

Grundlagen der Vitrektomie unter Verwendung intraokularer Tamponaden – ein chirurgischer Basiskurs

Main Principles of Vitrectomy Using Intraocular Tamponades – A Basic Course in Surgery



Autoren

Carsten Framme¹, Helmut G. Sachs², Joachim Wachtlin³, Nikolaos E. Bechrakis⁴, Hans Hoerauf⁵, Veit-Peter Gabel⁶

Institute

- 1 Augenklinik, Medizinische Hochschule Hannover, Deutschland
- 2 Augenklinik, Carl-Thiem-Klinikum Cottbus gGmbH, Deutschland
- 3 Augeneheilkunde, Sankt Gertrauden-Krankenhaus, Berlin, Deutschland
- 4 Klinik für Augeneheilkunde, Universitätsklinikum Essen, Deutschland
- 5 Augeneheilkunde, Universitätsmedizin Göttingen, Deutschland
- 6 Augeneheilkunde, Universität Regensburg, Emeritus, München, Deutschland

Schlüsselwörter

Vitrektomie, Silikonöl, Perfluorocarbone, Schwefelhexafluorid, intraokulare Tamponaden, Netzhautablösung

Key words

vitrectomy, silicone oil, perfluorocarbons, sulfur hexafluoride, intraocular tamponades, retinal retachment

eingereicht 28. 4. 2022

angenommen 30. 7. 2022

Bibliografie

Klin Monatsbl Augenheilkd 2022; 239: 1337–1353

DOI 10.1055/a-1929-9413

ISSN 0023-2165

© 2022. The Author(s).

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution-NonDerivative-NonCommercial-License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit. Contents may not be used for commercial purposes, or adapted, remixed, transformed or built upon. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,
70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Prof. Carsten Framme, MD, FEBO, MHM, MBA
Augenklinik, Medizinische Hochschule Hannover
Carl-Neuberg-Str. 1, 30625 Hannover, Deutschland
Tel.: + 49 (0) 51 15 32 30 60, Fax: + 49 (0) 51 15 32 16 10 53
Framme.Carsten@mh-hannover.de



Zusätzliches Material finden Sie unter
<https://doi.org/10.1055/a-1929-9413>

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel sollen die Grundlagen zur Verwendung intraokularer Tamponaden in der Glaskörper-/Netzhautchirurgie bei Ablatio retinae und anderen Pathologien anhand zusätzlichen Videomaterials anschaulich dargestellt werden. Behandelt werden die verschiedenen Gase, Silikonöle und flüssigen Perfluorocarbone mit ihren Indikationen, ihrer Anwendung und insbesondere der intraoperativen Handhabung mit Fallstricken und Komplikationen. Charakteristische Animationen zeigen dabei nachvollziehbar die Prinzipien in der chirurgischen Handhabung. Seitens der beiden Erstautoren ist dieser Artikel ihrem Lehrer Herrn Prof. Dr. V.-P. Gabel gewidmet, der in den frühen 90er-Jahren die ersten Vitrektomiekurse für Augenärzte an der Universitäts-Augenklinik Regensburg erfolgreich im jährlichen Rhythmus etabliert hat und in denen viele heute noch netzhautchirurgisch tätige Kolleginnen und Kollegen ihre ersten Schritte in diesem Segment erlernt haben. Die weiteren Co-Autoren partizipierten unter seiner Leitung an jährlichen Vitrektomie-Wetlabs im Rahmen der Augenärztlichen Akademie Deutschlands.

ABSTRACT

This article is intended to clearly present the basic principles for the use of intraocular tamponades in vitreous/retinal surgery in the event of retinal detachment and other pathologies using additional video footage. It examines the various gases, silicone oils and perfluorocarbon liquids with their indications,

administration and in particular intraoperative handling including pitfalls and complications. Characteristic animations show the principles of use in surgery in a comprehensible way. The two lead authors dedicate this article to their teacher Prof. Dr. V.-P. Gabel, who in the early 1990s successfully established the first vitrectomy courses for ophthalmologists at

Regensburg University Eye Clinic each year. Many colleagues who still work in retinal surgery today first started learning about this segment on these courses. The other coauthors participated under his supervision in annual vitrectomy wet labs run by the German Academy of Ophthalmology.

Einleitung

Die moderne Netzhautchirurgie mittels Pars-plana-Vitrektomie (PPV) wäre ohne adäquate intraokular verwendbare Agenzien und Tamponaden nicht denkbar. Im Rahmen der klassischen Buckelchirurgie bei Netzhautablösungen mittels Plombe oder Cerclage mit und ohne subretinale transsklerale Drainage bedarf es nicht zwingend einer intraokularen Tamponade, um die Netzhaut erfolgreich wieder anzulegen. Durch die alleinige buckelbedingte Wiederanlage des Foramens an seine Unterlage und entsprechende Kryokoagulation zur Vernarbung kommt es durch die Flüssigkeitsabsorption über das retinale Pigmentepithel (RPE) zur erfolgreichen Behandlung. Führt man dabei eine externe Drainage der subretinalen Flüssigkeit durch, kann, je nach Ausmaß der Drainage, die aufgetretene Hypotonie des Bulbus über eine transsklerale Luft- oder Gasinjektion kompensiert werden. Bei dem chirurgischen Vorgehen ohne subretinale Drainage ist der durch die Buckelung vorher benötigte Volumengewinn durch Parazentese der Vorderkammer und ggf. mehrfache Ablassung von Flüssigkeit zu erreichen. Je nach Konsistenz der ggf. zähflüssigen subretinalen Flüssigkeit und der Pumpfähigkeit des RPE kann die vollständige Wiederanlage der Netzhaut bei dieser Operationsmethode manchmal Tage und sogar Wochen andauern. Kommt es allerdings zur Netzhautanlage, wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit kein Netzhautloch übersehen und der Befund bleibt stabil. Dem gegenüber steht der Vorteil einer i. d. R. sehr schnellen Wiederanlage nach externer Drainage. Allerdings ist in der frühen postoperativen Phase nicht sicher, ob vielleicht ein Foramen übersehen wurde, das zu einem Ablatioresidiv führen könnte. Einen sehr guten Überblick über die Buckelchirurgie geben Faude et al. in einem Review aus dem Jahre 2002 [1] und Hoerauf et al. in 2008 [2], die beide an Aktualität nichts eingebüßt haben.

Die Buckelchirurgie wurde in den letzten Jahren – insbesondere unter immer weiterer Verbreitung der nahtlosen 23-G-, 25-G- und 27-G-Vitrektomietechniken – in den Hintergrund gedrängt [3,4]. Da die Augenlinse möglichst zu schonen ist, die nach Glaskörperchirurgie bei ca. 30% der Augen bereits innerhalb eines Jahres eintrübt, wird die Buckelchirurgie i. d. R. derzeit zu meist bei jüngeren Patienten durchgeführt. Bei diesen Patienten haftet der zumeist noch sehr kompakte Glaskörper stark an der Netzhaut an und eine „vollständige“ Separation des Glaskörpers kann entweder nur inkomplett oder mit deutlich erhöhten Risiken der Netzhautverletzung durchgeführt werden. Weitere mögliche Indikationen der Buckelchirurgie sind deshalb inferiore Netzhautablösungen mit Foramen/Foramina in der unteren Zirkumferenz bei jüngeren Patienten. Operateure sind heutzutage allerdings viel geübter in der häufiger und schneller durchzuführenden primären Vitrektomie, die Visualisierung von Foramina ist einfacher

und die Buckelchirurgie wird immer mehr „verlernt“. Ein weiterer Vorteil der Vitrektomie liegt darin, dass auch sehr komplexe vitreoretinale Pathologien beim Ersteingriff erfolgreich behandelt werden können, allerdings sollten die Buckeltechniken aus oben erwähnten Gründen ebenfalls weiterhin zur Verfügung stehen und dafür die Ausbildung darin gepflegt werden.

Auch die Pseudophakieablationen, die ursächlich häufiger präorale kleinere Foramina anstatt äquatorial gelegene Hufeisenforamina aufweisen und deshalb lange Zeit kombiniert mittels Vitrektomie und Cerclage operiert wurden, können derzeit bei gleichen oder besseren Ergebnissen für die dauerhafte Wiederanlage sehr gut mittels alleiniger Vitrektomie (mit 20-G- oder trokargeführter 23- bis 25-G-PPV) behandelt werden [5]. Für die erfolgreiche Operation werden, je nach Schwere der Ausgangssituation, intraoperative Substanzen wie Luft, Gas, flüssige Perfluorocarbone (PFCL) und ggf. Silikonöl benötigt. Ebenfalls von Faude et al. existieren auch zu den Gasen und den Perfluorocarbonen ältere, aber sehr detaillierte Übersichtsarbeiten zur Chemie, Wirkweise und den entsprechenden klinischen Anwendungsgebieten [6–8]. Zweck dieser Übersicht ist es, das chirurgische Vorgehen insbesondere beim Umgang mit den intraokularen Tamponaden im Sinne eines chirurgischen Basiskurses detailliert zu beschreiben.

Operatives Setup

Je nach Bauart der modernen Vitrektomiemaschinen variieren die Zuleitungen mehr oder weniger stark. Prinzipiell führt der Infusions-Port, das sog. „Sternchen“, das bei der klassischen 20-G-Vitrektomie nach Bindehauteröffnung i. d. R. 3,5–4 mm entfernt vom Limbus temporal unten nach entsprechender Sklerostomie mit einem geeigneten Spieß transskleral, in den Glaskörperraum reichend, platziert und dann mittels Naht fixiert wird, Flüssigkeit (z. B. Balanced Salt Solution [BSS]) von der Maschine zum Auge, wobei der Intraokulardruck maschinenseitig individuell eingestellt werden kann. Bei phaker Situation wird ein kürzeres 4-mm-Sternchen präferiert, um die Linse nicht zu gefährden, bei pseudophaker oder aphaker Situation kann auf das längere 6-mm-Sternchen zurückgegriffen werden. Gerade bei schwierigeren Ablationen mit bspw. proliferativer Vitreoretinopathie (PVR), primärer Aderhautschwellung oder Aderhautblutung und einer wahrscheinlichen Ölfüllung wird häufig noch die 20-G-Vitrektomie präferiert, da sie ggf. eine bessere subretinale Chirurgie mithilfe gebogener Instrumente sowie eine einfachere Ölfüllung zulässt. Allerdings sind auch mittels trokargeführter PPV prinzipiell Öleingaben und subretinale Chirurgie möglich.

Das Sternchen wird immer bei geschlossener Infusion ins Auge platziert und vor Öffnung der Infusion der sichere intravitreale Sitz



► **Abb. 1** Mögliches Setup des Zulaufes von BSS, Luft und Gas im Rahmen der Pars-plana-Vitrektomie.

Intraokulares Verhalten von Luft und Gas-/Luft-Gemischen

	Expansion pur	nichtexpansive Mischung	Halbwertszeit Zeit: Tage	Verweildauer 1 ml pur
Luft	1x		1-1,5	5-7d
SF ₆	2-2,5x	20%	2,5	10 d
C ₂ F ₆	3,3x	16%	3,5	30 d
C ₃ F ₈	4x	12%	5	55 d

► **Abb. 2** Merkmale der Verweildauer von Luft und Gasen im Auge (adaptiert nach [6, 9]).

überprüft, um definitiv eine mögliche Infusion in die Aderhaut auszuschließen (am einfachsten, indem an der Seite der Mikroskopoptiken vorbei schräg in das Auge geblickt wird; Öffnen der Infusion bei leichtem Druck des Sternchens in das Auge und nach Öffnung leichtes Zurückgleitenlassen). Ein längeres Sternchen bietet mehr Sicherheit für eine optimale intravitreale Platzierung, beinhaltet aber eben das Risiko, bei Verkippung und phakem Auge die Linse zu beschädigen. Daher kann eine Fixation des Schlauches mittels eines Steristrips hilfreich sein. Bei der trokargeführten Vitrektomie gilt dieses Prinzip gleichermaßen. Parallel zum Wasserzulauf kann auf den Luftzulauf an der Maschine (wahlweise aber auch über das Schlauchsystem) umgeschaltet werden. Zusätzlich ermöglicht ein (weiterer) 3-Wege-Hahn die Gaseingabe über eine Spritze (► **Abb. 1**). Nach Einsetzen der Infusion werden 2 weitere Sklerostomien nasal und temporal oben, bspw. in der 1:30-Uhr- und der 10:30-Uhr-Position gesetzt (möglichst weit auseinander, damit sich die Daumen nicht berühren). Das Aufbougiegen der Öffnungen mittels einer konisch zulaufenden Sonde erleichtert das Einführen der Instrumente bei der 20-G-Vitrektomie. Zusätzlich sollte darauf geachtet werden, dass Bindehaut und Tenon sauber entfernt werden, um mögliche Epithelinvasion zu vermeiden und am Ende der Operation adäquate Wundverhältnisse zur Readaptation (vornehmlich mittels Kreuzstichnaht eines geflochtenen Vicryl- oder eines monofilen PDS-7.0-Fadens) zu gewährleisten. Auch bei trokargeführter Vitrektomie können Wundinsuffizienzen vorhanden sein, wobei dann ebenfalls (transkonjunktival) genäht werden muss.

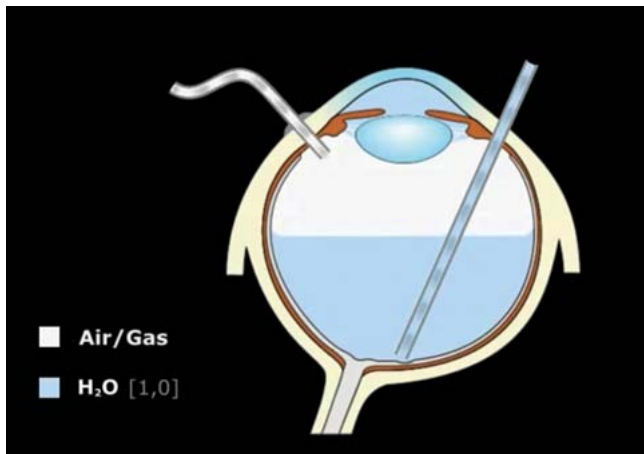
In der Regel sollte bei trokargeführter Operationstechnik das Auge mit Luft oder Gas zumindest im anterioren Bereich bei Operationsende verlassen werden, um eine bessere Wunddichtigkeit zu erreichen. Milde postoperative Hypotonien stellen zumeist kein Problem dar und adaptieren sich von selbst, können aber natürlich doch das Risiko für Glaskörperblutungen oder Aderhautamotionen sowie Einblutungen auch aus den Sklerostomiezugängen erhöhen.

Wasser-Luft-Austausch

Luft hat eine Halbwertszeit von etwa 1–1,5 Tagen und verbleibt i. d. R. nach vollständiger Füllung etwa 5–7 Tage im Auge (► **Abb. 2**; adaptiert nach [6, 9]). Patienten müssen über das Verbot aufgeklärt werden, Flugreisen oder Ausflüge in höhere Berglagen zu unternehmen bis die Luft- bzw. Gastamponade vollständig resorbiert ist, da die Luft- bzw. Gasexpansion im Auge eine Druckerhöhung bis zur Durchblutungsstörung der Zentralarterie mit entsprechender Erblindungsgefahr bewirken kann. Eine definitive Höhenangabe kann dabei nicht angegeben werden. Erfahrungen variieren zwischen Druckproblemen ab einigen 100 m Höhe bis hin zu keinen Problemen bei über 2000 m Höhe, wahrscheinlich individuell abhängig auch von der Gasmenge. Vom Tauchen wird mit Gasfüllung ebenfalls abgeraten, da hier gerade der erhöhte Außendruck des Wassers mit möglicher Kompression von Gewebe problematisch sein kann. Bei der Benutzung von Gasen ist es intraoperativ wichtig, die nicht expansiven Mischungsverhältnisse von Gas und Luft zu kennen (► **Abb. 2**).

Der einfache komplette Wasser-Luft-Austausch ist in ► **Abb. 3** dargestellt und kann bei anliegender Netzhaut einfach über die maschinenseitig eingestellte Luftzufuhr erreicht werden, wenn die sog. Flötennadel über die Sklerostomie bis zum hinteren Pol eingesteckt wird, über die das intraokulare Wasser dann durch den Luftdruck hinausgedrückt wird (► **Abb. 3/Video 1 [Zusatzmaterial A]** und ► **Abb. 4/Video 2 [Zusatzmaterial B]**). Ebenfalls besteht die Möglichkeit, die Wasserphase aktiv mit dem Cutter bzw. Vitrektom abzusaugen. Bei den Animationen ist anzumerken, dass entgegen der nicht optimalen Darstellung der Flötennadel über der Fovea, diese zumeist über den tiefsten Punkt des Auges, nämlich der Papille, gehalten werden sollte.

Ein solcher 3- bis 4-maliger Luft-Wasser-Austausch wird bspw. regulär bei der Silikonölenentfernung (s. u.) empfohlen, um möglichst sämtliche z. T. emulsifizierte Restöbläschen entfernen zu können, die sich zumeist an der Grenzfläche sammeln, an der die Öffnung der Flötennadel bei der Luftbefüllung gehalten werden sollte. Wenn nach kompletter Luftfüllung wieder auf „Wasser“ zu-



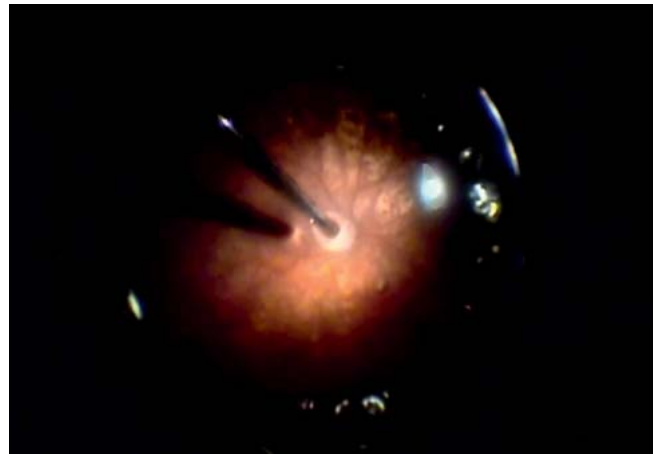
► **Abb. 3** Einfacher Wasser-Luft-Austausch bei anliegender Netzhaut. Über den Infusionsschlauch wird maschinenseitig Luft in das Auge injiziert (Air/Gas). Durch die Flötennadel wird das Wasser (H_2O) aus dem Auge herausgedrückt (siehe ► **Video 1** [Zusatzmaterial A]).

rückgestellt wird, kann eine kurzfristige Bulbushypotonie entstehen, die durch Justieren über die Flötennadel reguliert werden kann. Am Ende der Operation kann als Hypotonieprophylaxe Luft im Auge belassen werden, um das Nachblutungsrisiko zu mindern. Dies ist aber bei anliegender Netzhaut ohne weitere Pathologien nicht zwingend nötig, wenn die Sklerostomien vernäht werden. Am Ende des Eingriffs wird der Infusions-Port herausgezogen und die i. d. R. vorgelegte Naht zugezogen und verknotet. Bei der trokargeführten Vitrektomie werden die Trokare einfach herausgezogen. Aufgrund ihrer eingebauten Ventile stellen sie kein offenes System am Auge dar. Dies ist der Grund, warum einige der Autoren zur chirurgischen Behandlung der Endophthalmitis weiterhin die 20-G-Vitrektomie präferieren, da sie einen weitlumigen Durchfluss erlaubt, über den die Keime möglicherweise besser herausgespült werden können. Allerdings kann dies trokargeführt durch aktives Saugen oder Entfernung der Ventile von den Trokaren ebenfalls erreicht werden. Bei luftgefülltem Auge ist zu beachten, dass die periphere Netzhaut großflächiger („man sieht peripherer“) abgebildet wird, wobei allerdings die Sichtbarkeit der retinalen Strukturen selber schlechter wird. Problematisch kann das Beschlagen der Rückseite einer Intraokularlinse nach frisch erfolgter hinterer Kapsulotomie während der Vitrektomie sein, was dazu führt, dass der hintere Pol nicht mehr klar erkennbar ist. Hier kann eine Injektion von BSS oder Viskoelastikum auf die Hinterseite der Linse die Sichtbarkeit verbessern.

Anwendung von Gasen






Indikationen

Gase werden zur Behandlung rhegmatogener und traktiver Netzhautablösungen bis zum PVR-Stadium A/B [10], bei einfacheren Traktionsablösungen im Rahmen proliferativer Retinopathien bei vaskulären Netzhauterkrankungen und in der Makulachirurgie angewendet (► **Abb. 5**), wobei es durch die postoperative Kopflage-



► **Abb. 4** Einfacher Wasser-Luft-Austausch intraoperativ. Die Flötennadel wird dem Wasserspiegel folgend immer weiter bis zur Papille bewegt (siehe ► **Video 2** [Zusatzmaterial B]).

Indikationen zur intraokulären Anwendung von Gasen

-  • Primäre ppV bei rhegmatogener Ablatio
-  • Primäre ppV bei PVR Stadium A / B
-  • Proliferative Retinopathien mit Foramina, ohne starke Blutungstendenz
-  • Makulachirurgie
 - Makulaforamen, Macular pucker
 - Zentrale Ablatio bei Myopie, Grubenpapille
 - ggf. Vitreomakuläres Traktionssyndrom
-  • Subretinale Makulablutung mit r-tPA

► **Abb. 5** Auflistung der möglichen Indikationen für intraoperative Gasfüllungen.

rung zu einem mechanischen Andrücken der Netzhaut kommen soll. Die Chance, bspw. Makulaforamina somit verschließen zu können, wird mit etwa 90% und höher in der Literatur angegeben [11]. Gerade auch bei subretinalen Makulablutungen, die häufiger im Rahmen einer neovaskulären altersabhängigen Makuladegeneration (AMD) auftreten, bietet sich im Rahmen einer Vitrektomie die zusätzliche subretinale Injektion von „recombinant tissue-plasminogen-activator (r-tPA)“ mit oder ohne „VEGF-Inhibitor“ zur Verflüssigung der Blutung und anschließender Gasfüllung sowie Kopftieflagerung zur mechanischen Verdrängung des Blutes in die Peripherie an [12]. Eine epiretinale Gliose oder ein vitreomakuläres Traktionssyndrom erfordern i. d. R. keine Gasendotamponade.

Vorgehen bei Gasfüllung

Verschiedene Techniken existieren zur Gasfüllung des Auges. Gas kann in den luftgefüllten Bulbus anterograd über den Infusions-

Port (3-Wege-Hahn) bei noch zumindest einer oberen offenen Sklerostomie eingegeben werden, die dann kurz vor Leerung der Gasspritze mittels vorgelegter Naht verknotet wird (20 G). Beim Ziehen des Infusions-Ports und des bei 20-G-Chirurgie idealerweise sofortigen Zuziehens der Naht kann das Auge mit entsprechender Gasfüllung und adäquatem Intraokulardruck i. d. R. gut geschlossen werden. Sollte es hierbei allerdings zu einem Druckverlust gekommen sein, kann mittels Re-Injektion transskleral über eine 30-G-Kanüle der probate Intraokulardruck wieder erreicht werden. Daher sollte immer eine Restmenge Gas in der Spritze belassen werden, den man für dieses Manöver verwenden kann. Bei trokargeführter Vitrektomie wird so vorgegangen, dass zunächst die beiden oberen Trokare gezogen werden und die Sklerostomien auf Dichtigkeit überprüft werden (bei luftgefülltem Auge erscheinen Luftblasen, wenn Wasser auf die Oberfläche geträufelt wird). Bei Insuffizienz wird transkonjunktival nachgenäht. Danach wird der maschinenseitige Luftdruck sehr niedrig eingestellt und retrograd das Gas mittels 30-G-Kanüle über die Pars plana injiziert. Arbeitet man mit einer Maschine, bei der nicht gegen den maschinenseitigen Luftdruck injiziert werden kann, empfiehlt es sich, eine 2. 30-G-Kanüle gleichzeitig leer zu benutzen, über die beim langsamen Injizieren des Gases der Überdruck abgeleitet werden kann. Bei einer anderen Technik wird das Gasgemisch in einer 20-ml-Spritze an den 25-G-Port angeschlossen (Luer Lock) und via Kanüle dann über einen der oberen 25-G-Ports der Druckausgleich (Ablassen) gewährleistet. Alternativ dazu kann auch über den 3-Wege-Hahn der Infusionsleitung das Gasgemisch injiziert werden. Die Größe der Spritze kann bei Beibehaltung der korrekten Luft-Gas-Konzentrationen variabel gewählt werden. Wichtig ist, dass der Augeninhalt jeweils mehrfach mit dem Gasgemisch durchflutet wird, damit schließlich die gewünschte Gaskonzentration intraokular vorhanden ist.

Auswahl des Gases

Bei einfachen Ablationes mit „Loch-oben“-Situation wird i. d. R. Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet, das als 20%iges Gas-Luft-Gemisch nicht expansiv ist und bei einer Halbwertszeit von ca. 2,5 Tagen etwa 10–14 Tage im Auge verbleibt (► **Abb. 2**). Bei Netzhautablösungen mit inferioren Löchern kann Hexafluorethan (C_2F_6) 16% benutzt werden, da es eine deutlich höhere Halbwertszeit besitzt und nach Vitrektomie etwa 4 Wochen im Auge verbleibt. Sinnvollerweise müssen bei der Ablatiochirurgie alle Foramina, nachdem sie adäquat mittels Endolaser und/oder Kryoretinopexie versorgt wurden, über die Gastamponade solange an ihre Unterlage angedrückt bleiben, bis die durch die Pexie induzierte Vernarbung nach einigen Tagen soweit abgeschlossen ist, dass sich die Verklebungen nicht mehr lösen und somit auch kein Wasser mehr aus dem Glaskörperaum durch das Foramen nach subretinal gelangen kann. Durch das länger wirkende Gas kann dies insbesondere im unteren Bereich besser gewährleistet werden. Octafluorpropan (C_3F_8) hat eine noch deutlich längere Halbwertszeit und kann in geeigneten Situationen eine sinnvolle Alternative zu C_2F_6 darstellen. Überlegungen, dieses im Rahmen der Ablatiochirurgie verwenden zu wollen (z. B. bei PVR), müssen gegenüber einer möglicherweise sichereren Silikonölfüllung abgewogen werden.

Anwendung von flüssigen Perfluorocarbonen (PFCL)

Perfluorocarbone (PFCL) werden intraoperativ unterstützend zur Wiederanlage der Netzhaut verwendet und sind keine Dauertamponade. Zwingend werden sie zumeist bei schwierigeren Fällen gebraucht. Bei einfachen rhegmatogenen Netzhautablösungen kann sehr häufig auf eine Eingabe von PFCL verzichtet werden. Bei der Vitrektomie bedarf es einer sicheren hinteren Glaskörperabhebung (HGA) gefolgt von einem Zurückschneiden des Glaskörpers mittels Cutter soweit in die Peripherie wie möglich (cave bei phaker Situation bez. möglichem Linsen-Touch). Nach entsprechender Lochsuche (möglichst auch unter peripherer Indentation!) und ggf. Markierung der Foramina am zentralen Rand mittels Endodiatthermie (bessere Sichtbarkeit unter Luft!) kann dann über eine subretinale Drainage (bei ungünstiger Position oder Größe der Foramina ggf. Anlegen eines iatrogenen Drainageforamens ebenfalls mittels Endodiatthermie) und sukzessiver Luftfüllung die Netzhaut zumeist faltenfrei wieder angelegt werden. Etwas subretinal verbleibendes „shifting fluid“ ist dabei, sofern keine Falte direkt im Foveabereich resultiert, unproblematisch und am nächsten Tag unter Gasfüllung verschwunden. Der postoperativen Lagerung kommt zur Vermeidung von zentralen Netzhautfalten aber besondere Bedeutung zu. Intraoperativ kann am luftgefüllten Bulbus die adäquate Koagulation der markierten Foramina mittels Kryo- oder Endolaserkoagulation durchgeführt und schließlich, wie oben skizziert, Luft gegen Gas ausgetauscht werden. Eine schwierige HGA kann mittels Demarkierung der hinteren Glaskörpergrenzmembran durch intravitreal injiziertes Triamcinolon leichter erfolgen.

Bei schwierigeren Ablatiosituationen sind PFCL aus der vitreoretinalen Chirurgie als intraoperatives Hilfsmittel („3. Hand“) nicht mehr wegzudenken und ihre Anwendung hat die Operationsergebnisse nachhaltig verbessert [13]. Es besteht allerdings das Risiko, dass PFCL einerseits zum Ende der Operation hin nicht komplett entfernt werden und andererseits auch nach subretinal gelangen können. Letzteres passiert unter Affektion der Fovea gar nicht so selten und kann dann mit einem postoperativen Makulaödem verwechselt werden, was durch Fehlinterpretation fälschlicherweise bis hin zu einer IVOM-Therapie führen kann [14]. Es sollte bei mit PFCL gefülltem Bulbus unbedingt intraoperativ vermieden werden, mit der Flötennadel an den Rändern der Foramina zu manipulieren, da dadurch eine erhöhte Gefahr für einen subretinalen PFCL-Zugang besteht. Gleichermaßen sollte vermieden werden, eine durch zu hohen Irrigationsdurchfluss bedingte Bläschenbildung von PFCL an den Lochrändern zu produzieren [8].

Perfluorocarbone wurden erstmals 1976 von Chang beschrieben und intraokular angewendet [15, 16]. Sie sind optisch klar und haben ein höheres spezifisches Gewicht als Wasser, wodurch sie sich, wie oben beschrieben, ideal zum Glätten und Wiederanlegen der Netzhaut eignen (► **Abb. 6**).

Intraoperatives Management

Bezüglich des intraoperativen Managements von PFCL zeigen die folgenden Abbildungen die wichtigsten Grundregeln. Bei anliegender Netzhaut und vitrektomiertem Glaskörperaum wird die Injektionsnadel mit PFCL über die obere Sklerostomie bis hin zum hinte-

Perfluorocarbone (PFCL) - Charakteristika

	Spec. Gewicht [g/cm ³]	Viskosität [mPas·s]	Grenzflächen Spannung Wasser [mN/m]	Spreiten auf NH-Oberfläche unter Luft
Octane	1,78	1,4	55	++
Dekalin	1,92	5,53	53	++



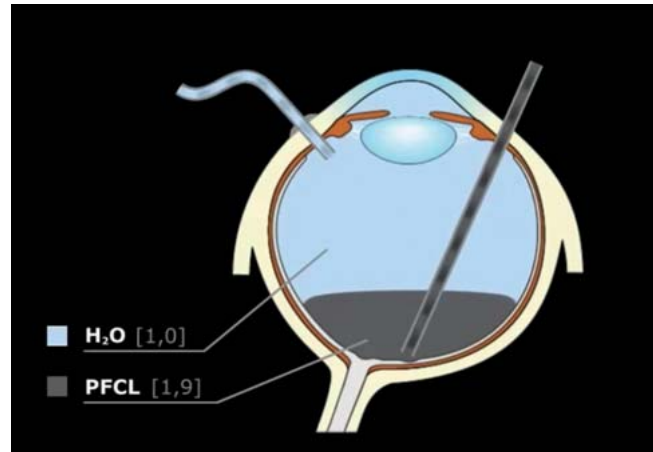
- optisch klar
 - hohes spezifisches Gewicht
 - flüssig, niedrige Viskosität
 - hohe Oberflächenspannung
- Spreiten unter Luft**
- Chang 1976
 - intraoperative Anwendung

► **Abb. 6** Charakteristika von intraoperativ zu verwendenden flüssigen Perfluorocarbonen, von denen im klinischen Alltag zumeist das Dekalin zum Einsatz kommt (adaptiert nach [8]).

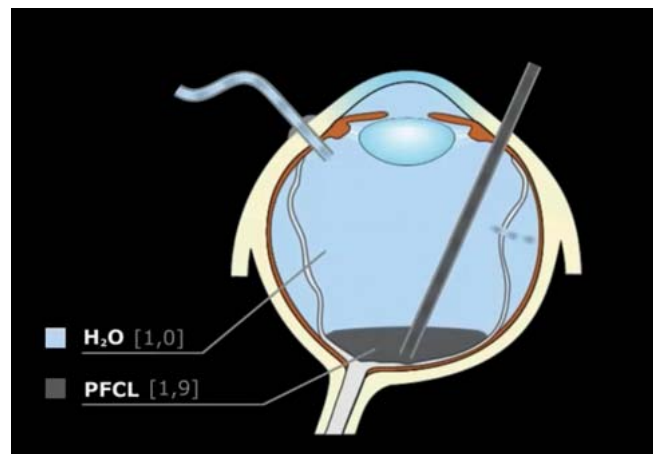
ren Pol gebracht und sodann langsam injiziert. Dabei kann eine doppelläufige Nadel verwendet werden, bei der ein 2. Lumen etwas höher angebracht ist, durch welches das verdrängte Wasser hinausgedrückt wird. Sicher sind Luer-Lock-Spritzen, damit bei ggf. erhöhtem Pressdruck die doppelläufige Kanüle nicht diskonnektiert. Wichtig ist es, mit der Nadelspitze während der Eingabe in der PFCL-Blase zu verbleiben, um eine Bläschenbildung und eine damit verbundene erschwerte Visualisierung und schließlich womöglich unvollständige Entfernung zu verhindern (► **Abb. 7/Video 3 [Zusatzmaterial C]**). Die Eingabe von PFCL bei anliegender Netzhaut kann z. B. bei in den Glaskörper luxierten Linsen sinnvoll sein, um die Makula bei der chirurgischen Exzision zu schützen.

Bei abgehobener Netzhaut müssen die Foramenränder adäquat freigeschnitten sein. Durch die Eingabe von PFCL am hinteren Pol wird die subretinale Flüssigkeit nach anterior verdrängt und gelangt über das Foramen in den Glaskörperraum. Die Netzhaut hat sich unter diesem Manöver oft bereits angelegt und die somit auch anliegenden Foramina können nun gut z. B. mittels Kryokoagulation behandelt werden (► **Abb. 8/Video 4 [Zusatzmaterial D]**). Durch die hohe Oberflächenspannung läuft der PFCL-Spiegel i. d. R. unproblematisch über die Foramina hinweg, ohne nach subretinal zu gelangen.

Vorsicht ist allerdings bei sehr zentralen Foramina – ob präexistent oder z. B. bei Entfernung von Proliferationsmembranen iatrogen entstanden – geboten. Hierüber kann PFCL nach subretinal gelangen. Auch die fehlende Entlastung einer vitrealen Traktion am Lochrand kann beim weiteren Auffüllen von PFCL durch Ausreißen des Lochrandes zu einem größeren Netzhautriss führen, über den große Mengen PFCL nach subretinal gelangen können. Gleichgültig gegen welche Endotamponade später ausgetauscht werden soll, vorab ist eine traktionsfrei anliegende Netzhaut anzustreben. Lässt sich dies wegen intraretinaler Verkürzung oder nicht entlastbaren epi- oder subretinalen Traktionen bei PVR nicht erreichen, muss eine Retinektomie zur Entlastung durchgeführt werden, bevor weiter PFCL aufgefüllt, eine Koagulation und ein sicherer Austausch durchgeführt werden kann. Subretinales PFCL muss in jedem Fall wieder entfernt werden.



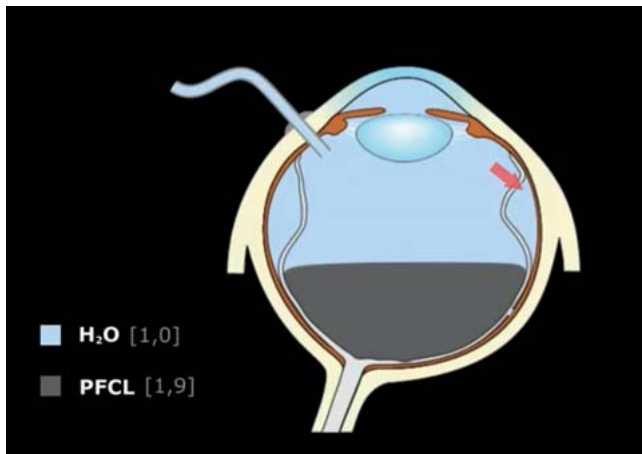
► **Abb. 7** Eingabe von PFCL in den vitrektomierten Glaskörperraum bei anliegender Netzhaut. Die Injektionsnadel wird über die Sklerostomie bis zum hinteren Pol geführt und PFCL möglichst ohne Blasenbildung (Nadelspitze muss in der PFCL-Blase verbleiben) injiziert (siehe ► **Video 3 [Zusatzmaterial C]**).



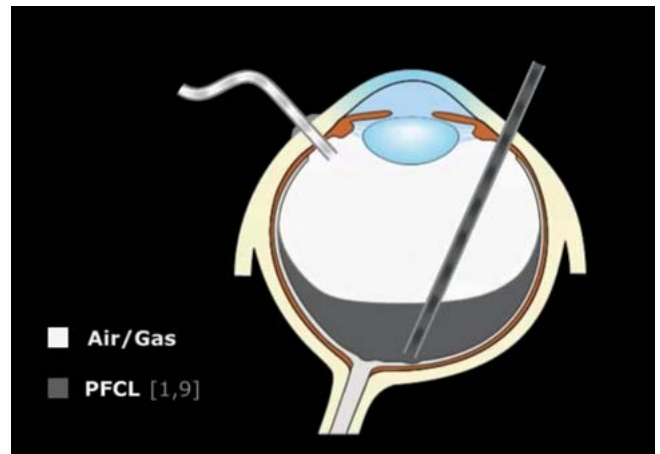
► **Abb. 8** Eingabe von PFCL in den vitrektomierten Glaskörperraum bei abgehobener Netzhaut. PFCL wird dicht über dem hinteren Pol eingegeben und verdrängt subretinale Flüssigkeit nach anterior über das vorher adäquat freigeschnittene Foramen (siehe ► **Video 4 [Zusatzmaterial D]**).

„Shifting fluid“

Bei der primären rhegmatogenen Ablatio kommt es, je nach Füllungsgrad des Auges mit PFCL und der Position des Foramens oder der Foramina, zu einem regulären „shifting fluid“ von subretinaler Flüssigkeit nach anterior. Diese Flüssigkeit ist sozusagen in diesem Bereich subretinal „gefangen“, da die Foramina ab einem gewissen Punkt mit PFCL angelegt und verdeckt sind und somit subretinale Flüssigkeit nicht weiter entweichen kann. Somit entsteht manchmal eine anteriore persistierende „Ablatiowalze“, die sich bspw. nur durch Absaugung der subretinalen Flüssigkeit über die Netzhautdefekte entfernen lässt, bevor eine Koagulation der Netzhautforamina möglich ist. Wenig „shifting fluid“ kann dabei i. d. R., wie oben beschrieben, problemlos belassen werden.



► **Abb. 9** Eingabe von PFCL in den vitrektomierten Glaskörperraum bei abgehobener Netzhaut und zentralem Foramen. Nach Netzhautwiederanlage im posterioren Bereich und Ansammlung von viel „shifting fluid“ im anterioren Bereich, kann über ein peripheres iatrogenes Drainageforamen sukzessive weitere subretinale Flüssigkeit mittels Flötennadel (oder auch ohne Flötennadel bei weiterer Eingabe von PFCL) abdrainiert werden (siehe ► **Video 5 [Zusatzmaterial E]**).



► **Abb. 10** Eingabe von Luft über den Infusions-Port bei PFCL-gefülltem Auge. Durch die bis zum hinteren Pol platzierte Flötennadel (ggf. bei trokargeführter Vitrektomie auch mittels Cutter und aktivem Sog) kann das PFCL sicher aus dem Glaskörperraum entfernt werden (siehe ► **Video 6 [Zusatzmaterial F]**).

Es gelangt dann bei dem zumeist durchgeführten „PFCL-Luft“-Austausch zwar wieder nach zentral, ist am Folgetag aber komplett unter der Gastamponade resorbiert (s. o.). Größere Mengen sollten hingegen vermieden werden (mögliche zentrale Faltenbildung der Netzhaut!), sodass es bei zentraleren Foramina durchaus angebracht sein kann, nach partieller PFCL-Füllung weiter anterior nochmals ein iatrogenes Drainageforamen zu schneiden, um die restliche subretinale Flüssigkeit dann unter weiterer PFCL-Eingabe (oder auch unter Luft) soweit wie möglich zu entfernen (► **Abb. 9/Video 5 [Zusatzmaterial E]**).

Entfernung von PFCL

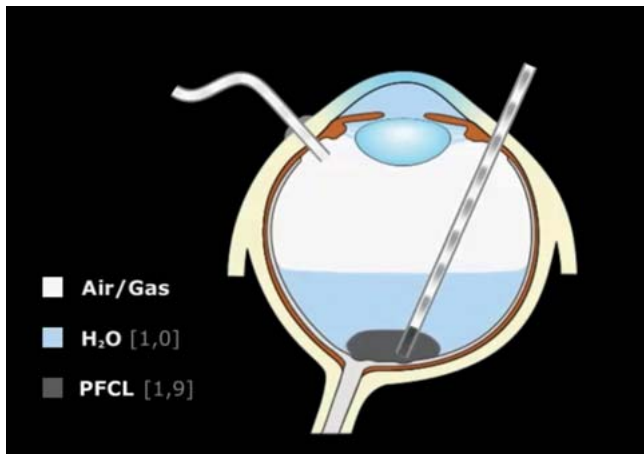
Nachdem unter PFCL und damit einhergehender Wiederanlage der Netzhaut die Versorgung der Foramina mittels Laser- und/oder Kryopexie adäquat beendet wurde, muss PFCL wieder entfernt werden. Angestrebt wird in vielen Fällen am Ende der Operation eine Endotamponade mit Gas. Dazu muss PFCL im 1. Schritt gegen Luft ausgetauscht werden. ► **Abb. 10** verdeutlicht das entsprechende Management, bei dem die Flötennadel bis zum hinteren Pol geführt wird und unter der maschinenbedingten Druckeingabe von Luft das PFCL über die Nadel hinausgedrückt wird (► **Abb. 10/Video 6 [Zusatzmaterial F]**). Bei trokargeführter Vitrektomie wird aus Gründen der Schnelligkeit bei geringeren Durchmesser der Instrumente häufig der Cutter mit aktivem Sog und erst am hinteren Pol schließlich die Flötennadel zum genauen Absaugen der PFCL-Reste genutzt. Die Schwierigkeit besteht darin, dass es unter diesem Manöver nicht wieder zu einer Ablösung der Netzhaut kommen sollte, was durchaus dann passieren kann, wenn bspw. zwischen der PFCL-Phase und der beim Wechsel über den Infusions-Port eingebrachten Luft (analog zu dem oben beschriebenen Wasser-Luft-Austausch) noch eine zu große Wasserphase existiert. Sobald diese durch das „Absaugen“ des PFCL über die Flötennadel nach posterior über den Bereich

des Foramens „wandert“, kann es zur Reablatio kommen, sodass eventuell eine erneute Füllung mit PFCL und eine Wiederholung des Austauschmanövers erforderlich ist.

Wie bereits in ► **Abb. 6** angegeben, kann PFCL unter Luft auf der Netzhautoberfläche breitflächig spreiten, sodass eine komplette Entfernung erschwert sein kann. Um zu verhindern, dass PFCL-Reste im Auge verbleiben, kann und sollte der hintere Pol dann nochmals mit etwas Wasser gefüllt werden, z. B. kurz über den Infusions-Port oder über eine Sklerostomie. Der Wasserspiegel darf dabei sinnvollerweise natürlich nicht höher sein als das zentralste Foramen. Nun kann sich das PFCL in der Wasserphase wieder sammeln und schließlich PFCL und Wasser zusammen „abgesaugt“ werden (► **Abb. 11/Video 7 [Zusatzmaterial G]**). PFCL-Reste sollten im Gegensatz zur Abbildung am besten so „manövriert“ werden, dass sie nicht von der Fovea abzusaugen sind, sondern über der Papille. Danach erfolgt, wie oben beschrieben, der Austausch gegen das gewünschte Gas, wobei länger wirkendes Gas bei inferior lokalisierten Foramina bevorzugt werden sollte.

Schwerwiegende Komplikationen mit Luft und PFCL

Manchmal besteht bei schwierigen (aber traktionsfreien) Situationen die Möglichkeit, die Netzhaut auch ohne PFCL unter Luftfüllung (oder direkter Öleingabe; s. u.) wieder anzulegen und die Foramina mittels Laser oder Kryo unter Luft oder auch nach Silikonölfüllung (s. u.) zu behandeln. Bei Versorgung von stark intraokular blutenden Verletzungen kann bspw. eine frühe Luftfüllung eine Visualisierung der retinalen Strukturen ermöglichen. Vorsicht ist allerdings bei einem solchen luftgeführten Manöver bei offenen Augenverletzungen mit großflächiger Aderhautbeteiligung geboten, da Fallberichte über Luftembolien mit letalem Ausgang existieren [17, 18]. Ob das Risiko dafür durch die heute eher übliche trokargeführte Vitrektomie statt der 20-G-Vitrektomie mit offenen Sklerostomien und ggf. niedrigeren intraokularen Luftdrücken erhöht sein könnte, ist spekulativ.



► **Abb. 11** Unter Luft auf der Netzhautoberfläche spreitendes „Rest-PFCL“ kann entfernt werden, indem über Infusions-Port oder Sklerostomie Wasser auf den hinteren Pol gegeben wird (zentral der Foramina!), in dem sich PFCL als wieder zusammenhängende Flüssigkeitsblase sammeln kann. Diese kann dann leichter unter konsekutiver Luftzufuhr zusammen entfernt werden (siehe ► **Video 7** [Zusatzmaterial G]).

Auch muss hier erwähnt werden, dass größere Mengen von PFCL bei erhöhtem Intraokularer Druck durch freigeschnittene innere Öffnungen der Vortexvenen, z. B. bei Traumachirurgie oder onkologischen Chorioidektomien (Endoresektion) in den systemischen Blutkreislauf gelangen können [19]. Durch den geringeren Dampfdruck von Dekalin ist dies wahrscheinlich weniger problematisch als bei Octan, das einen deutlich höheren Dampfdruck besitzt und durch die Erwärmung im systemischen Kreislauf bereits zu signifikanter Evaporation mit Luftembolie und konsekutiven fatalen Folgen führen kann [20]. Diese Problematik kann grundsätzlich durch Kauterisation und Durchtrennung der betroffenen Vortexvenen unterbunden werden [21].

Weiterhin gab es in den vergangenen Jahren Berichte über toxische Reaktionen beim Einsatz von Perfluorocarbonen [22]. Diese waren allesamt auf herstellungsbedingte Verunreinigung zurückzuführen [23]. Als Konsequenz sollte auf eine möglichst maximale Reinheit der Flüssigkeiten geachtet werden. Als Orientierung wurde der sog. H-Wert definiert, der als Maß für die Reinheit der Substanzen gilt und beim Hersteller erfragt werden kann [24]. Reguläre, hochgereinigte Perfluorocarbonate intraoperativ verwendet sind nicht toxisch.

Anwendung von Silikonöl und Silikonölgemischen bei der chirurgischen Versorgung von Netzhautablösungen

Allgemeines zur Silikonöltamponade

Die erste intraokulare Verwendung von Silikonöl (Polydimethylsiloxane) fand bereits in den frühen 60er-Jahren – weit vor der Möglichkeit, regelhaft zu Vitrektomieren – statt [25]. Scott und Zivovnjac leisteten ab 1971 Pionierarbeit bei der Verbindung von Vitrektomie und der Anwendung von Silikonöl, was es ins-

Charakteristika von PFCL, Silikonölen und Gemischen

	Spec. Gewicht [g/cm ³]	Viskosität [mPas·s]	Grenzflächen Spannung g.Wasser [mN/m]	Spreiten auf NH-Oberfläche unter Luft
Perfluorocarbonate				
Octane	1,78	1,4	55	++
Dekalin	1,92	5,53	53	++
Teilfluorierte PFCL (FALK)				
F ₈ H ₂	1,35	2,5	49	+
Polydimethylsiloxan (Sili)	0,97	1000 5000	45	-
Schweres Silikonöl (Sili-FALK Gemische)				
Densiron (30% Alkan)	1,06	1400		-
Oxane Hd (10% Alkan)	1,03	3300	41	-

► **Abb. 12** Charakteristika von Silikonöl und sog. „schweren Silikonöl“ als Mischung von Ölen mit teilfluorierten Perfluorocarbonen (adaptiert nach [8, 29, 30]).

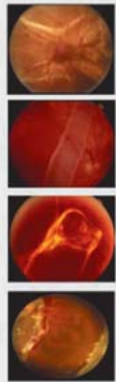
besondere ermöglichte, schwere Augenverletzungen und/oder Netzhautablösungen zu behandeln [26, 27]. Ein sehr detaillierter Beitrag über klassische Silikonöle in der vitreoretinalen Chirurgie liegt von Szurman und Bartz-Schmidt vor [28]. ► **Abb. 12** zeigt die Charakteristika der Silikonöle auch im Vergleich zu den PFCLs (► **Abb. 12**); [29, 30].

Interessant sind die Charakteristika der teilfluorierten PFCLs, die eine niedrigere Dichte als die klassischen PFCLs besitzen und als Bestandteile von Silikonölgemischen genutzt werden, um Silikonöl mit seinem eigentlichen spezifischen Gewicht von 0,97 g/cm³ schwerer zu machen, um insbesondere inferiore PVR-Ablationes besser behandeln zu können [31].

Das Problem bei einer Silikonöltamponade besteht nämlich generell darin, dass selbst bei der i. d. R. angestrebten kompletten Tamponade immer eine Wassersichel im unteren Bereich bestehen bleibt, in der sich Promotor-Stoffe zur PVR-Bildung ansammeln [32]. Dies ist der Grund, warum sich eine PVR-Reablatio regelmäßig unten ausbildet und in Folgeoperationen, neben ausgeprägtem Peeling epiretinaler Membranen, häufig auch mit inferioren Retinektomien behandelt werden muss. Somit hatte man gehofft, dass dieses Problem mit den sog. schweren Silikonölen gelöst werden könnte. Die Hochphase der Anwendung von schweren Silikonölen war etwa 2002 und Folgejahre. Eigene Auswertungen eines größeren klinischen Kollektivs entsprechend behandelte PVR-Ablationes an der Augen-Universitätsklinik in Regensburg ergaben allerdings keine verbesserte Wiederanlagerate gegenüber Studienergebnissen „konventioneller“ Chirurgie, die zumeist aus Vitrektomie, Cerclage, Retinektomie und regulärer Ölfüllung bestand [33]. Auch die multizentrisch prospektive HSO-Studie fand keinen Vorteil schwerer Öle gegenüber der Nutzung konventioneller Öle [34], genauso wie eine US-amerikanische Metaanalyse keinen Vorteil erkennen ließ, sodass in den USA schwere Öle nicht zugelassen wurden [35]. Zudem wird den schweren Ölen auch eine höhere Potenz für intraokulare Inflammation zugesprochen [36].

Somit kommen heute hauptsächlich nur noch reguläre leichte Silikonöle zur Anwendung. Präferiert wird eher eine hohe Viskosi-

Indikationen für die Anwendung von Silikonölen



- PVR – Ablatio Stadium C
- Riesenriß-Ablatio
- Traktionsablatio
- Retinektomien

► **Abb. 13** Indikationen zur Anwendung von Silikonölen in der Ablatiochirurgie.

tät von 5000 mPas, da diese eine geringere Emulsifizierungsneigung aufweist, die – je nach Dauer der Tamponade – schließlich zu einem Sekundärglaukom führen kann [37]. Bei der trokargeführten Vitrektomie werden aber auch Silikonöle mit niedriger Viskosität eingesetzt, da sie mutmaßlich leichter durch die niedrigvolumigeren Instrumente injiziert werden können. Doch auch 5000er-Silikonöl lässt sich mit niedrigeren Pumpdrücken relativ gut durch die 25-G-Trokare über die Maschine eingeben, wobei zum Entfernen eine Sklerostomie aufgemacht werden muss.

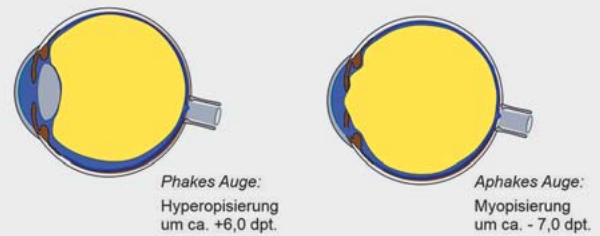
Indikationen für die Silikonölfüllung

Ein Teil der Anwendungsgebiete für Silikonöl ist in ► **Abb. 13** detailliert aufgelistet. Demnach werden alle PVR-C-Stadien und Retinektomien mit einer Silikonölfüllung behandelt, genauso wie Traktionsablationen, insbesondere, wenn Traktionen nicht adäquat entlastet werden können. Eine klassische Indikation für Silikonöl ist die Riesenrissablatio (Netzhautriss ≥ 3 Uhrzeiten), da bei Verwendung von Gas das Reablatio- und PVR-Risiko deutlich erhöht ist. Ebenfalls sei hier auch das erhöhte Ablatorisiko für das Partnerauge erwähnt, sodass bspw. eine prophylaktische Laser-Cerclage im Verlauf durchgeführt werden kann [38]. Weitere mögliche Anwendungsgebiete von Silikonöl sind die Trauma-chirurgie, komplizierte Lochkonfigurationen, die Notwendigkeit einer schnellen Visusrehabilitation bei Unicussituation und fehlender Lagerungsfähigkeit des Patienten sowie Reoperationen bei nicht verschlossenen Makulaforamina (hier kann auch C_2F_6 oder C_3F_8 genutzt werden), die Versorgung von subretinalen Massenblutungen (bei bspw. neovaskulärer AMD), und die Versorgung von Bulbushypotonien unterschiedlicher Genese.

Effekte einer Silikonöltamponade im Auge/ Ando-Iridektomie bei Aphakie

Eine Silikonöltamponade hat wesentliche Effekte im Auge, die sowohl dem Operateur als auch dem Nachbehandler bekannt sein sollten. In der Regel wird das Silikonöl durch ein intaktes Iris-Linsen-Diaphragma im Hinterabschnitt gehalten (► **Abb. 14**). Bei phaker Situation führt das zu einer Hyperopisierung von etwa 5–6 dpt, über die der Patient aufgeklärt sein sollte. Sollte es bspw.

Silikontamponade



Silikon wird durch das intakte Iris-Linsen-Diaphragma hinten gehalten

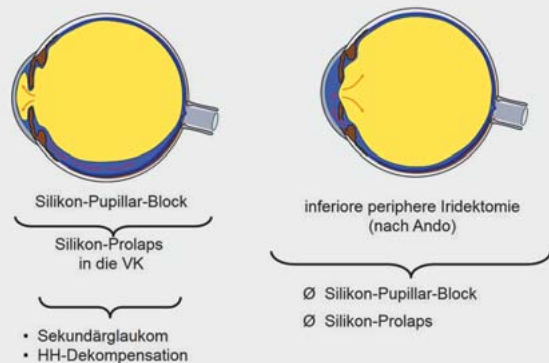
Bei Phakodonesis / Zonulolyse: Gefahr des Prolapses

► **Abb. 14** Refraktionsänderung durch Silikonölfüllung bei phakem und aphakem Auge.

durch Zonulolyse nach Trauma oder nach komplizierter Kataraktoperation (Sulcusimplantation, sklerafixierte Intraokularlinse [IOL] oder Iris-Clip-Linse) zu Insuffizienzen des Iris-Linsen-Diaphragmas gekommen sein, so kann Silikonöl in die Vorderkammer übertreten und bei länger dauerndem Hornhaut-Endothel-Kontakt zur Hornhautdekomensation führen. Dies muss möglichst vermieden und das Silikonöl in einem solchen Fall zügig zumindest aus der Vorderkammer entfernt werden. Sollte der Augendruck allerdings nicht zu hoch sein, kann auch bei komplett gefüllter Vorderkammer eine kürzere Zeit zugewartet werden (Wochen), bis die Netzhaut soweit stabilisiert ist, dass auch eine komplette Silikonölentfernung angestrebt werden kann. Kann für eine längere Zeit nicht auf die Silikonöltamponade verzichtet werden, so ist die Entfernung der Intraokularlinse inkl. Kapselsack (Aphakie) notwendig und eine inferiore Iridektomie bei 6 Uhr nach Ando durchzuführen [39], um so einen Silikonölprolaps bei aphaker Situation mit der Gefahr eines Pupillarblockes zu vermeiden (► **Abb. 15**). Durch die inferiore Iridektomie bei 6 Uhr nach Ando kann das Kammerwasser, dessen transpupillärer Weg durch das Silikonöl blockiert ist, über diesen „Bypass“ in die Vorderkammer gelangen und somit das Öl hinter der Pupillarebene halten. Manche Operateure legen 2 weitere periphere Iridektomien nasal und temporal an, in der Vorstellung, auch in Seitenlage den Kammerwasserstrom aufrechtzuerhalten. Liegt aber eine Bulbushypotonie infolge Ziliarkörperinsuffizienz vor, kann auch eine offene Ando-Iridektomie das Silikonöl nicht hinter der Pupillarebene halten. Dies sind dann sehr schwierige Situationen, in denen das Silikonöl nur zur Phthisis-Prophylaxe belassen und nicht selten eine Keratopathie in Kauf genommen wird. Ein ölgefülltes aphakes Auge kann i. d. R. zu einer deutlichen Myopisierung bis ca. – 7 dpt führen (► **Abb. 14**).

Bezüglich der z. T. erheblichen postoperativen Refraktionsänderungen nach Silikonölfüllung muss insbesondere bei noch gutem Visus die Anisometropie- und Aniseikonieproblematik berücksichtigt und der Patient entsprechend aufgeklärt werden. Gegebenenfalls kann für den Zeitraum der Öltamponade ein Ausgleich über eine Kontaktlinse erreicht werden oder es muss eine frühe Ölentfernung angestrebt werden, die dann nach etwa 6 Wochen erfolgen kann, da alle notwendigen Vernarbungen

Silikon tamponade beim aphakem Auge



► **Abb. 15** Problematik der Silikonölfüllung bei aphakem Auge und Notwendigkeit der Anlage einer Ando-Iridektomie bei 6 Uhr.

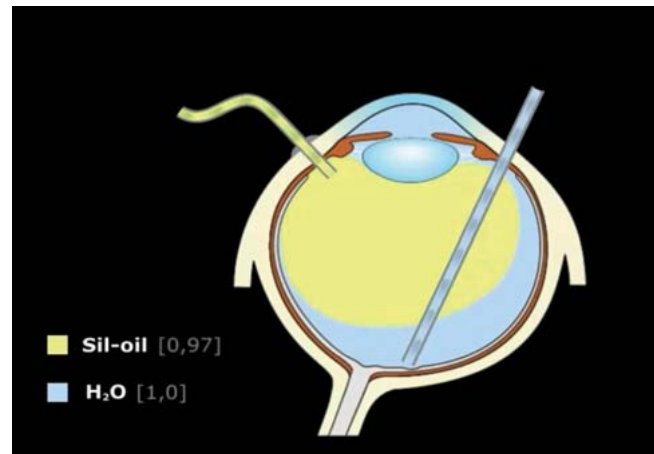
netzhautseitig zu diesem Zeitpunkt gewährleistet sein sollten. In unkomplizierten Fällen kann eine Silikonölföpfung zu jedem beliebigen späteren Zeitpunkt erfolgen.

Visusverlust durch Silikonöl

Als wichtiger Punkt ist bei der Silikonölföpfung immer auch das zwar geringe, aber dennoch vorhandene Risiko eines irreversiblen starken Visusabfalls zu beachten, dessen Ursachen nach wie vor ungeklärt sind [40]. Insbesondere bei primärer „Makulaon-Situation“ und relativ gutem Ausgangsvisus ist dieses Risiko nicht zu vernachlässigen und bei stabilen Netzhautverhältnissen eine zeitnahe Silikonölföpfung anzustreben. Allerdings kann auch die Silikonölföpfung – bei noch gutem Visus unter Silikonöl – zu einem entsprechenden Visusabfall führen. Daher sollte die Indikation für Silikonöl in jedem Fall, aber insbesondere bei Augen mit hohem Visuspotenzial, sorgfältig abgewogen werden. Der Patient sollte über diesen Umstand aufgeklärt sein.

Chirurgisches Vorgehen zur Silikonölföpfung

Die folgenden Zusatzmaterialien illustrieren die Anwendung von Silikonöl im Rahmen der Vitrektomie. Die einfache Füllung des wassergefüllten Auges mit Silikonöl ist über den Infusions-Port möglich. Die Ölspritze wird an den 3-Wege-Hahn angesetzt (► **Abb. 1**) und dieser dann von der Wasserinfusion auf die Ölinstillation umgestellt. Die heutigen Maschinen können das Öl mit variabler Geschwindigkeit in das Auge hineinpumpen. Natürlich muss – wie oben auch bei den vorherigen Techniken erläutert – die Flötennadel in der Wasserphase platziert sein, um zum Ende der Ölföpfung hin direkt am hinteren Pol den Rest Wasser „absaugen“ zu können und somit eine möglichst komplette Ölföpfung zu gewährleisten (► **Abb. 16/Video 8 [Zusatzmaterial H]**). Denkbar wäre ein solcher direkter Wasser-Öl-Austausch bspw. bei der Behandlung eines Hypotoniesyndroms, im Rahmen einer schweren proliferativen Retinopathie mit anliegender Netzhaut, einer Versorgung mit Aderhaut-Patch oder eines schweren Bulbustrasmas. Bei Ablationsituationen muss die Netzhaut sinnvollerweise, wie oben beschrieben, vorher unter PFCL oder Luft angelegt sein, sodass das in ► **Abb. 16** dargestellte einfachere Prozedere nur sehr

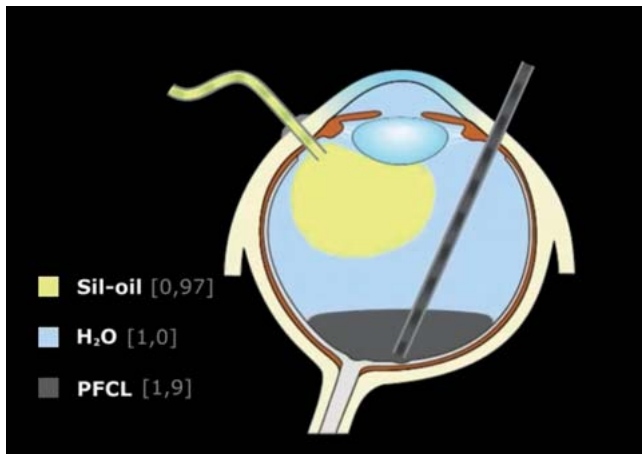


► **Abb. 16** Silikonöl wird über den Infusions-Port maschinenseitig in den Glaskörperraum gedrückt, das Öl ist leichter als Wasser, bewegt sich somit von oben nach unten und drückt Wasser über die am hinteren Pol positionierte Flötennadel nach extern (siehe ► **Video 8 [Zusatzmaterial H]**).

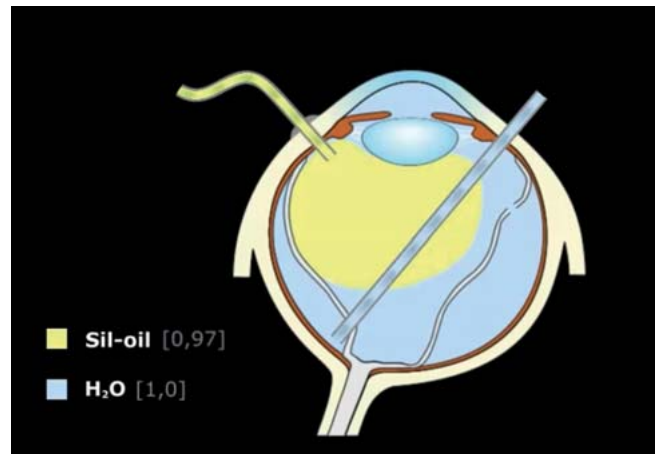
selten im klinischen Alltag benötigt wird, aber das grundlegende Prinzip der Ölinjektion verdeutlicht.

Gleichsam wie in ► **Abb. 16** kann auch ein direkter Öl-PFCL-Austausch durchgeführt werden, indem Silikonöl über den Infusions-Port in den PFCL-gefüllten Bulbus eingegeben wird und die Flötennadel in der PFCL-Phase bis zum kompletten Austausch platziert bleibt (► **Abb. 17/Video 9 [Zusatzmaterial I]**). In den bisherigen Vitrektomiekursen haben wir dabei regelmäßig diskutiert, wie groß die in dieser Abbildung und Animation dargestellte Wasserphase zwischen Silikonöl und PFCL sein darf oder sein sollte. Prinzipiell kann sich PFCL mit Öl an der Grenzfläche mischen, was verhindert werden soll. Andererseits kann es beim Austausch – wie bereits oben beschrieben – zu einer Reablation kommen, wenn die Wasserphase zu groß ist und im Bereich der noch nicht vernarbten Foramina dieses Wasser dann wieder nach subretinal tritt.

Es ist daher sinnvoll, die Wasserphase so klein wie möglich zu halten, sodass im Rahmen der häufig in solchen Situationen zum Einsatz kommenden 20-G-Vitrektomie zunächst über den Infusions-Port das Öl eingegeben wird, das im anterioren Bereich das über dem PFCL stehende Wasser über die offene Sklerostomie verdrängt. Entweder lässt man eine Sklerostomie offen (in der anderen steckt der Lichtleiter!) oder positioniert die Flötennadel solange in der Wasserphase. Sobald das Wasser komplett verdrängt ist, kommt es zu einer intraokularen Druckerhöhung, was sich durch das beginnende Pulsieren der Zentralarterie bemerkbar machen kann. In diesem Moment muss die Flötennadel spätestens in die PFCL-Phase eingetaucht sein und der Austausch kann nun unter weiterer Injektion von Silikonöl bei regulären Druckverhältnissen erfolgen. Zum Ende hin kann der PFCL-Spiegel unter Öl i. d. R. relativ gut visualisiert werden, sodass PFCL-Reste gut und im idealen Fall über der Papille vorsichtig „abgesaugt“ werden können. Absaugen ist hier natürlich nicht der richtige Terminus, da die Verdrängung des PFCL „passiv“ durch den Öldruck erfolgt. Da die silikonölföführenden Schläuche elastisch sind, darf gerade



► **Abb. 17** Gleichsam wie in ► **Abb. 16** kann ein direkter Öl-PFCL-Austausch durchgeführt werden, indem Silikonöl über das Sternchen eingegeben wird und die Flötennadel in der PFCL-Phase bis zum kompletten Austausch platziert ist (siehe ► **Video 9 [Zusatzmaterial I]**). Wie im Text diskutiert, sollte entgegen der Abbildung die Wasserphase so klein wie möglich gehalten werden.



► **Abb. 18** Direkte Öleingabe über den Infusions-Port bei abgelöster Netzhaut und Drainage subretinaler Flüssigkeit mittels Flötennadel über zentrale Foramina (eher ungünstige, aber mögliche Situation bei schwierigen PVR-Ablationes oder komplexen Traumafällen; siehe ► **Video 10 [Zusatzmaterial II]**).

zum Ende hin nur noch vorsichtig injiziert werden, da Öl noch länger „nachläuft“ und es zum akzidentellen Ansaugen der zentralen Netzhaut in die Öffnung der Flötennadel kommen kann – eine extrem heikle Situation, die es unbedingt zu vermeiden gilt. Es kann sein, dass eventuell mehrmals mit der Flötennadel einzugehen ist, um sämtliche Reste des PFCL entfernen zu können. Zwischendurch sollte die Nadel dann allerdings aktiv durchgespült werden, da die Öffnung durch das Öl verstopfen kann und ein weiterer Austausch damit nicht mehr möglich wäre.

Durchaus häufiger – da deutlich einfacher – wird heute ein indirekter Austausch von PFCL gegen Silikonöl über den Zwischenschritt einer Luftfüllung (s. o.) durchgeführt, der allerdings bei schwierigeren Situationen ein höheres Risiko von „Slippage“ subretinaler Flüssigkeit aufweist, was es zu vermeiden gilt.

Der Vorteil des indirekten Austausches liegt darin, dass das Silikonöl relativ einfach in den komplett luftgefüllten Bulbus bei idealerweise anliegender Netzhaut über die Arbeitssklerostomie „von unten nach oben“ in den Bulbus eingefüllt werden kann. Dies geschieht regelhaft je nach Ölfüllungsgrad während der Injektion unter sukzessivem Reduzieren des intraokularen Luftdruckes maschinenseitig. Die Luft wird während der Befüllung nach oben über die Sklerostomien verdrängt und es kann die Restluftblase zum Ende hin über die 2. Sklerostomie einfach mittels der Flötennadel entfernt werden. Da der Infusions-Port während dieses Prozesses lediglich Luft führt, kann zum Ende hin ein Eintreten des Öles in den Infusions-Port (maschinenseitiger Luftdruck sollte dann „Null“ betragen und/oder der 3-Wege-Hahn für Luftzufuhr geschlossen sein) beobachtet werden, was sicher anzeigt, dass das Hintersegment des Auges komplett mit Öl gefüllt ist.

Intraoperative Probleme bei der Silikonölfüllung

Ein direkter Austausch von Wasser gegen Silikonöl ist seit Einführung von PFCL selten geworden. Wie bereits oben angedeutet, kann es aber Situationen geben, in denen sich eine intraokulare

Wiederanlage der Netzhaut mittels PFCL oder Luft, z. B. bei sehr zentralen und großen Foramina und Traktionsablaciones oder in schwierigen Situationen bei Trauma, nicht bewerkstelligen lässt. In solchen Fällen kann nach bestmöglicher Traktionsentlastung auch eine direkte Ölfüllung über den Infusions-Port und eine direkte Drainage subretinaler Flüssigkeit mittels Flötennadel durch zentrale Foramina erfolgen (► **Abb. 18/Video 10 [Zusatzmaterial II]**). Dieses Vorgehen ist sicherlich nicht ideal und beinhaltet ein hohes PVR-Reablatio-Risiko. In entsprechenden Fällen kann es aber eine zunächst unübersichtliche Ausgangssituation insoweit stabilisieren, dass eine eventuelle Revisionsoperation sorgsam geplant werden kann.

Auch wird es bei einem direkten PFCL-Silikonöl-Austausch schwieriger, wenn sich die Netzhaut während der Ölfüllung bei zuvor unter PFCL anliegender Netzhaut wieder abhebt. Dann kann ggf. eine iatrogene Retinotomie an geeigneter Stelle mit anschließender subretinaler Drainage unter Silikonöl helfen, subretinale Restflüssigkeit zu entfernen. In noch schwierigeren Fällen kann es sein, dass das Öl nochmals komplett entfernt werden muss und bspw. über ausgedehntere Retinektomien nachgearbeitet werden muss. In solchen Fällen wird dann ein frischer Infusions-Port benötigt, da der 1. Port mit Öl verstopft ist und i. d. R. danach keine weitere Wasserinfusion mehr möglich ist.

Intraoperativ kann es – wie ebenfalls oben bereits angedeutet – bei aphaker Situation und notwendiger Ölfüllung zu einem Kammerwinkelblock aufgrund des Öldruckes kommen. Daher kann vor einer Ölfüllung die Vorderkammer mittels Viskoelastikum „gestellt“ werden, um so den Kammerwinkel anatomisch offen zu halten und somit in der Rückenlage einen Pupillarblock durch das von hinten drückende Silikonöl zu vermeiden. Alternativ kann das gesamte Auge inkl. Vorderkammer mit Öl gefüllt werden (Kammerwinkel muss dann unter Öl ausgestrichen werden), wenn das Auge am Ende der Operation mit einem sehr niedrigen Intraokulardruck verlassen wird (hier kann ggf. die Schiötz-Tonometrie helfen).

Durch den niedrigen Druck (cave: Risiko von Nachblutungen!) hat man quasi im Vorfeld Volumen geschaffen, sodass sich die Vorderkammer nach der OP und bei Bauchlage selbstständig wieder mit Wasser füllen und das Öl aus der Vorderkammer in das Hintersegment – bei Normotension – fließen kann. Eine weitere Möglichkeit stellt die Engstellung der Pupille mittels intrakameralem Acetylcholin vor Öleingabe unter Belassung von Wasser oder Luft in der Vorderkammer dar. Diese Maßnahmen setzen eine offene Andoliridektomie voraus, wobei darauf geachtet werden muss, dass sie definitiv gut durchgängig ist und auch sämtliche Kapselbestandteile im unteren Bereich nicht mehr vorhanden sind. Postoperativ sollte eine frühmögliche Bauchlage und anschließende Druckkontrolle auf Station indiziert werden. Bei möglicher Druckerhöhung unter Nutzung von intrakameralem Viskoelastikum kann dieses postoperativ relativ einfach über eine Parazentese an der Spaltlampe zur Druckentlastung abgelassen werden.

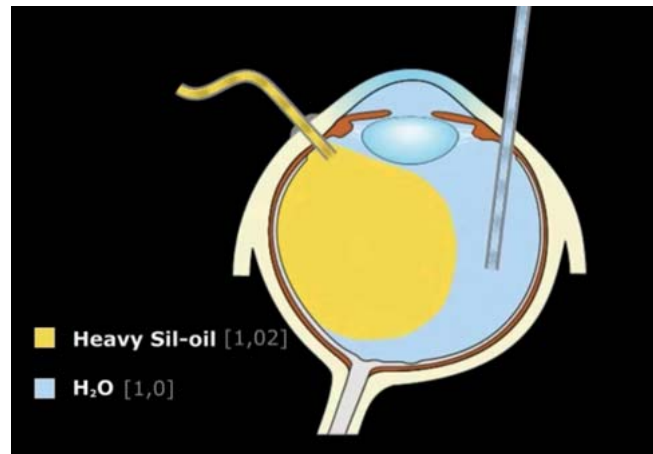
Entfernung von Silikonöl

Eingebrachtes Silikonöl sollte bei stabiler Netzhautsituation i. d. R. – es sei denn, die Prognose quoad visum ist schlecht oder der retinale Befund entsprechend desolat, dass sich eine Entfernung verbietet – wieder entfernt werden. Als Dauertamponade sollte es bei persistierender Bulbushypotonie oder Phthisis belassen werden. Daneben kann das Belassen des Silikonöls auch bei Zustand nach mehrfachen Operationen bei Reablatio sinnvoll sein. Auch können unter Silikonöl selten mal inferior periphere Ablatio-situationen dauerhaft stabil bleiben, sodass keine weiteren Operationen angestrebt werden müssen. Verbleibt Silikonöl allerdings lange Zeiträume wie bspw. über Jahre im Auge, kann es, wie bereits oben erwähnt, zur Ölemulsifikation in unterschiedlicher Ausprägung und zu einem Sekundärglaukom kommen.

Die chirurgische Ölentfernung sollte klassisch gleichermaßen über eine 3-Port-Vitrektomie stattfinden, bei der nach Anlegen der Sklerostomien oben zunächst idealerweise mit einer bspw. großvolumigen Vigo-Kanüle das Öl aktiv manuell oder mittels Maschine abgesaugt wird. Je nach Infusionsdruck kann es während des Manövers zu „Turbulenzen“ im Glaskörperraum kommen, sodass durch den Wassereinstrom verdrängte tiefer schwimmende Ölblasen sich erst langsam nach oben bewegen. Auch kann der in das Silikonöl tauchende Infusions-Port zu Beginn der Operation bereits verstopft sein, sodass einmal der Intraokulardruck maschinenseitig kurzzeitig deutlich erhöht werden muss, um die Öffnung freizudrücken. Nach erfolgreicher Ölentfernung sollte definitiv nochmals vitrektomiert werden, um ggf. peripher noch vorhandene Glaskörperreste zu entfernen (häufiger noch anterior vorhanden, wenn bei der Ölentfernung gleichzeitig die Katarakt mit entfernt wird), zu überprüfen, ob die Netzhaut sicher anliegt und schließlich – wie bereits oben beschrieben – über einen etwa 3-maligen Wasser-Luft-Austausch die restlichen Ölbläschen sicher zu entfernen. Es wird davor gewarnt, den Vitrektomieteil zu übergehen und lediglich Öl „abzulassen“, da somit relevante mögliche Probleme nicht erkannt werden können.

Schweres Silikonöl

Die Autoren dieses Manuskriptes sehen heutzutage – aufgrund eigener Erfahrungen und auf Basis der dargestellten Studienergebnisse (s. o.) – keine zwingend notwendige Indikation mehr



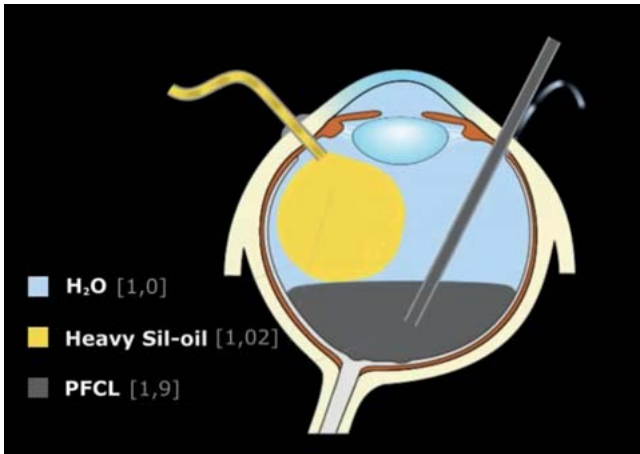
► **Abb. 19** Eingabe von schwerem Silikonöl in Wasser: Das Öl verdrängt im mittleren Verlauf der Füllung eher den unteren Teil des Wassers, sodass die Flötennadel zum Ende hin eher Restwasser im anterioren Augenbereich „absaugen“ muss (siehe ► **Video 11** [Zusatzmaterial K]).

für schweres Silikonöl. Da es aber dennoch erhältlich ist, wahrscheinlich auch benutzt wird und zumindest immer auch noch Entfernungen von schwerem Silikonöl durchgeführt werden müssen, soll das Vorgehen mit schwerem Silikonöl ebenfalls kurz dargestellt werden.

Das Einbringen von schwerem Silikonöl funktioniert prinzipiell gleichermaßen wie bereits in ► **Abb. 16** dargestellt. Da es allerdings schwerer als Wasser ist, bewegt sich die Ölmasse in Wasser deutlich schneller nach unten, sodass im Gesamtprozess der Füllung die Flötennadel im Verlauf nach oben gezogen werden muss, da sich das Restvolumen Wasser zum Ende hin eher im oberen Bereich befindet (► **Abb. 19/Video 11** [Zusatzmaterial K]).

► **Abb. 20** und **21** zeigen das Vorgehen bei der Eingabe von schwerem Silikonöl über PFCL. Auch hier muss – wie bereits für ► **Abb. 17** diskutiert – zunächst das Wasser oberhalb der PFCL-Phase während des Austausches verdrängt werden. Dies kann mit oder ohne eingebrachte Flötennadel geschehen (► **Abb. 20/Video 12** [Zusatzmaterial L]). Sobald das Wasser allerdings verdrängt ist, kommt es über die Flötenkanüle zur weiteren Verdrängung des PFCL, allerdings mit dem potenziellen Risiko, dass sich beide Stoffe aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften (hoher Anteil von teilfluoriertem PFCL im schweren Silikonöl; ► **Abb. 12**) insbesondere bei den Verwirbelungen im Bereich der Absaugkanüle mischen und somit entsprechende Reste mit veränderten Eigenschaften im Auge verbleiben (► **Abb. 21/Video 12** [Zusatzmaterial L]).

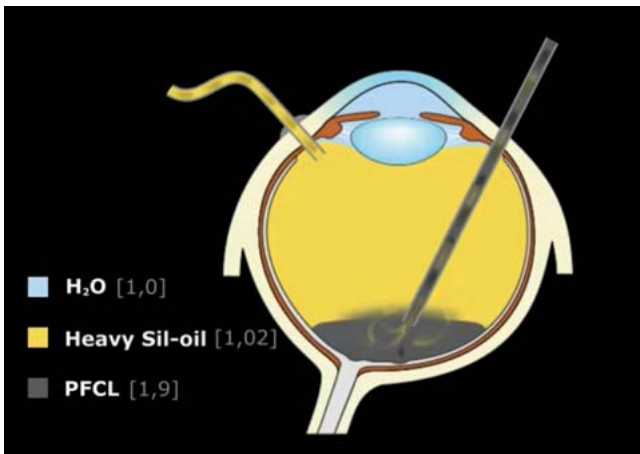
Dies führt dazu, dass eine Ölentfernung von schwerem Silikonöl sich aus zweierlei Gründen schwieriger gestaltet als bei der regulären Entfernung. Erstens benötigt man eine lange Absaugkanüle, die idealerweise bis zum hinteren Pol reichen muss und die das Risiko der Anwendung von hohem Sog nah an der Netzhaut beinhaltet. Zweitens entsteht manchmal die unschöne Situation von „sticky oil“ auf der Netzhautoberfläche, die es erschwert, das Öl komplett und ohne iatrogene Schäden nah von der Netzhautoberfläche zu entfernen (► **Abb. 22/Video 13** [Zu-



► **Abb. 20** Eingabe von schwerem Silikonöl auf PFCL. Nach Verdrängung des Wassers (auch ohne Flötennadel möglich) wird schließlich PFCL über die Flötennadel verdrängt (siehe ► **Video 12** [Zusatzmaterial L]).



► **Abb. 22** Entfernung von schwerem Öl am hinteren Pol. Die Ölrückstände können auf der Netzhautoberfläche als „sticky oil“ kleben und teilweise kaum zu entfernen sein. Die Flötennadel muss lang genug sein, um dicht am hinteren Pol arbeiten zu können (siehe ► **Video 13** [Zusatzmaterial M]).



► **Abb. 21** Eingabe von schwerem Silikonöl auf PFCL. Nach der Wasserverdrängung kann es aufgrund der ähnlichen Eigenschaften von PFCL und den teilfluorierten Ölen zu Vermischungen an der Grenzfläche kommen, sodass ein höheres Risiko für entsprechende Rückstände beider vermischten Agenzien besteht (siehe ► **Video 12** [Zusatzmaterial L]).

satzmaterial M]). Kirchoff empfiehlt bei entsprechenden Problemen die Eingabe von PFCL am hinteren Pol, womit sich durch Mischung die Entfernung einfacher gestalten lassen soll [31].

Fazit

Ziel dieses Manuskriptes war es, das grundlegende Basiswissen im Bereich der vitrektomiebasierten Ablatiochirurgie und weiterer Pathologien mit besonderer Fokussierung auf das Handling der zur Verfügung stehenden intraokularen Tamponaden zu vermitteln. Diese Arbeit erhebt keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit und auch nicht den Anspruch, die besonderen Tipps aller Ope-

rateure korrekt abzubilden. Das Erlernen der Vitrektomie gerade bei Ablatio retinae ist weniger standardisiert als bspw. das Erlernen der klassischen Kataraktoperation und der chirurgische Weg ist weniger klar vorhersehbar und kann erheblich variieren. Je nachdem, in welcher „Schule“ man die Netzhaut- und Glaskörperchirurgie erlernt hat, variieren in gleicher Weise das individuelle Vorgehen oder auch entsprechende individuelle Vorlieben verschiedener Operateure. Die hier dargestellten Grundlagen entsprechen grundsätzlich den Vorgaben ihres geschätzten Lehrers Herrn Prof. Dr. V.-P. Gabel, München und Regensburg (für HGS und CF), der die Vitrektomie seit Beginn der 70er-Jahre mitbegleitet und die auch heute noch immer geltenden Prinzipien in den als Online-Zusatzmaterialien eingefügten Animationen kreiert hat. Auch die Co-Autoren der „erweiterten Essener Vitrektomie-Schule“ als Schüler von Michael H. Foerster (JW, NEB) und Horst Laqua (HH) schließen sich den Ausführungen und den Diskussionen im Laufe der letzten Jahrzehnte mit V.-P. Gabel an. Dieses Manuskript ist ihm gewidmet.

Zusatzmaterial

Die entsprechend markierten Abbildungen sind hauptsächlich mit Videoanimationen hinterlegt, die das beschriebene operative Vorgehen nochmals anschaulich verdeutlichen sollen, wodurch ein bestmöglicher Lerneffekt erreicht werden kann.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Dr. I. Volkmann, Hannover, für die finale Aufbereitung der Video-Zusatzmaterialien für diesen Artikel.

Interessenkonflikt


Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Faude F, Meier P, Wiedmann P. Eindellende Operationen bei rhegmatogener Amotio retinae. *Ophthalmologie* 2002; 90: 308–323
- [2] Hoerauf H, Heimann H, Hansen L et al. Skleraeindellende Ablatiochirurgie und pneumatische Retinopexie. Techniken, Indikationen und Ergebnisse. *Ophthalmologie* 2008; 105: 7–18
- [3] Radeck V, Helbig H, Barth T et al. Ablatiochirurgie: Trends über 15 Jahre. *Ophthalmologie* 2022; 119 (Suppl. 1): S64–S70. doi:10.1007/s00347-021-01430-4
- [4] Nishitsuka K, Kawasaki R, Yamakiri K et al.; Japan Retinal Detachment Registry Group. Preoperative factors to select vitrectomy or scleral buckling for retinal detachment in microincision vitrectomy era. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2020; 258: 1871–1880. doi:10.1007/s00417-020-04744-2
- [5] Walter P, Hellmich M, Baumgarten S et al.; VIPER Study Group. Vitrectomy with and without encircling band for pseudophakic retinal detachment: VIPER Study Report No 2 – main results. *Br J Ophthalmol* 2017; 101: 712–718. doi:10.1136/bjophthalmol-2016-309240
- [6] Faude F, Wiedemann P. Intraokulare Gase in der Glaskörper- und Netzhautchirurgie. Teil I: Grundlagen. *Ophthalmologie* 1999; 96: 349–358
- [7] Faude F, Wiedemann P. Intraokulare Gase in der Glaskörper- und Netzhautchirurgie. Teil II: Klinik. *Ophthalmologie* 1999; 96: 413–420
- [8] Faude F, Wolf S, Wiedemann P. Flüssige Perfluorkarbone in der Glaskörper- und Netzhautchirurgie. *Ophthalmologie* 2000; 97: 652–661
- [9] Chang S. Intraocular Gases. In: Ryan SJ, ed. *Retina*. 2nd ed.; St. Louis: Mosby-Year Book; 1989: 2115–2129
- [10] Pastor JC, Rojas J, Pastor-Idoate S et al. Proliferative vitreoretinopathy: A new concept of disease pathogenesis and practical consequences. *Prog Retin Eye Res* 2016; 51: 125–155. doi:10.1016/j.preteyeres.2015.07.005
- [11] Hecht I, Mimouni M, Blumenthal EZ et al. Sulfur Hexafluoride (SF₆) versus Perfluoropropane (C₃F₈) in the Intraoperative Management of Macular Holes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Ophthalmol* 2019; 2019: 1820850. doi:10.1155/2019/1820850
- [12] Hillenkamp J, Surguch V, Framme C et al. Management of submacular hemorrhage with intravitreal versus subretinal injection of recombinant tissue plasminogen activator. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2010; 248: 5–11. doi:10.1007/s00417-009-1158-7
- [13] Feltgen N, Hoerauf H. Aktueller Stellenwert von schweren Flüssigkeiten als intraoperatives Hilfsmittel bei vitreoretinalen Eingriffen. *Ophthalmologie* 2019; 116: 919–924
- [14] Framme C, Junker B, Feltgen N et al. Indikationen bei Intravitrealer Injektionstherapie mit Anti-VEGF für Makulaerkrankungen – Fehler vermeiden. *Ophthalmologie* 2022; 119: 309–326. doi:10.1007/s00347-021-01553-8
- [15] Chang S. Low viscosity liquid fluorochemicals in vitreous surgery. *Am J Ophthalmol* 1987; 103: 38–43
- [16] Chang S, Zimmerman NJ, Iwamoto T et al. Experimental vitreous replacement with perfluorotributylamine. *Am J Ophthalmol* 1987; 103: 29–37
- [17] Gamulescu MA, Helbig H, Bartz-Schmidt UK. Luftembolie bei Vitrektomie? *Klin Monbl Augenheilkd* 2010; 227: 185–186. doi:10.1055/s-0028-1109959
- [18] Morris RE, Sapp MR, Oltmanns MH et al. Presumed air by vitrectomy embolisation (PAVE) a potentially fatal syndrome. *Br J Ophthalmol* 2014; 98: 765–768. doi:10.1136/bjophthalmol-2013-303367
- [19] Jousseaume AM, Wong D. Egress of large quantities of heavy liquids from exposed choroid: a route for possible tumor dissemination via vortex veins in endoresection of choroidal melanoma. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2015; 253: 177–178
- [20] Fiorentzis M, Bechrakis NE. Vortex vein cauterization and truncation to avoid perfluorocarbon syndrome during endoresection of uveal melanomas: a retrospective study. *Eye (Lond)* 2022. doi:10.1038/s41433-022-02119-x
- [21] Rojanaporn D, Tipsuriyaporn B, Chulalaksiriboon P et al. Fatal Air Embolism after Choroidal Melanoma Endoresection without Air Infusion: A Case Report. *Ocul Oncol Pathol* 2021; 7: 321–325
- [22] Pastor JC, Coco RM, Fernandez-Bueno I et al. Acute Retinal Damage after Using a Toxic Perfluoro-Octane for Vitreo-Retinal Surgery. *Retina* 2017; 37: 1140–1151
- [23] Menz DH, Feltgen N, Lechner T et al. Hydrofluoric Acid and Other Impurities in Toxic Perfluorooctane Batches. *Transl Vis Sci Technol* 2019; 8: 24. doi:10.1167/tvst.8.3.24
- [24] Menz DH, Feltgen N, Menz H et al. How to Ward Off Retinal Toxicity of Perfluorooctane and Other Perfluorocarbon Liquids? *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59: 4841–4846
- [25] Cibis PA, Becker B, Okun E et al. The use of liquid silicone in retinal detachment surgery. *Arch Ophthalmol* 1962; 68: 590–599
- [26] Scott JD. A rationale for the use of liquid silicone. *Trans Ophthalmol Soc UK (1962)* 1977; 97: 235–237
- [27] Zivojnović R, Mertens DA, Baarsma GS. Das flüssige Silikon in der Amotiochirurgie. Bericht über 90 Fälle. *Klin Monbl Augenheilkd* 1981; 179: 17–22
- [28] Szurman P, Bartz-Schmidt KU. Silikonöl in der Netzhautchirurgie. *Ophthalmologie* 2000; 97: 514–525. doi:10.1007/s003470070085
- [29] Bausch + Lomb. Oxane®-Silikonöle. Im Internet (Stand: 05.01.2022): <https://www.bausch-lomb.de/fachbereich/augenchirurgen/vitreoretinale-tamponaden/oxaner/>
- [30] Fluron®. Densiron® 68. Die bewährte „Schwerer-als-Wasser“-Silikonöl-tamponade. Im Internet (Stand: 05.01.2022): https://www.fluoron.de/produkte_loesungen/langzeit-tamponaden/densiron-68/
- [31] Kirchhof B. Vor- und Nachteile des schweren Silikonöls. *Ophthalmologie* 2010; 107: 566, 568–570. doi:10.1007/s00347-010-2215-7
- [32] Jousseaume AM, Kirchhof B, Schrage N et al.; HSO Study Group. Heavy silicone oil versus standard silicone oil as vitreous tamponade in inferior PVR (HSO Study): design issues and implications. *Acta Ophthalmol Scand* 2007; 85: 623–630. doi:10.1111/j.1600-0420.2007.00898.x
- [33] Regler R, Sachs HG, Hillenkamp J et al. Long-term evaluation of anatomic and functional results after complicated retinal detachment treated with pars plana vitrectomy and heavy silicone oil tamponade. *Klin Monbl Augenheilkd* 2009; 226: 707–712. doi:10.1055/s-0028-1109685
- [34] Jousseaume AM, Rizzo S, Kirchhof B et al.; HSO Study Group. Heavy silicone oil versus standard silicone oil in as vitreous tamponade in inferior PVR (HSO Study): interim analysis. *Acta Ophthalmol* 2011; 89: e483–e489. doi:10.1111/j.1755-3768.2011.02139.x
- [35] Schwartz SG, Flynn HW Jr., Lee WH et al. Tamponade in surgery for retinal detachment associated with proliferative vitreoretinopathy. *Cochrane Database Syst Rev* 2014; (2): CD006126. doi:10.1002/14651858.CD006126.pub3
- [36] Morescalchi F, Costagliola C, Duse S et al. Heavy silicone oil and intraocular inflammation. *Biomed Res Int* 2014; 2014: 574825. doi:10.1155/2014/574825
- [37] Lucke K, Strobel B, Foerster M et al. Sekundärglaukome nach Silikonölchirurgie. *Klin Monbl Augenheilkd* 1990; 196: 205–209. doi:10.1055/s-2008-1046155
- [38] Framme C, Hoerauf H, Wachtlin J et al. Retinale Lasertherapie – Fehler vermeiden. *Ophthalmologie* 2020; 117: 169–188. doi:10.1007/s00347-019-01035-y
- [39] Beekhuis WH, Ando F, Zivojnović R et al. Basal iridectomy at 6 o'clock in the aphakic eye treated with silicone oil: prevention of keratopathy and secondary glaucoma. *Br J Ophthalmol* 1987; 71: 197–200. doi:10.1136/bjo.71.3.197
- [40] Lappas A, Dietlein TS, Rosentreter A et al. Visusverlust nach Silikonölchirurgie. *Klin Monbl Augenheilkd* 2018; 235: 725–729. doi:10.1055/s-0042-120281

Zusatzmaterial

▶ VIDEO



▶ Video 1 Zusatzmaterial A.

▶ VIDEO



▶ Video 4 Zusatzmaterial D.

▶ VIDEO



▶ Video 2 Zusatzmaterial B.

▶ VIDEO



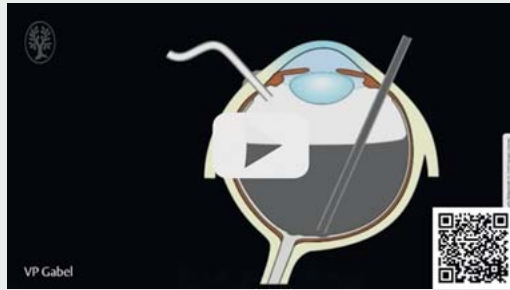
▶ Video 5 Zusatzmaterial E.

▶ VIDEO



▶ Video 3 Zusatzmaterial C.

▶ VIDEO



▶ Video 6 Zusatzmaterial F.

▶ VIDEO



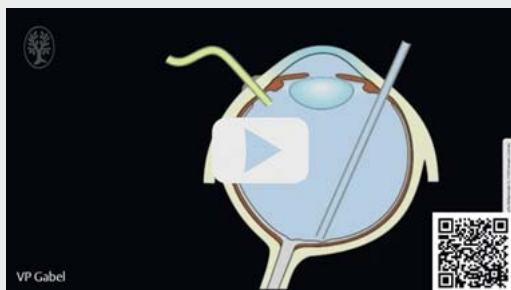
▶ Video 7 Zusatzmaterial G.

▶ VIDEO



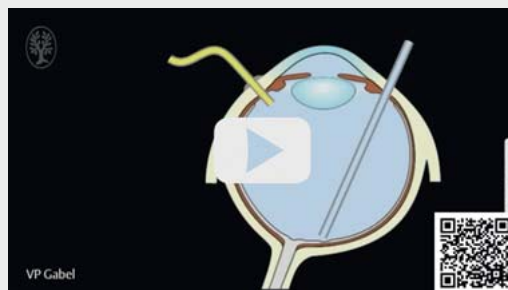
▶ Video 10 Zusatzmaterial J.

▶ VIDEO



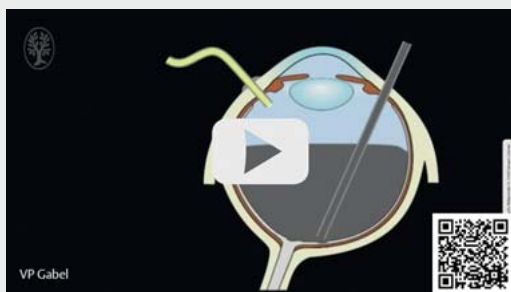
▶ Video 8 Zusatzmaterial H.

▶ VIDEO



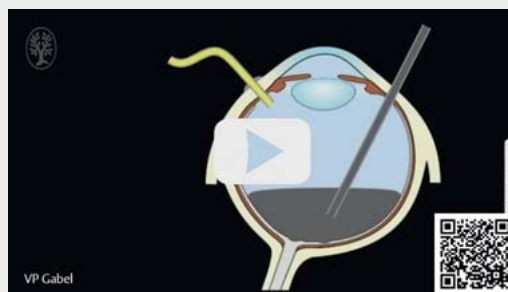
▶ Video 11 Zusatzmaterial K.

▶ VIDEO



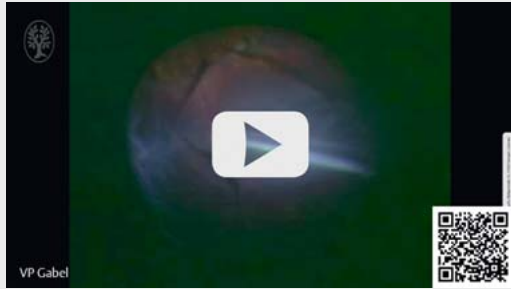
▶ Video 9 Zusatzmaterial I.

▶ VIDEO



▶ Video 12 Zusatzmaterial L.

▶ VIDEO



▶ Video 13 Zusatzmaterial M.