mit der eICG-VA in 99,2% der Fälle möglich. Das Endoskop erwies sich hierbei bei tief lokalisierten Aneurysmen und bei kleinen Kraniotomien als überlegen. In einer zuvor veröffentlichten Studie von Fischer *et al.* konnten 92,3% dieser Gefäßstrukturen mit der mikroskopischen Variante sicher dargestellt werden¹⁷. Intraoperativ konnte bei den erfassten Operationen sowohl mit der mICG-VA als auch mit der eICG-VA kein akzidenteller Verschluss nachgewiesen werden. Auch postoperativ wurde in der Kontrollangiographie keiner dieser unerwünschten Befunde detektiert (nach Aneurysmaclipping mit intraoperativer Evaluation durch mICG-VA in Literatur ebenfalls 0%^{10,17,52}). Das zeigt zum einen, dass keine akzidentellen Verschlüsse von Muttergefäßen aufgetreten sind und zum anderen, dass diese Tatsache durch beide Methoden korrekt evaluiert werden konnte. Die Ergebnisse dieser Arbeit und die Angaben der Literatur zeigen,

dass akzidentelle Beeinträchtigungen der Muttergefäße nach der Clipapplikation sehr selten vorkommen und wenn sie auftreten, dann waren sie bis jetzt auch mit der mICG-VA sicher darstellbar und konsekutiv korrigierbar. Die endoskopischen ICG-VA lieferte in dieser Arbeit zwar bessere Ergebnisse, allerdings wären auch ohne die zusätzliche Anwendung die postoperativen Befunde gleich gewesen.

5.1.4 Beurteilung der abgehenden Äste

In dieser Arbeit konnten 92,7% der vorhandenen angehenden Äste mit der mikroskopischen ICG-VA und 99,0% mit der endoskopischen ICG-VA sicher dargestellt und beurteilt werden. In der Studie von Fischer *et al.* war das mit der mICG-VA in 87,6% der Fälle möglich¹⁷. Einen relevanten Einfluss auf die Aneurysma-Operation und mutmaßlich auch auf das Outcome des jeweiligen Patienten hatte der zusätzliche Einsatz des ICG-Endoskops in dieser Erhebung in zwei Fällen. Mit der mICG-VA konnten intraoperativ ein akzidenteller Astverschluss nach Clipapplikation detektiert werden, mit der eICG-VA zwei zusätzliche. So konnten durch entsprechende sofortige Clipreposition mit Hilfe der endoskopischen Variante zwei akzidentelle Astverschlüsse verhindert werden. Die postoperative DSA-Kontrolle bestätigte dieses, da keiner dieser unerwünschten Befunde nachgewiesen werden konnte. In der Literatur sind postoperativ gefundene Astverschlüsse nach Anwendung der mICG-VA mit einer Häufigkeit von 0-6% beschrieben^{10,17,52,55}.

5.1.5 Beurteilung der beteiligten perforierenden Arterien

Die suffiziente Darstellung und Beurteilung des Blutflusses in den vorhandenen beteiligten perforierenden Arterien gelang mit der mICG-VA in 82,0% und mit der eICG-VA in 86,9% der Fälle. Mit der mikroskopischen Variante konnten Fischer *et al.* ein Ergebnis von 89,1% erzielen¹⁷. Obwohl das ICG-Endoskop auch hierbei die besseren Ergebnisse lieferte, kam diese Methode im Rahmen der Beurteilung der Perforatoren am stärksten an seine Grenzen. Intraoperativ zeigte sich mit beiden Varianten der ICG-VA kein akzidenteller Verschluss der perforierenden Arterien, jedoch konnten in der postoperativen cCT-Kontrolle in sieben Fällen kleine ischämische Areale im Versorgungsgebiet von perforierenden Arterien nachgewiesen werden, die jedoch klinisch weitestgehend ohne Relevanz blieben. Von diesen sieben Fällen waren in vier Fällen intraoperativ die beteiligten Perforatoren mit beiden Methoden nicht darstellbar, in den anderen drei Fällen schon, allerdings ohne Hinweis auf eine eingeschränkte Perfusion. In der Literatur liegt der Anteil an postoperativ detektierten Ischämien in Perforatorarealen nach Clipping mit Hilfe der mICG-VA bei 6,7%¹². Der zusätzliche Einsatz

des ICG-Endoskops zur intraoperativen Evaluation des Clipergebnisses hatte in dieser Arbeit also keinen relevanten Einfluss bezüglich der Darstellung der perforierenden Arterien. Die eICG-VA lieferte zwar keine optimalen Ergebnisse im Rahmen der Evaluation des Blutflusses in den perforierenden Arterien nach der Clipapplikation, allerdings erscheint sie in Anbetracht der bislang publizierten Ergebnisse bisher die beste Methode hierfür zu sein. Die intraoperative DSA eignet sich nicht zur Darstellung der Perforatoren, da diese Gefäße meist zu klein sind (<1,0 mm) um mit der Methode dargestellt werden zu können. Auch die mikrovaskuläre Dopplersonographie ist bei diesen kleinen Arterien nur eingeschränkt anwendbar^{10,17,48,62}.

5.2 Vergleich mit der postoperativen DSA

Von den insgesamt 108 operativ mit Hilfe der eICG-VA und mICG-VA versorgten Aneurysmen liegen in 84,3% der Fälle postoperative DSA-Befunde vor. In 91,2% dieser Fälle konnte nach dem Aneurysmaclipping ein regelrechter Verschluss, also ein vollständig verschlossenes Aneurysma mit uneingeschränktem Blutfluss in den beteiligten Muttergefäßen und abgehenden Ästen bestätigt werden. In der Literatur liegt der Wert nach Clipping mit intraoperativer mICG-VA bei 90-100%^{12,28,33,34,47,48,62}. Auch die schon oben genannten Anteile an postoperativ unerwünschten Befunden in der Angiographie, wie Restperfusion im Aneurysma, Halsreste, akzidentelle Gefäßverschlüsse, liegen jeweils innerhalb der in der Literatur zu findenden Angaben.

5.3 Komplikationen

5.3.1 Spezifische Komplikationen

In dieser Studie kam es in keinem der Fälle zu Komplikationen, die auf den Einsatz der ICG-VA oder des Endoskops zurückzuführen sind. In der Literatur sind die Komplikationen durch die Verwendung des Fluoreszenzfarbstoffes mit 0,05-0,2% angegeben^{5,46}, allerdings sind in den Studien zur Verwendung der ICG-VA in der vaskulären Neurochirurgie keine Komplikationen aufgetreten^{10,12,17,33,39,46,47,48,62}.

5.3.2 Intraoperative Aneurysmaruptur

Die Ruptur eines Aneurysmas während der Operation ereignete sich nur in einem Fall. Genaueres ist dem Kapitel 4.12.3 zu entnehmen. In den Studien zum Einsatz des starren Endoskops bei neurochirurgischen Aneurysma-OPs wird die Häufigkeit einer intraoperativen

Ruptur während der Präparation mit 1,3-5,2% angegeben^{29,41,44,65}, in nur einem Fall war sie direkt auf die Anwesenheit des Endoskops zurückzuführen²⁹.

5.4 Vor- und Nachteile der beiden Methoden

5.4.1 Vorteile der eICG-VA

Die Vorteile der endoskopischen ICG-VA liegen vor allem in der Darstellung und Beurteilung tief gelegener und somit weit von der Kraniotomie entfernter Aneurysmen und anderer Gefäßstrukturen. Dadurch, dass das Endoskop nahe an den Ort des Interesses gebracht werden kann, werden so die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes verbessert, die mit dem OP-Mikroskop schlechter oder gar nicht zu visualisieren sind. Das wiederum kommt der Induktion und Detektion der Fluoreszenz zugute. Auch bei der Betrachtung durch kleine Kraniotomien, vor allem bei Verwendung des supraorbitalen Zugangs, bietet das Endoskop einen deutlichen Vorteil, da durch diese sogenannten Schlüssellochzugänge der Betrachtungswinkel reduziert ist und ebenfalls die Lichtverhältnisse in der Tiefe eingeschränkt sind. Die endoskopische ICG-VA ermöglicht eine detailliertere Inspektion aus naher Position und einen erweiterten Blickwinkel, sodass verborgene Strukturen ohne zusätzliche Retraktion und Manipulation sichtbar gemacht werden können. So können auch hinter dem Aneurysma gelegene Strukturen sicherer dargestellt und beurteilt werden. Der Operateur erhält also ohne weitere Manipulation einen zusätzlichen visuellen Informationsgewinn, sodass zumindest theoretisch die Rupturgefahr reduziert wird. Durch eine bessere Auflösung ist das Bild, das bei der ICG-VA mit dem Endoskop entsteht, schärfer und detaillierter, was wiederum zu einer erhöhten Sicherheit bei der Beurteilung beiträgt. In einigen Fällen war dieses jedoch aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht der Fall. In dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die endoskopische Variante der mikroskopischen vor allem bei der Beurteilung des Aneurysmahalses überlegen ist.

5.4.2 Nachteile der eICG-VA

Als nachteilig haben sich der relativ große Außendurchmesser (5,8 mm) und der lange Schaft (19 cm) des hier verwendeten Endoskops herauskristallisiert, denn dadurch ist die Handlichkeit erschwert. Außerdem muss der Operateur ein hohes Maß an Erfahrung im Umgang mit dem Endoskop und der endoskopischen Anatomie mitbringen, um die endoskopische Variante der ICG-VA anwenden zu können. Die Endoskop-Kamera des hier benutzten Gerätes kann die Fluoreszenz des ICGs nicht detektieren, wenn das Licht des

Operationsmikroskops das OP-Feld beleuchtet. Daher muss das Mikroskop vor der Durchführung der endoskopischen ICG-VA zur Seite geschwenkt werden, sodass sein Licht nicht mehr auf das zu untersuchende Gebiet gerichtet ist. Das wiederum hat zur Folge, dass das Endoskop ohne Beleuchtung des OP-Gebietes und ohne mikroskopische Kontrolle an die zu untersuchenden Gefäßstrukturen platziert wird. In einigen Fällen war das Bild, das bei der eICG-VA entstanden ist, aufgrund technischer Probleme unscharf. Diese inkonstante Bildqualität ist ebenfalls als nachteilig zu erwähnen.

5.4.3 Vorteile der mICG-VA

Ein Vorteil der mikroskopischen Variante der ICG-VA ist, dass kein zusätzliches Gerät benötigt wird. Dadurch, dass die Technik in das sowieso verwendete OP-Mikroskop integriert ist, bedarf es lediglich eines Umschaltens in den entsprechenden Modus und die intraoperative Fluoreszenzangiographie kann nach Injektion des ICG durchgeführt werden. Das bedeutet auch, dass der Operateur keine zusätzlichen Erfahrungen aufweisen muss, da er mit dem OP-Mikroskop und der mikroskopischen Anatomie vertraut ist.

5.4.4 Nachteile der mICG-VA

Im Vergleich zur endoskopischen ICG-VA hat sich die mikroskopische Variante vor allem in Fällen von kleinen Kraniotomien (v.a. supraorbitaler Zugang) und/oder bei der Beurteilung von tief lokalisierten und somit relativ weit von der Kraniotomie entfernten Gefäßstrukturen (z.B. Aneurysmen der BA, AChoA oder AComA) als nachteilig erwiesen. Dadurch, dass sich bei Anwendung des Mikroskops die Lichtquelle außerhalb der Kraniotomie befindet, waren die Lichtverhältnisse in der Tiefe des OP-Feldes und somit am Ort des Interesses zum Teil so limitiert, dass die Induktion der Fluoreszenz nicht ausreichend und auch die Detektion dieser somit insuffizient war.

Ein weiterer Nachteil der mICG-VA ist, dass keine Veränderung des Blickwinkels möglich ist und dass verdeckte Strukturen nur durch Manipulation und Retraktion sichtbar werden können. Je kleiner die verwendete Kraniotomie ist, desto kleiner ist auch der Bereich, der vom Operateur eingesehen werden kann. In dieser Arbeit weist die mikroskopische Methode vor allem bei der Beurteilung des Aneurysmahalses im Vergleich zur endoskopischen ICG-VA die größten Differenzen auf.

5.5 Aktuelle Literatur zur ICG-VA mit dem Endoskop

Zu Beginn dieser Arbeit gab es in der Literatur keinerlei Veröffentlichung zur klinischen Anwendung eines ICG-Endoskops in der Aneurysmachirurgie, aber während der Datenerhebung wurden im Juni bzw. August 2012 zwei Berichte über die ersten klinischen Erfahrungen mit dieser neuen Methode der intraoperativen Gefäßdarstellung im Rahmen einer bzw. dreier Operationen von Bruneau *et al.* und Nishiyama *et al.* publiziert^{8,38}. Außerdem veröffentlichten Mielke *et al.* 2014 die erste Studie, die den Vergleich zwischen der mikroskopischen und endoskopischen ICG-VA behandelt³⁷.

Bisher wurde die ICG-VA mit dem Endoskop als eine hilfreiche Weiterentwicklung der mikroskopischen Variante beschrieben. Sie hat das Potenzial, das neurochirurgische Aneurysmaclipping zu verbessern und die postoperative Morbidität durch akzidentelle Gefäßstenosierungen und konsekutiven Ischämien zu reduzieren. Im Gegensatz zu der mICG-VA kann das Endoskop direkt an die zu beurteilenden Strukturen gebracht werden und somit eine höhere Vergrößerung, bessere Auflösung, bessere Lichtverhältnisse und eine nähere Perspektive erzielt werden. Außerdem kann mit ihm der Blickwinkel erweitert und verändert werden, wodurch auch schwer einzusehende Bereiche, die unter mikroskopischer Sicht versteckt sind, ohne vermehrte Manipulation beurteilt werden können. So können also zusätzliche Informationen erhalten werden^{8,37,38}. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die intraarterielle Fluoreszenz mit dem Endoskop ca. 10mal länger visualisiert werden konnte als mit dem Mikroskop³⁷. Nishiyama *et al.* sahen die eICG-VA vor allem als Erleichterung, wenn es um die intraoperative Beurteilung des Blutflusses in den perforierenden Arterien und Muttergefäßen, die hinter dem Aneurysma versteckt liegen, geht³⁸. Mielke *et al.* beschrieben, dass die intraoperative Detektion zweier Halsreste nur mit der eICG-VA gelang³⁷. Es wurden keine Komplikationen beschrieben, die auf die eICG-VA zurückzuführen sind^{37,38}.

Die bislang beschriebenen Nachteile des ICG-Endoskops beziehen sich vor allem auf das Handling. Die verwendeten Endoskope waren in ihrem Durchmesser von 4,0 mm bzw. 5,8 mm relativ groß, sodass es teilweise schwierig war, sie bei limitierten Platzverhältnissen am gewünschten Ort zu platzieren^{8,38}. Außerdem wurde als nachteilig erwähnt, dass die verwendeten Filter das Licht des OP-Mikroskops nicht herausfiltern können und das Mikroskop vor der Durchführung der eICG-VA zur Seite geschwenkt werden muss⁸. Die bisher in der Literatur beschriebenen Erfahrungen mit der endoskopischen ICG-VA decken sich mit denen, die in dieser Arbeit gewonnen wurden.

5.6 Kritikpunkte

5.6.1 Stärken dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 108 operativ verschlossene intrakranielle Aneurysmen erfasst, bei denen zur intraoperativen Evaluation neben der mICG-VA ebenfalls die eICG-VA zur Anwendung kam. Es war unerheblich, wo die Aneurysmen lokalisiert waren, wie sie konfiguriert waren, ob sie rupturiert oder inzidentell waren, wie viele Aneurysmen pro Operation versorgt wurden und ob eine Vorbehandlung stattgefunden hat oder nicht. Somit wird also weitestgehend das normale Kollektiv der operativ versorgten Aneurysmen wiedergespiegelt.

Eine optimale Vergleichbarkeit wurde dadurch erreicht, dass die beiden Methoden jeweils während derselben Operation, also durch denselben Operateur, unter Verwendung desselben operativen Zugangswegs und unter denselben anatomischen Gegebenheiten verglichen werden konnten.

5.6.2 Schwachpunkte dieser Arbeit

Der größte Schwachpunkt dieser Arbeit ist sicherlich, dass bei den erfassten Fällen eine Vorselektion erfolgte. Ausgewertet wurden die Aneurysmen, bei deren operativer Versorgung neben der mikroskopischen zusätzlich auch die endoskopische ICG-VA zur intraoperativen Evaluation des Clipergebnisses verwendet wurden. Die endoskopische Variante kam jedoch nur zusätzlich zum Einsatz, wenn der Operateur einen zusätzlichen Informationsgewinn erwartete. Somit ist nur ein Teil der in dem Zeitraum zwischen Januar 2011 und Januar 2015 durchgeführten Aneurysma-Operationen eingeschlossen worden. Die Aussagekraft der erhobenen Ergebnisse ist somit limitiert.

Bislang gibt es in der Literatur keine Studie mit einer größeren Fallzahl, allerdings ist die hier erfasste Anzahl von Aneurysmen (n=108) sicherlich trotzdem zu gering, um definitive Aussagen treffen zu können.

Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass nur in 85% der Fälle ein postoperativer Befund der Kontroll-DSA vorliegt. Somit konnte nicht für jedes versorgte Aneurysma evaluiert werden, inwieweit der intraoperative ICG-VA-Befund mit dem Ergebnis der postoperativen DSA korreliert, die den Goldstandard darstellt, wenn es um die Beurteilung des Clipergebnisses geht.

5.6.3 Neue Aspekte dieser Arbeit

Bislang gibt es in der Literatur, außer zwei Fallberichten^{8,38}, eine Studie mit ähnlicher Fragestellung³⁷. In der vorliegenden Arbeit ist allerdings die Fallzahl bzw. die Anzahl der untersuchten Aneurysmen deutlich größer (n=30 vs. n=108). Dadurch ist auch die Breite der Aneurysmalokalisationen größer, sodass auch Aneurysmen der hinteren Zirkulation (BA und PICA, je n=3) erfasst sind. Das ist in den vorherigen Publikationen nicht der Fall. Zudem wurde für die Aneurysma-Operationen in dieser Auswertung in fast der Hälfte der Fälle ein supraorbitaler, also ein sog. Schlüssellochzugang, gewählt. Speziell diese Zugangsvariante wurde neben anderen hier erfassten in den zuvor publizierten Studien nicht verwendet. Des Weiteren ist die Art des Vergleichs ein neuer Aspekt. Bisher wurden die beiden Methoden noch nicht miteinander verglichen, indem untersucht wurde, wie viele der vorhandenen Strukturen eines jeden Aneurysmas mit der jeweiligen Methode darstellbar und beurteilbar waren. Auch über die postoperativen Angiographiebefunde nach intraoperativer Evaluation mittels endoskopischer ICG-VA wurde bis jetzt in der Literatur kaum etwas berichtet.

5.7 Schlussfolgerung

Die Methode der in das Endoskop integrierten ICG-VA ist eine sinnvolle Weiterentwicklung der bereits etablierten mikroskopischen Variante. In dieser Arbeit konnten insgesamt alle am Aneurysma beteiligten Gefäßstrukturen jeweils mit der endoskopischen ICG-VA in mehr Fällen als mit der mICG-VA dargestellt und beurteilt werden. Gerade bei der Beurteilung des Aneurysmahalses gab es den größten Unterschied zwischen den beiden Methoden. Aber gerade hierbei sowie bei der Beurteilung der kleinen perforierenden Arterien zeigte sich, dass auch das ICG-Endoskop nicht unfehlbar ist. Seine Stärken liegen vor allem in der Evaluation tiefer gelegener Gefäßstrukturen, wie Aneurysmen der BA, AChOA oder ICA, und/oder bei der Verwendung kleiner Kraniotomien. Es ermöglicht vor allen in diesen Fällen bessere Lichtverhältnisse, ein vergrößertes Bild und eine bessere Bildauflösung. Durch einen erweiterten Blickwinkel können auch versteckte Strukturen besser dargestellt werden, wodurch das Ausmaß an dafür erforderlicher Manipulation und Retraktion an den Gefäßstrukturen und somit die Rupturgefahr -zumindest theoretisch- reduziert werden kann. Insgesamt konnten in dieser Arbeit durch den Einsatz des ICG-Endoskops ein unvollständiger Aneurysmaverschluss, zwei Halsreste und zwei akzidentelle Astverschlüsse verhindert werden. Die Entwicklung eines Endoskops mit kleinerem Durchmesser, die Möglichkeit der gleichzeitigen Verwendung des Mikroskops und eine verbesserte Technik mit konstanter guter Bildqualität könnten diese Methode noch verbessern.

Bislang gibt es keine Methode der intraoperativen Gefäßdarstellung, die fehlerfrei ist und mit Hilfe derer sich alle unerwünschten Befunde verhindern lassen. Aber der zusätzliche Einsatz der endoskopischen ICG-VA könnte die Qualität der Aneurysmachirurgie erhöhen und zu einer reduzierten OP-assoziierten Morbidität und Mortalität beitragen. Jedoch sind weitere Studien erforderlich, um fundiertere und generellere Aussagen treffen zu können.

6 Literaturverzeichnis

1. Acevedo JC, Turjman F, Sindou M (1997) Postoperative arteriography in surgery for intracranial aneurysm. Prospective study in a consecutive series of 267 operated aneurysms. *Neurochirurgie* 43:275-284
2. Alander JT, Kaartinen I, Laasko A, Pättilä T, Spillmann T, Tuchin VV, Venermo M, Välisuo P (2012) A review of indocyanine green fluorescent imaging in surgery. *Int J Biomed Imaging*. Epub 2012 Apr 22
3. Alexander TD, Macdonald RL, Weir B, Kowalczyk A (1996) Intraoperative angiography in cerebral aneurysm surgery: a prospective study of 100 craniotomies. *Neurosurgery* 39:10-17
4. Allcock JM, Drake CG (1963) Postoperative angiography in cases of ruptured intracranial aneurysm. *J Neurosurg* 20:752-759
5. Balamurugan S, Agrawal A, Kato Y, Sano H (2011) Intra operative indocyanine green video-angiography in cerebrovascular surgery: An overview with review of literature. *Asian J Neurosurg* 6:88-93
6. Barrow DL, Boyer KL, Joseph GJ (1992) Intraoperative angiography in the management of neurovascular disorders. *Neurosurgery* 30:153-159
7. Brisman JL, Song JK, Newell DW (2006) Cerebral aneurysms. *N Engl J Med* 355:928-939
8. Bruneau M, Appelboom G, Rynkowski M, Van Cutsem N, Mine B, De Witte O (2013) Endoscope-integrated ICG technology: first application during intracranial aneurysm surgery. *Neurosurg Rev* 36:77-84; discussion 84-85
9. Carter BS, Buckley D, Ferraro R, Rordorf G, Ogilvy CS (2000) Factors associated with reintegration to normal living after subarachnoid hemorrhage. *Neurosurgery* 46:1326-1333

10. Dashti R, Laakso A, Niemelä M, Porras M, Hernesniemi J (2009) Microscope-integrated near-infrared indocyanine green videoangiography during surgery of intracranial aneurysms: the Helsinki experience. *Surg Neurol* 71:543-550
11. David CA, Vishteh AG, Spetzler RF, Lemole M, Lawton MT, Partovi S (1999) Late angiographic follow-up review of surgically treated aneurysms. *J Neurosurg* 91:396-401
12. de Oliveira JG, Beck J, Seifert V, Teixeira MJ, Raabe A (2007) Assessment of flow in perforating arteries during intracranial aneurysm surgery using intraoperative near-infrared indocyanine green videoangiography. *Neurosurgery* 61:63-72; discussion 72-73
13. Drake CG, Allcock JM (1973) Postoperative angiography and the "slipped" clip. *J Neurosurg* 39:683-689
14. Drake CG (1988) Report of World Federation of Neurological Surgeons Committee on a Universal Subarachnoid Hemorrhage Grading Scale. *J Neurosurg* 68:985-986
15. Feuerberg I, Lindquist C, Lindqvist M, Steiner L (1987) Natural history of postoperative aneurysm rests. *J Neurosurg* 66:30-34
16. Fischer G, Oertel J, Perneczky A (2012) Endoscopy in aneurysm surgery. *Neurosurgery* 70:184-190
17. Fischer G, Stadie A, Oertel JM (2010) Near-infrared indocyanine green videoangiography versus microvascular Doppler sonography in aneurysm surgery. *Acta Neurochir (Wien)* 152:1519-1525
18. Fischer J, Mustafa H (1994) Endoscopic-guided clipping of cerebral aneurysms. *Br J Neurosurg* 8:559-565
19. Fogelholm R, Hernesniemi J, Vapalahti M (1993) Impact of early surgery on outcome after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. A population-based study. *Stroke* 24:1649-1654

20. Friedman WA, Kaplan BL, Day AL, Sybert GW, Curran MT (1987) Evoked potential monitoring during aneurysm operation: observations after fifty cases. *Neurosurgery* 20:678-687
21. Fries G, Perneczky A (1998) Endoscope--assisted brain surgery: part 2-analysis of 380 procedures. *Neurosurgery* 42:226-231; discussion 232-232
22. Frösen J, Tulamo R, Paetau A, Laaksamo E, Korja M, Laakso A, Niemelä M, Hernesniemi J (2012) Saccular intracranial aneurysm: pathology and mechanisms. *Acta Neuropathol* 123:773-786
23. Greenberg MS (ed) (2006) Handbook of Neurosurgery. 6.Ed Georg Thieme-Verlag Stuttgart
24. Grobelny TJ (2011) Brain aneurysms: epidemiology, treatment options, and milestones of endovascular treatment evolution. *Dis Mon* 57:647-655
25. Hernesniemi J, Vapalahti M, Niskanen M, Tapaninaho A, Kari A, Luukkonen M, Puranen M, Saari T, Rajpar M (1993) One-year outcome in early aneurysm surgery: a 14 years experience. *Acta Neurochir* 122:1-10
26. Hunt WE, Hess RM. (1968) Surgical risk as related to time of intervention in the repair of intracranial aneurysms. *J Neurosurg* 28:14-20
27. Imizu S, Kato Y, Sangli A, Oguri D, Sano H (2008) Assessment of incomplete clipping of aneurysms intraoperatively by a near-infrared indocyanine green-video angiography (Niicg-Va) integrated microscope. *Minim Invasive Neurosurg* 51:199-203
28. Jing Z, Ou S, Ban Y, Tong Z, Wang Y (2010) Intraoperative assessment of anterior circulation aneurysms using the indocyanine green video angiography technique. *J Clin Neurosci* 17:26-28

29. Kalavakonda C, Sekhar LN, Ramachandran P, Hechl P (2002) Endoscope-assisted microsurgery for intracranial aneurysms. *Neurosurgery* 51:1119-1126; discussion 1126-1127
30. Kallmes DF, Kallmes MH, Lanzino G, Kassell NF, Jensen ME, Helm GA (1997) Routine angiography after surgery for ruptured intracranial aneurysms: a cost versus benefit analysis. *Neurosurgery* 41:629-639
31. Kato Y, Sano H, Nagahisa S, Iwata S, Yoshida K, Yamamoto K, Kanno T (2000) Endoscope-assisted microsurgery for cerebral aneurysms. *Minim Invasive Neurosurg* 43:91-97
32. Klopfenstein JD, Spetzler RF, Kim LJ, Feiz-Erfan I, Han PP, Zabramski JM, Porter RW, Albuquerque FC, McDougall CG, Fiorella DJ (2004) Comparison of routine and selective use of intraoperative angiography during aneurysm surgery: a prospective assessment. *J Neurosurg* 100:230-235
33. Li J, Lan Z, He M, You C (2009) Assessment of microscope-integrated indocyanine green angiography during intracranial aneurysm surgery: a retrospective study of 120 patients. *Neurol India* 57:453-459
34. Ma CY, Shi JX, Wang HD, Hang CH, Cheng HL, Wu W (2009) Intraoperative indocyanine green angiography in intracranial aneurysm surgery: Microsurgical clipping and revascularization. *Clin Neurol Neurosurg* 111:840-846
35. Macdonald RL, Wallace MC, Kestle JR (1993) Role of angiography following aneurysm surgery. *J Neurosurg* 79:826-832
36. Meyer B, Urbach H, Schaller C, Baslam M, Nordblom J, Schramm J (2004) Immediate postoperative angiography after aneurysm clipping--implications for quality control and guidance of further management. *Zentralbl Neurochir* 65:49-56
37. Mielke D, Malinova V, Rohde V (2014) Comparison of intraoperative microscopic and endoscopic ICG angiography in aneurysm surgery. *Neurosurgery* 10 Suppl 3:418-425

38. Nishiyama Y, Kinouchi H, Senbokuya N, Kato T, Kanemaru K, Yoshioka H, Horikoshi T (2012) Endoscopic indocyanine green video angiography in aneurysm surgery: an innovative method for intraoperative assessment of blood flow in vasculature hidden from microscopic view. *J Neurosurg* 117:302-308
39. Özgiray E, Aktüre E, Patel N, Baggott C, Bozkurt M, Niemann D, Başkaya MK (2013) How reliable and accurate is indocyanine green video angiography in the evaluation of aneurysm obliteration? *Clin Neurol Neurosurg* 115:870-878
40. Payner TD, Horner TG, Leipzig TJ, Scott JA, Gilmor RL, DeNardo AJ (1998) Role of intraoperative angiography in the surgical treatment of cerebral aneurysms. *J Neurosurg* 88:441-448
41. Perneczky A, Boecher-Schwarz HG (1998) Endoscope-assisted microsurgery for cerebral aneurysms. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 38 Suppl:33-34
42. Perneczky A, Fries G (1998) Endoscope-assisted brain surgery: part 1--evolution, basic concept, and current technique. *Neurosurgery* 42:219-224
43. Popadić A, Witzmann A, Amann T, Doring W, Fleisch M, Häfel C, Hergan K, Längle M (2001) The value of intraoperative angiography in surgery of intracranial aneurysms: a prospective study in 126 patients. *Neuroradiology* 43:466-471
44. Profeta G, De Falco R, Ambrosio G, Profeta L (2004) Endoscope-assisted microneurosurgery for anterior circulation aneurysms using the angle-type rigid endoscope over a 3-year period. *Childs Nerv Syst* 20:811-815
45. Proust F, Hannequin D, Langlois O, Freger P, Creissard P (1995) Causes of morbidity and mortality after ruptured aneurysm surgery in a series of 230 patients. The importance of control angiography. *Stroke* 26:1553-1557
46. Raabe A, Beck J, Gerlach R, Zimmermann M, Seifert V (2003) Near-infrared indocyanine green video angiography: a new method for intraoperative assessment of vascular flow. *Neurosurgery* 52:132-139

47. Raabe A, Beck J, Seifert V (2005) Technique and image quality of intraoperative indocyanine green angiography during aneurysm surgery using surgical microscope integrated near-infrared video technology. *Zentralbl Neurochir* 66:1-6; discussion 7-8
48. Raabe A, Nakaji P, Beck J, Kim LJ, Hsu FP, Kamerman JD, Seifert V, Spetzler RF (2005) Prospective evaluation of surgical microscope-integrated intraoperative near-infrared indocyanine green videoangiography during aneurysm surgery. *J Neurosurg* 103:982-989
49. Rauzzino MJ, Quinn CM, Fisher WS 3rd (1998) Angiography after aneurysm surgery: indications for "selective" angiography. *Surg Neurol* 49:32-40
50. Reith W (2011) Endovascular therapy options for aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Radiologe* 51:113-119
51. Rinkel GJ, Algra A (2011) Long-term outcomes of patients with aneurysmal subarachnoid haemorrhage. *Lancet Neurol* 10:349-56
52. Roessler K, Krawagna M, Dörfler A, Buchfelder M, Ganslandt O (2014) Essentials in intraoperative indocyanine green videoangiography assessment for intracranial aneurysm surgery: conclusions from 295 consecutively clipped aneurysms and review of the literature. *Neurosurg Focus* 36:E7
53. Schievink WI (1997) Intracranial aneurysms. *N Engl J Med* 336:28-40
54. Scholz M, Parvin R, Thissen J, Löhnert C, Harders A, Blaeser K (2010) Skull base approaches in neurosurgery. *Head Neck Oncol* 2:16
55. Sharma M, Ambekar S, Ahmed O, Nixon M, Sharma A, Nanda A, Guthikonda B (2014) The utility and limitations of intraoperative near-infrared indocyanine green videoangiography in aneurysm surgery. *World Neurosurg* 82:e607-613
56. So TY, Dowling R, Mitchell PJ, Laidlaw J, Yan B (2010) Risk of growth in unruptured intracranial aneurysms: a retrospective analysis. *J Clin Neurosci* 17:29-33

57. Spendel MC (2008) Die aneurysmatische Subarachnoidalblutung: Epidemiologie, Ätiologie, Klinik und Komplikationen. *J Neurol Neurochir Psychiatr* 9:20-30
58. Suzuki J, Kwak R, Katakura R (1980) Review of incompletely occluded surgically treated cerebral aneurysms. *Surg Neurol* 13:306-310
59. Teasdale G, Jennett B (1974) Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet* 2:81-84
60. Teasdale G, Jennett B (1976) Assessment and prognosis of coma after head injury. *Acta Neurochir (Wien)* 34:45-55
61. van Lindert E, Perneczky A, Fries G, Pierangeli E (1998) The supraorbital keyhole approach to supratentorial aneurysms: concept and technique. *Surg Neurol* 49:481-489
62. Wang S, Liu L, Zhao Y, Zhang D, Yang M, Zhao J (2010) Evaluation of surgical microscope-integrated intraoperative near-infrared indocyanine green videoangiography during aneurysm surgery. *Neurosurg Rev* 34:209-215
63. Washington CW, Zipfel GJ, Chicoine MR, Derdeyn CP, Rich KM, Moran CJ, Cross DT, Dacey RG Jr (2013) Comparing indocyanine green videoangiography to the gold standard of intraoperative digital subtraction angiography used in aneurysm surgery. *J Neurosurg* 118:420-427
64. Wiebers DO (2000) Natural history of unruptured intracranial aneurysms. *Oper Tech Neurosurg* 3:166-168
65. Zhao J, Wang Y, Zhao Y, Wang S (2006) Neuroendoscope-assisted minimally invasive microsurgery for clipping intracranial aneurysms. *Minim Invasive Neurosurg* 49:335-341
66. Zimmer A, Reith W (2011) Secondary complications of acute subarachnoid hemorrhage. *Radiologe* 51:120-125

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Aneurysma der BA in der DSA und in der 3D-Rekonstruktion _____	5
	(Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. W. Reith)	
Abbildung 2	Aneurysma der ICA in der DSA und in der 3D-Rekonstruktion _____	5
	(Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. W. Reith)	
Abbildung 3	Subarachnoidalblutungen in der Computertomographie _____	7
	(Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. W. Reith)	
Abbildung 4	Coiling eines Aneurysmas der BA _____	9
	(Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. W. Reith)	
Abbildung 5	Endoskopische intraoperative Inspektion eines geclippten AComA-Aneurysmas _____	10
	(Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. J. Oertel)	
Abbildung 6	Der supraorbitale Zugang: schematisch ⁶¹ und im OP nach Hautverschluss _____	19
	(Foto: Rüdiger Koop)	
Abbildung 7	Der pterionale Zugang ⁵⁴ _____	19
Abbildung 8	Schematische Darstellung des Prinzips der ICG-VA ² _____	23
Abbildung 9	Einsatz des OP-Mikroskops bei einer Aneurysma-OP _____	24
	(Foto: Rüdiger Koop)	

- Abbildung 10** Clipping eines Aneurysmas der MCA rechts über einen supraorbitalen Zugang bei einer 56-jährigen Patientin _____ 24
(Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. J. Oertel)
- Abbildung 11** Endoskopie-Turm und Einsatz des ICG-Endoskops während einer Aneurysma-OP (Foto: Rüdiger Koop) _____ 25
- Abbildung 12** Clipping eines kleinen Aneurysmas der MCA rechts bei einer 50-jährigen Patientin über einen supraorbitalen Zugang _____ 25
(Klinik für Neurochirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. J. Oertel)
- Abbildung 13** Geschlechterverteilung _____ 28
- Abbildung 14** SAB vs. inzidentell _____ 28
- Abbildung 15** Erfolgreiche intraoperative Darstellung und Beurteilung der verschiedenen Aneurysmastrukturen _____ 38
- Abbildung 16** Kasuistik: Patientin mit inzidentellem MCA-Aneurysma rechts _____ 42
(Klinik für Neurochirurgie und Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. J. Oertel bzw. Prof. Dr. med. W. Reith)
- Abbildung 17** Kasuistik: Patientin mit inzidentellem AComA- sowie MCA-Aneurysma rechts _____ 44
(Klinik für Neurochirurgie und Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Direktor: Prof. Dr. med. J. Oertel bzw. Prof. Dr. med. W. Reith)

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Lokalisationen der Aneurysmen nach Häufigkeit ^{7, 23, 57} _____	6
Tabelle 2	Klassifikation der SAB nach Hunt und Hess ²⁶ _____	17
Tabelle 3	Die Glasgow Coma Scale ⁶⁰ _____	17
Tabelle 4	Die WFNS-Klassifikation zur Einteilung der SAB ¹⁴ _____	18
Tabelle 5	Klinischer Zustand der Patienten mit SAB nach Hunt und Hess _____	28
Tabelle 6	Klinischer Zustand der Patienten mit SAB nach der WFNS-Klassifikation _____	29
Tabelle 7	Lokalisation der Aneurysmen _____	29
Tabelle 8	Anzahl der Aneurysmen, wenn mehr als ein Aneurysma in einer OP behandelt wurde _____	30
Tabelle 9	Operativer Zugangsweg _____	31
Tabelle 10	Fälle, in denen die eICG-VA der mICG-VA überlegen war _____	33
Tabelle 11	Fälle, in denen die mICG-VA der eICG-VA überlegen war _____	35
Tabelle 12	Zusammenfassung subjektiver Vergleich zwischen eICG-VA und mICG-VA _____	36
Tabelle 13	Unerwünschte intraoperative Befunde nach dem Clipping und mit welcher Methode sie dargestellt werden konnten _____	39
Tabelle 14	Befunde der postoperativen DSA _____	40

9 Publikationen

Aus den Daten, die im Rahmen dieser Dissertation erhoben wurden, gingen folgende Publikationen hervor:

Journalbeiträge:

- Fischer G, **Rediker J**, Oertel J: Endoscope- vs. microscope-integrated near-infrared indocyanine green videoangiography (ICG-VA) in aneurysm surgery.
Eingereicht bei: *Journal of Neurosurgery* 2017

Kongressbeiträge:

- **Rediker J**, Fischer G, Oertel J: Endoskopische vs. mikroskopische Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie (ICG-VA) in der Aneurysma-Chirurgie. Vortrag 65. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie (DGNC), 11.-14.05.2014, Dresden
- **Rediker J**, Fischer G, Oertel J: Endoscope- vs. microscope-integrated near-infrared indocyanine green videoangiography (ICG-VA) in aneurysm surgery. Posterpräsentation im Rahmen der Homburger Neuroendoscopy Week, 22. – 26.09.2014, Homburg/Saar
- **Rediker J**, Fischer G, Oertel J: Endoskopische vs. mikroskopische Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie in der Aneurysma-Chirurgie: Ergebnisse nach 100 Aneurysmen. Vortrag 66. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie (DGNC), 07.-10.06.2015, Karlsruhe
- **Rediker J**, Fischer G, Oertel J: Endoskopische vs. mikroskopische Nahinfrarot-Indocyaningrün-Videoangiographie in der intrakraniellen Aneurysmachirurgie. Vortrag und Nominierung für den Nachwuchspreis 24. Wissenschaftliche Jahrestagung der Saarländischen Chirurgenvereinigung, 20.01.2016, Bexbach

10 Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen Menschen bedanken, die mich bei der Arbeit an dieser Dissertation in vielfacher Art und Weise unterstützt haben.

Zu allererst geht mein Dank an meinen Doktorvater Prof. Dr. med. Joachim Oertel und meinen Betreuer PD Dr. med. Gerrit Fischer, die mir diese Arbeit ermöglicht, das Thema zur Verfügung gestellt haben und bei Fragen und Problemen jederzeit ein hilfreicher Ansprechpartner waren.

Zu größtem Dank bin ich auch meinen Eltern verpflichtet, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben, mir immer eine große Unterstützung waren und mich stets ermutigt haben, meine Ziele zu verfolgen und auch in Durststrecken nicht aufzugeben. Ohne sie wäre ich nicht dort, wo ich jetzt bin.

Auch bei meiner restlichen Familie und meinen Freunden möchte ich mich ganz herzlich bedanken. Mit ihnen bin ich gemeinsam durch das Studium gegangen. Sie haben mir gezeigt, wie wichtig gute Freunde sind und was man als Team alles erreichen kann. Durch sie wird mir das Studium immer in guter Erinnerung bleiben und ich hoffe, dass unsere Freundschaft auch in Zukunft weiter besteht, obwohl sich unserer Wege zum Teil getrennt haben.

Mein weiterer Dank geht an die vielen anderen Menschen, die ich im Rahmen dieser Arbeit kennengelernt habe und die mir -in welcher Weise auch immer- dabei geholfen haben. Besonders zu erwähnen sind das OP- und Ärzte-Team der Homburger Neurochirurgie, Herr Koop, der mir die zahlreichen Fotos zur Verfügung gestellt hat, und Prof. Reith und die Klinik für Neuroradiologie, dessen Bilder ich für diese Arbeit verwenden durfte.

Diese Version enthält keinen Lebenslauf