



Low-Flow-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesien

Klinische Techniken zur Nutzung von Rückatemsystemen

Christian Hönemann
Bert Mierke

WICHTIGE HINWEISE

Das medizinische Fachwissen ist aufgrund von Forschung und klinischen Erfahrungen ständiger Veränderung unterworfen. Die Autoren dieser Broschüre waren mit größter Sorgfalt darauf bedacht, dass alle hier dargestellten Informationen, besonders solche, die sich auf Anwendungen und Wirkungen beziehen, zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dem aktuellen Wissensstand entsprechen. Dies befreit den Leser jedoch nicht von seiner Verpflichtung, Entscheidungen über klinische Maßnahmen gemäß seines eigenen medizinischen Wissens und Urteilsvermögens zu treffen. Die Verwendung eingetragener Namen, Marken, etc. in dieser Veröffentlichung bedeutet nicht, dass solche Namen von den geltenden Schutzgesetzen und Richtlinien ausgenommen sind, auch nicht, wenn diesbezüglich keine konkrete Aussage gemacht wird. Alle Rechte an dieser Broschüre liegen bei der Drägerwerk AG & Co. KGaA, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die vorherige schriftliche Genehmigung der Drägerwerk AG & Co. KGaA mechanisch, elektronisch oder fotografisch reproduziert oder gespeichert werden.

Fabius®, Primus®, Zeus® und Perseus® sind eingetragene Warenzeichen von Dräger.

AUTOREN



**Priv. Doz. Dr. med.
Christian Hönemann**

Stellvertretender Ärztlicher Direktor
Chefarzt im Kollegialsystem der Abteilung für
Anästhesie und operative Intensivstation
St. Marienhospital Vechta gemeinnützige GmbH
Marienstraße 6–8, 49377 Vechta



**Dr. med.
Bert Mierke**

Ärztlicher Direktor
Chefarzt der Klinik für Anästhesie und
Intensivmedizin
Krankenhaus St. Elisabeth gemeinnützige GmbH
Lindenstraße 3–7, 49401 Damme

Low-Flow-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesien

Klinische Techniken zur Nutzung
von Rückatemsystemen

DANKSAGUNG: SEINER ZEIT VORAUS

Professor Jan A. Baum († 13. September 2009) war seiner Zeit sicher mehr als zwei Jahrzehnte voraus. Lange bevor über eine Anästhesieführung mit reinem Sauerstoff als Trägergas, geschweige denn bevor über hoch dosierte Sauerstoffkonzentrationen zur Vermeidung von intraoperativen Infektionen gesprochen wurde, erfasste Professor Baum die Rolle von Sauerstoff als Trägergas. Im gemeinsam mit den Kollegen Professor van Aken und Professor Bohrmann erstellten Artikel legte er schon in den Jahren 2001 bis 2004 Standards fest.

Zu Recht darf Professor Baum als einer der Vorreiter der Low- und Minimal-Flow-Anästhesie bezeichnet werden. Zudem beschrieb er die Metabolic-Flow-gestützte Anästhesie mit reinem Sauerstoff als Trägergas. Damit hat er die Minimal-Flow-Anästhesie vereinfacht und perfektioniert.

In Anbetracht der Fülle des Werkes, fiel es uns schwer, alle Publikationen von Professor Baum zu berücksichtigen. Die Erstellung des nun vorliegenden Buches wäre aber nie möglich gewesen, hätte Professor Jan A. Baum nicht diese hervorragenden Vorarbeiten geleistet. Wir möchten ihm daher die vorliegende Arbeit widmen.

Darüber hinaus möchten wir uns sehr herzlich bei Professor Jan A. Baum für die exzellente Anleitung und Ausbildung während unserer Tätigkeit in Damme bedanken.

Wir bedanken uns ebenfalls sehr herzlich bei Sven Olaf Maack, Drägerwerk AG & Co. KGaA, für die hervorragende Zusammenarbeit bei der Erstellung dieses Buches.

Priv. Doz. Dr. med. Christian Hönemann

Dr. med. Bert Mierke

INHALT

01 Einführung/Begriffserklärung	1.1 Niedrigflusnarkosen	07
	1.2 Rückatemsysteme	11
	1.3 Differenzierung der Anästhesiesysteme	13
02 Vorteile von Niedrigflusnarkosen	2.1 Klinische Vorteile – Anfeuchtung, Wärme, Lungenfunktion	20
	2.2 Ökologische Vorteile	24
	2.3 Kosteneinsparungen – Ökonomische Vorteile	24
	2.4 Geringere Belastung durch volatile Anästhetika	27
03 Voraussetzungen für Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien	3.1 Sauerstoffverbrauch	30
	3.2 Anästhesiegas-Uptake	31
	3.3 Lachgas-Uptake	36
	3.4 Steuerung über den MAC-Wert	37
	3.5 Auswirkungen eines verminderten Frischgasflows	44
	3.6 Monitoring	48
04 Durchführung einer Minimal-Flow-Anästhesie	4.1 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas	52
	4.1.1 Tipps und Tricks	54
	4.1.2 Diskussion des Einsatzes eines Sauerstoff-Luft-Gemisches	55
	4.2 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff als Trägergas	58
	4.2.1 Tipps und Tricks	60
	4.2.2 Diskussion des Einsatzes von reinem Sauerstoff	62
	4.3 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Lachgas-Gemisch als Trägergas	68
	4.3.1 Tipps und Tricks	70
	4.3.2 Diskussion	72

05 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät	5.1 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät	78
	5.2 Maximale Verdampferleistung je nach Anästhesiegas	79
	5.3 Kreissystemvolumen und Zeitkonstante	83
06 Kontraindikationen von Niedrigflusnarkosen	6.1 Kontraindikationen von Niedrigflusnarkosen	86
07 Etablierung und Ausblicke	7.1 Etablierung von Niedrigflusnarkosen	90
	7.2 Zukunftsperspektive Niedrigflusnarkose?	91
08 Literatur/Referenzen	8.1 Literaturverzeichnis	94
	8.2 Abbildungsverzeichnis	98
	8.3 Stichwortverzeichnis	101
	8.4 Farblgende	103

01 Einführung/Begriffserklärung

Bei den verschiedenen Varianten der Low- und Minimal-Flow-Anästhesie handelt es sich um adäquate klinische Techniken zur Nutzung von Rückatemsystemen. Erst bei der Durchführung von Niedrigflussnarkosen werden Rückatemsysteme so genutzt, dass sich ihre Vorteile realisieren lassen. Daher sollte im klinischen Alltag bei einer Inhalationsanästhesie unter Verwendung eines Rückatemsystems der Frischgasflow immer weitestgehend vermindert werden. Nur so lassen sich die Emission von überschüssigen Anästhesiegasen auf ein Minimum reduzieren und die Vorteile einer besseren Atemgasklimatisierung erreichen.

1.1 Niedrigflussnarkosen

Low- und Minimal-Flow-Anästhesien sind gekennzeichnet durch die Höhe des Frischgasflows (l/min) in das Atemgassystem des Gerätes. Entscheidend ist, dass der Frischgasflow deutlich kleiner als das Atemminutenvolumen des Patienten ist. Bei Einstellung niedriger Frischgasflows werden die Anästhesiegase in der Ausatemluft des Patienten über geschlossene oder halbgeschlossene Rückatemsysteme dem Patienten wieder zugeführt nachdem CO₂ chemisch gebunden wurde. Daher erklärt sich der Name Rückatemsystem. Infolge dieser Prozessführung erhöht sich konsekutiv das Rückatmungsvolumen bei Reduktion des Frischgasflows und das Überschussgasvolumen nimmt kontinuierlich ab.

In der anästhesiologischen Propädeutik werden folgende Verfahren in der Low- und Minimal-Flow-Anästhesie unterschieden:

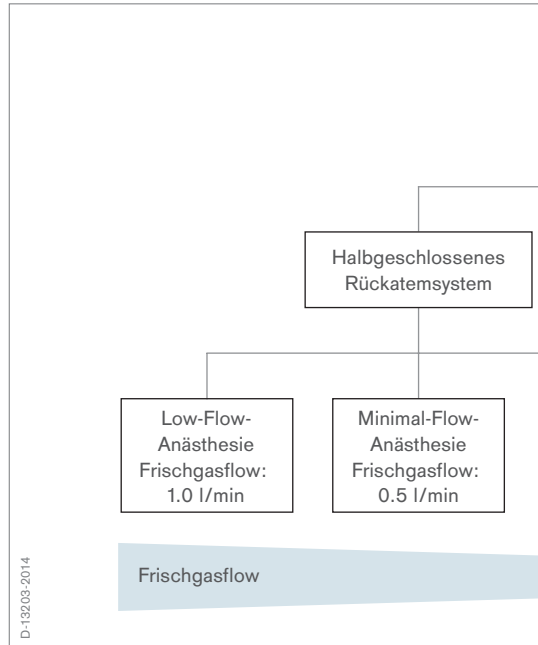
- 1) Bei der Low-Flow-Anästhesie, dem Niedrigflussnarkoseverfahren, wird der Frischgasflow auf 1.0 l/min reduziert. Dieses Verfahren wurde erstmalig von Foldes et al. 1952 beschrieben^{1,2}.
- 2) Bei der von Virtue 1974 erstmals beschriebenen Minimal-Flow-Anästhesie wird der Frischgasflow auf 0.5 l/min reduziert³.

Die Frischgaszufuhr kann bei völlig leckagefreiem System stufenlos reduziert werden. Dies kann bis zu dem Gasvolumen geschehen, das der jeweilige Patient gerade unter der Anästhesie aufnimmt und verstoffwechselt.

Es wird zwischen der nicht-quantitativen und der quantitativen Anästhesie im geschlossenen System unterschieden.

Bei der nicht-quantitativen Anästhesie hält der Anästhesist das Volumen im Kreissystem durch Adjustierung des Frischgasflows konstant, sodass die Füllung des Atemsystems und das Beatmungsmuster unverändert bleiben.

Im Gegensatz dazu hält das Anästhesiegerät nach den Vorgaben des Anästhesisten bei der quantitativen Anästhesie mit geschlossenem System nicht nur Gasfüllung, Beatmungsmuster und Binnendrucke konstant, sondern auch die Frischgaszusammensetzung im Sinne der Trägergase und der volatilen Anästhetika (ggf. mit Lachgas). Die Summe der zugeführten Gase entspricht also zu jedem Zeitpunkt der tatsächlichen



Gasaufnahme des Patienten^{4,5}. Mit dem Narkosegerät Zeus Infinity® Empowered (IE) der Firma Dräger kann eine solche quantitative Anästhesie durchgeführt werden.

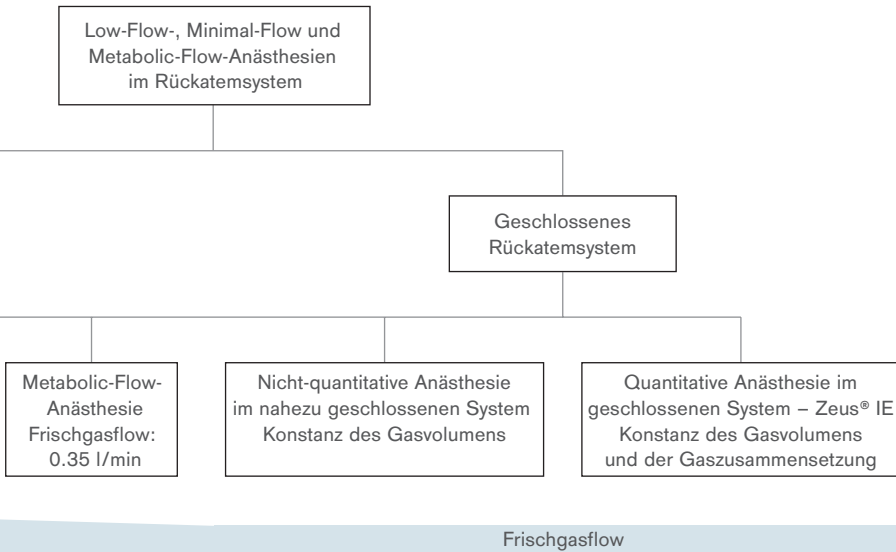


Abb. 1: Überblick über Low-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesien im Rückatemsystem (modifiziert nach: Baum JA⁶)

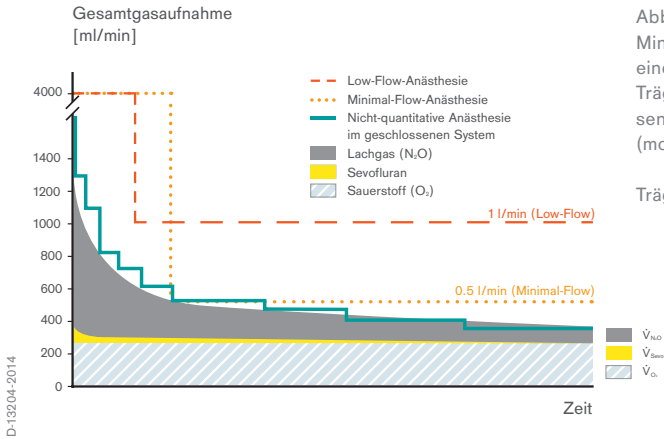


Abb. 2: Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesie mit einem O₂/N₂O-Gemisch als Trägergas im halbgeschlossenen Atemsystem Primus (modifiziert nach: Baum JA⁶)

Trärgase: O₂/N₂O

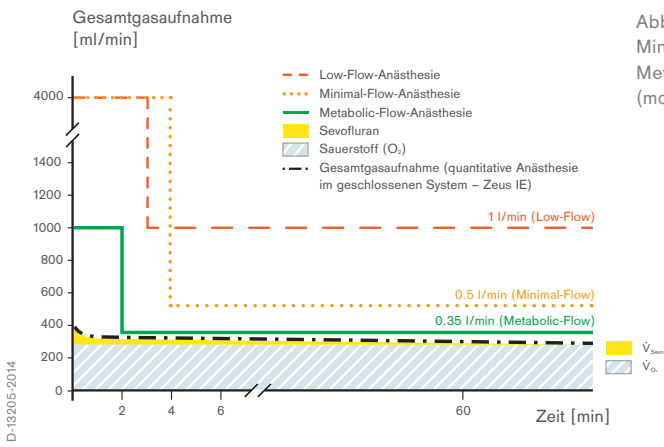


Abb. 3: Low-Flow-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesie (modifiziert nach: Baum JA⁶)

1.2 Rückatemsysteme

Grundvoraussetzung zur Durchführung einer Anästhesie mit niedrigem Frischgasflow ist, wie bereits erwähnt, die Verwendung eines Rückatemsystems. Dabei werden die in der Ausatemluft des Patienten enthaltenen unverbrauchten Gase und Narkosemittel im Inspirationsgas wiederverwendet.

Aktuell eingesetzte Rückatemsysteme entsprechen den klassischen Kreissystemen (z. B. jenen der Produktfamilien Dräger Fabius®, Primus®/Primus® Infinity® Empowerment (IE), Zeus®/Zeus® Infinity® Empowerment (IE) und Perseus® A500). Charakteristisch für diese Systeme ist ein Kohlendioxidabsorber. Dieser entfernt ausgeatmetes Kohlendioxid chemisch aus dem Atemkreissystem und bindet es. Bei dieser Elimination entstehen unter anderem Wärme (ΔT) und Feuchtigkeit (H_2O). Diese tragen zur Klimatisierung des Atemgases im Kreissystem bei. Zur Absorption des CO_2 wird Atemkalk genutzt, der heutzutage hauptsächlich aus Kalziumhydroxid ($Ca(OH)_2$) besteht.

Die Absorption verläuft als exotherme Reaktion, wobei als Endprodukte Kalziumkarbonat, Wasser und Wärme entstehen:



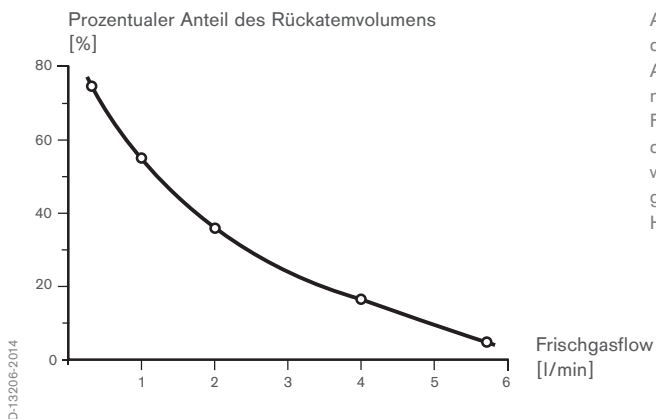


Abb. 4: Prozentualer Anteil der Ausatemluft, der in Abhängigkeit vom Flow nach Zumischung des Frischgases und Abstrom des Überschussgases wieder zum Patienten gelangt (modifiziert nach Hönemann C⁷)

Der kontinuierliche Gasverlust aus dem System, der auf dem Verbrauch von Sauerstoff und der Anreicherung der Anästhesiegase in den Geweben beruht (zuzüglich möglicher Systemleckagen), wird durch Einleitung von Frischgas in das Atemsystem ausgeglichen.

Zur Atemgasklimatisierung soll der Absorber in den Inspirationsschenkel des Atemsystems eingefügt sein, damit der zurückgeatmete Anteil der Ausatemluft über ihn geleitet wird. Da während der chemischen Reaktion Wärme und Wasser freigesetzt werden, trägt der Absorber zur Klimatisierung der inspiratorischen Atemgase bei⁸.

1.3 Differenzierung der Anästhesiesysteme

Zur Differenzierung der Atemsysteme nach technisch-konstruktiven Kriterien werden die Begriffe ›offen‹, ›halboffen‹, ›halbgeschlossen‹ und ›geschlossen‹ verwendet. Allerdings reichen diese Bezeichnungen nicht mehr aus, um Narkosesysteme wirklich zu klassifizieren. Dazu erscheint die Unterteilung in Systeme ohne und Systeme mit Rückatmung besser⁹. Rückatmensysteme können in Abhängigkeit vom Frischgasflow sowohl halboffen, halbgeschlossen oder geschlossen genutzt werden. Der Rückatemungsanteil wird durch die Größe des Frischgasflows bestimmt.

Je niedriger der Frischgasflow ist, desto höher ist der Rückatemanteil und desto kleiner ist der Überschussanteil.

HALBOFFENES SYSTEM

Bei partieller Rückatmung wird ein Rückatmensystem halboffen genutzt. Der Frischgasflow muss circa das Zwei- bis Dreifache des Atemminutenvolumens betragen, damit das Ausatemungsvolumen vor der nächsten Einatmung aus dem System gespült werden kann. Dies entspricht einem eingestellten Frischgasflow von > 6 l/min.

HALBGESCHLOSSENES SYSTEM

Bei halbgeschlossenem System wird die Expirationsluft anteilig vom Patienten zurückgeatmet, das nicht rückgeführte Gasgemisch wird als Überschussgas aus dem System abgeleitet. Der größere Teil wird dem Patienten wieder zugeführt. Dadurch entsteht funktionell ein Kreissystem.

Das in das Narkosesystem eingespeiste Frischgasvolumen ist somit größer als die vom Patienten aufgenommene Gasmenge (Uptake) und gleichzeitig

kleiner als das Atemminutenvolumen. Das rezirkulierende Gasvolumen verhält sich umgekehrt proportional, das Überschussgasvolumen direkt proportional zum Frischgasflow.

Mit zunehmendem Rückatemanteil nimmt der Unterschied zwischen der Zusammensetzung des volatilen Anästhetikums und der des Frischgases zu.

In halbgeschlossenen Anesthesiesystemen liegt der Frischgasflow zwischen 0,5 bis 6 l/min.

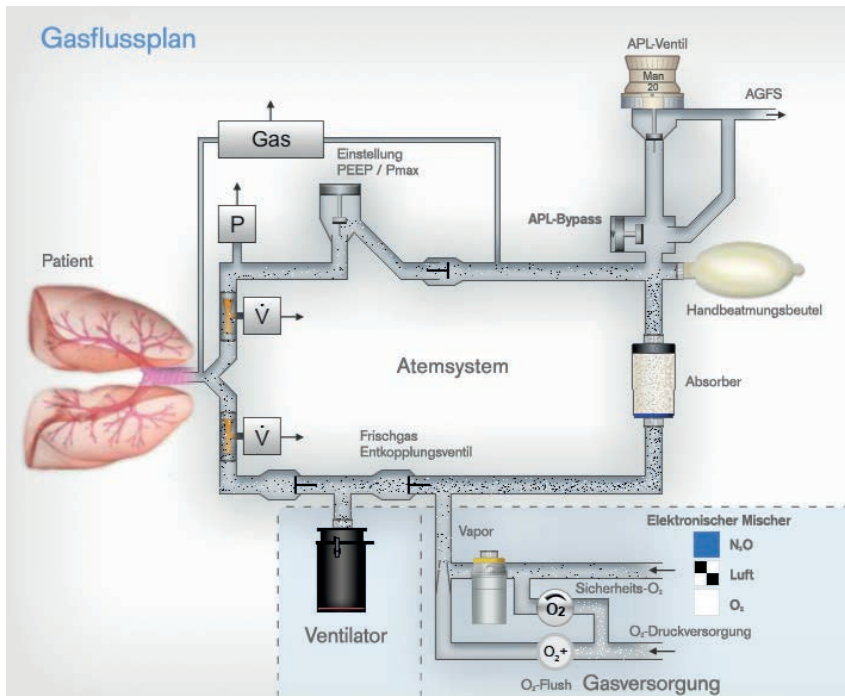


Abb. 5: Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Primus/Primus IE

NICHT-QUANTITATIVE ANÄSTHESIE IM NAHEZU GESCHLOSSENEN SYSTEM

Das geschlossene Narkosesystem führt dem Patienten das gesamte ausgeatmete Gasgemisch, nach der Kohlendioxidelimination im zwischen-geschalteten Absorber, wieder zu. So kann der Frischgaszufluss im Kreis-system soweit minimiert werden, dass nur noch verstoffwechselte oder diffundierte Gasmengen ersetzt werden müssen. Es strömt kein Über-schussgas mehr aus dem System ab. Dies entspricht der geschlossenen Nutzung eines Rückatemsystems (nicht-quantitative Anästhesie). Eine nicht-quantitative Anästhesie mit geschlossenem System lässt sich mit den meisten Anästhesiegeräten durchführen.

Es genügen folgenden Anforderungen: Die Atemsysteme müssen hinrei-chend dicht sein (keine Leckagen). Die Anästhesiegeräte müssen die Einstellung auch niedrigster Frischgasflows erlauben. Die Anästhesiegas-dosierung muss auch im Niedrigflussbereich hinreichend genau arbeiten und das geräteseitige Monitoring muss eine umfassende Überwachung der Anästhesiegaszusammensetzung gewährleisten (siehe hierzu auch Kapitel 3.6 Monitoring, Seite 48).

Etwaige kurzfristige Imbalancen zwischen dem Frischgasvolumen und dem Verbrauch/der Aufnahme sowie Leckage können durch ein Gasre-servoir, beispielsweise dem Handbeatmungsbeutel ausgeglichen werden. Dies ist in allen Dräger-Geräten mit Rückatemsystem (Produktfamilien Dräger Fabius, Primus/Primus IE, Perseus A500 und Zeus/Zeus IE realisiert.

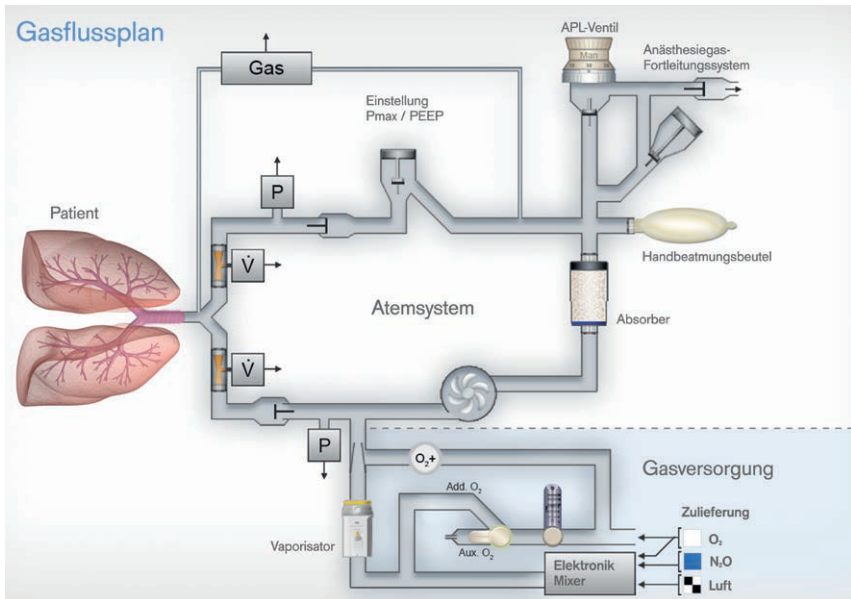


Abb. 6: Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Perseus A500

QUANTITATIVE ANÄSTHESIE IM GESCHLOSSENEN SYSTEM (CLOSED LOOP – AUTO-CONTROL)

Die quantitative Anästhesie mit einem geschlossenen System bedarf der elektronisch gesteuerten Gas- und Anästhetikadosierung mittels einer Closed-loop-Feedback-Regelung.

Dieses Dosierungsprinzip ist bislang nur bei einigen wenigen Anästhesiegeräten üblich. So ist etwa beim Zeus/Zeus IE eine solche Regelung realisiert.

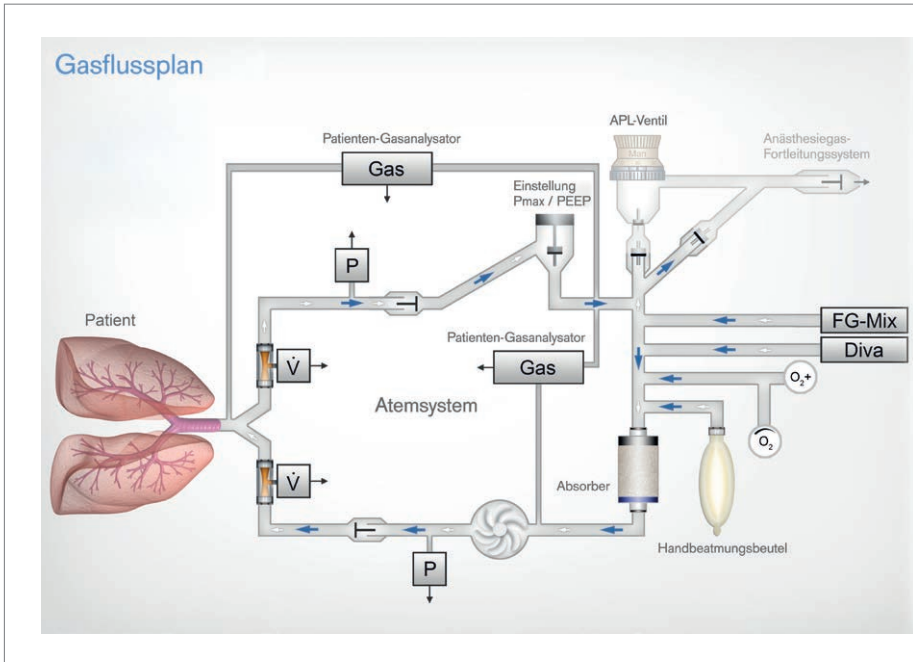


Abb. 7: Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Zeus/Zeus IE

02 Vorteile von Niedrigflussnarkosen

2.1 Klinische Vorteile – Anfeuchtung, Wärme, Lungenfunktion	20
2.2 Ökologische Vorteile	24
2.3 Kosteneinsparungen – Ökonomische Vorteile	24
2.4 Geringere Belastung durch volatile Anästhetika	27

02 Vorteile von Niedrigflussnarkosen

2.1 Klinische Vorteile – Anfeuchtung, Wärme, Lungenfunktion

Die Bedeutung der Atemgasklimatisierung beim anästhesierten Patienten ist bereits seit längerer Zeit bekannt^{10,11,12}. Die Notwendigkeit zur Durchführung der Atemgasklimatisierung ist heute bei intubierten oder tracheotomierten Patienten auf der Intensivstation unstrittig. Das Ausschalten des oberen Respirationstraktes durch eine Larynxmaske oder einen endotrachealen Tubus verhindert seine physiologischen Leistungen (Anfeuchtung und Erwärmung des Atemgases) vollständig. Eine ungenügende Atemgasklimatisierung gefährdet die Funktion des Ziliarepithels und damit die mukoziliäre Clearance. Die Konsequenzen einer ungenügenden Atemgasklimatisierung können morphologische Schäden am Atemwegsepithel und deren Folgen wie Sekretrückstau, Obstruktion der Bronchiolen und Begünstigung von Mikroatelektasen sein.

Daher sollte bei länger andauernden Anästhesien eine absolute Feuchte von 17 bis 30 mg H₂O/l bei einer Anästhesiegastemperatur von mindestens 28 °C gewährleistet sein. Diese Forderungen werden durch eine Anästhesie im Minimal-Flow-Modus erreicht: So stellen sich im klinischen Einsatz bereits nach 15 Minuten die gewünschte absolute Feuchte und nach ein bis zwei Stunden die gewünschte Erwärmung des Atemgases ein (siehe Abbildung 8)^{13,14}.

Daher empfehlen wir bereits bei relativ kurzen Eingriffen von 15 bis 30 Minuten die Reduktion des Frischgasflows in Minimal-Flow- oder Metabolic-Flow-Technik.

Im Rahmen von Tumorbehandlungen setzt die Abteilung für interventionelle Strahlentherapie der Radiologie Vechta HDR-Brachytherapien im Afterloading-Verfahren ein. Die hohen Dosisraten werden in kurzen Behandlungen von circa ein bis zwei Stunden und unter Narkose verabreicht. Bei diesem standardisierten Verfahren wird eine Intubationsnarkose durchgeführt.

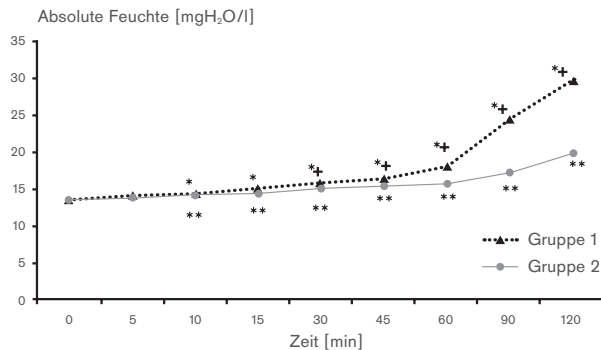


Abb. 8: Vergleich der absoluten Feuchte des inspiratorischen Atemgases

Gruppe 1: Frischgasflow 1 l/min (0.5 l/min O₂ + 0.5 l/min N₂O) + Desfluran;
 Gruppe 2: Frischgasflow 3 l/min (1.5 l/min O₂ + 1.5 l/min N₂O) + Desfluran (modifiziert nach Bilgi M et al.¹⁵)

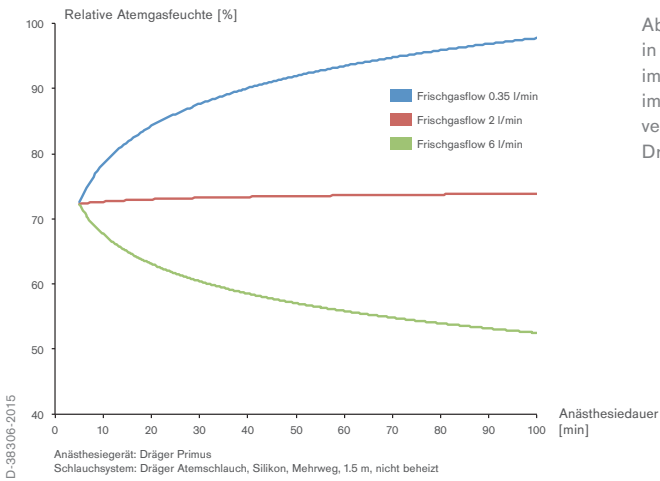
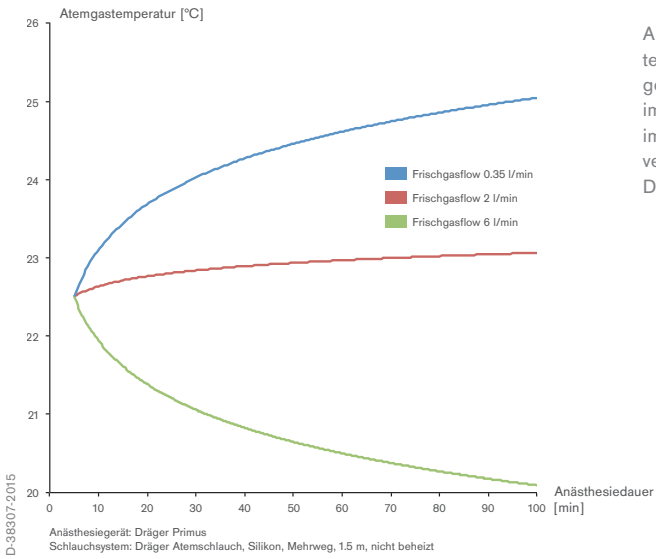
- *p < 0.05 Werte zum Zeitpunkt 10, 15, 30, 40, 60, 90, 120 Minuten nach Trachealintubation im Vergleich zum Zeitpunkt 0 in Gruppe 1
 **p < 0.05 Werte zum Zeitpunkt 10, 15, 30, 40, 60, 90, 120 Minuten nach Trachealintubation im Vergleich zum Zeitpunkt 0 in Gruppe 2
 +p < 0.05 Werte für den Vergleich zwischen beiden Gruppen

D-13208-2014

Die intravenöse Narkoseeinleitung erfolgt mit Propofol (2 mg/kg), Sufentanil (0,15 bis 0,25 µg/kg) und Rocuroniumchlorid (0,4 bis 0,6 mg/kg). Anschließend wird die Narkose als Inhalationsnarkose weitergeführt.

Hierfür wurden drei Gruppen mit unterschiedlichen Frischgasflows miteinander verglichen. Dazu wurden 2 bzw. 6 l/min Frischgasflow verwendet und im Narkoseverlauf beibehalten. In einer weiteren Gruppe wurde das Inhalationsanästhetikum mit einem Frischgasflow von 1 l/min eingespült. Nach Erreichen von 0,9 MAC wurde der Frischgasflow auf 0,35 l/min reduziert.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Messparameter (Temperatur im Atemgas, relative und absolute Atemgasfeuchte). Sie wurden am Y-Stück im Inspirationsschenkel des Anästhesiegerätes gemessen.



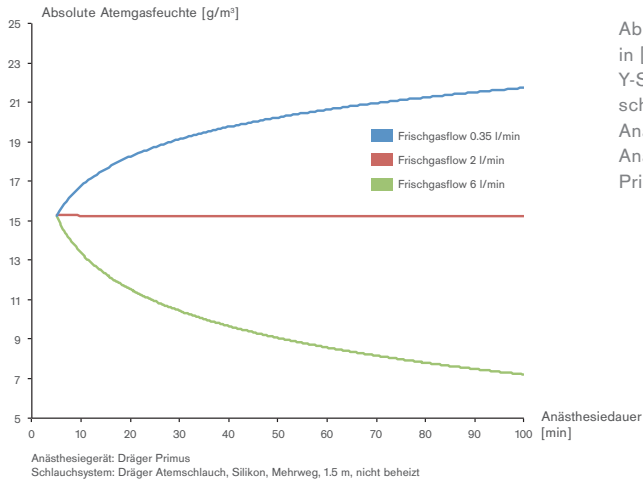


Abb. 11: Absolute Feuchte in [g/m^3] gemessen am Y-Stück im Inspirationschenkel im zeitlichen Anästhesieverlauf am Anästhesiegerät Dräger Primus

Auch wirken sich niedrige Frischgasflows positiv auf die Körpertemperatur aus (siehe Abbildung 12).

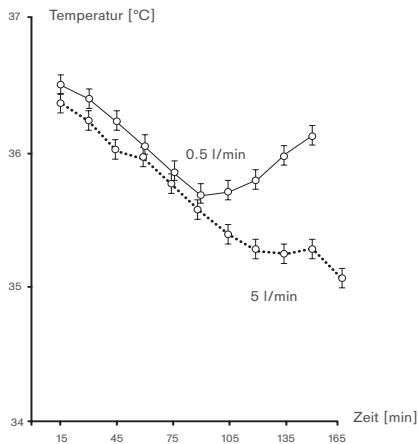


Abb. 12: Durchschnittliche ösophageale Körpertemperatur bei unterschiedlichen Frischgasflows (0.5 vs. 5 l/min) (modifiziert nach Aldrete A et al.¹⁶)

2.2 Ökologische Vorteile

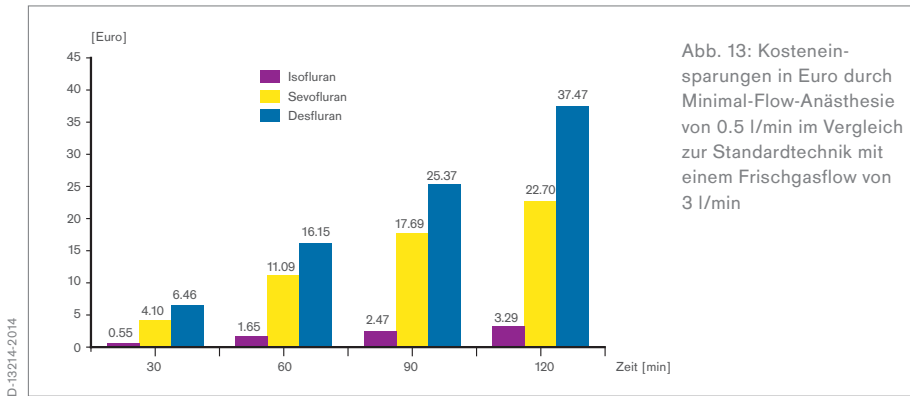
Charakteristisch für High-Flow-Anästhesien ist es, dass große Mengen volatiler Anästhetika emittiert werden. Dies stellt nicht nur eine Umweltbelastung dar, zudem wird das knappe Budget dadurch belastet. Das wachsende Umweltbewusstsein, zunehmend strenge Arbeitsschutzvorschriften und nicht zuletzt Kostenaspekte erfordern heute ein Umdenken im klinischen Vorgehen bei Anästhesien. Die Emission von Anästhesiegasen sollte daher auf das unvermeidliche Minimum reduziert und unverbrauchte Anästhetika wiederverwendet werden. Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien entsprechen diesen Forderungen.

Trotz dieser offensichtlichen Vorteile gibt es in Kliniken immer noch Vorbehalte diese Verfahren häufiger einzusetzen. Um andere Techniken einzusetzen, muss ein Umdenken initiiert und gewohnte Verfahrensweisen müssen in dem Zuge geändert werden. Das Engagement in diese Richtung lohnt sich jedoch durch ökologische und ökonomische Vorteile.

2.3 Kosteneinsparungen – Ökonomische Vorteile

Durch den Einsatz von Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien kommt es zu einem geringeren Bedarf vor allem an treibhauswirksamen Anästhetika sowie an Lachgas und Sauerstoff. Der ökologische Vorteil geht mit merklichen Kosteneinsparungen einher. Nicht nur mehr als 20 Jahre alte Daten belegen eine Kostenreduktion von 55 bis 75 % bei einer Reduzierung des Frischgasflows von 4 auf 1 l/min. Auch neuere Daten zeigen ein ähnliches Einsparpotential von circa 60 %. Dabei wurde von der konsequenten Anwendung einer quantitativen Anästhesie mit geschlossenem System im Vergleich zur Standardtechnik mit einem Frischgasflow von 3 l/min ausgegangen^{17,18,19}. Zwar führt eine konsequente Durchführung der Minimal-Flow-Technik dazu,

dass sich der Atemkalkverbrauch nahezu verdreifacht. Diese Kosten sind jedoch in der Kosten-Nutzen-Analyse vernachlässigbar gering.

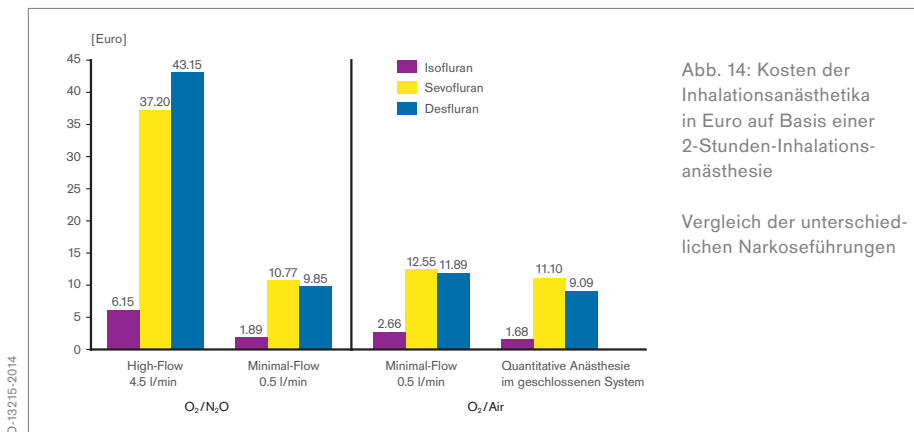


Hinweis: Die in Abb. 13/14 gezeigten Einsparungen wurden berechnet auf der Basis der zugrundeliegenden Preise für die folgenden Anästhesiegase inkl. Lieferung, Mehrwertsteuer etc. (Durchschnittswerte, Stand 10/2013):

Isofluran 250 ml (Forene, Fa. Abbvie) 32,73 €

Sevofluran 250 ml (Sevorane/Sevofluran, Fa. Abbvie/Baxter) 131,92 €

Desfluran 250 ml (Suprane, Fa. Baxter) 81,16 €



Außerdem gibt es immer wieder kritische Anmerkungen, dass bei korrekter Berechnung der Kosten für eine Inhalationsanästhesie auch die Kosten für additiv gegebene intravenöse Medikamente, Investitionskosten, Abschreibungskosten und Inspektions- bzw. Reparaturkosten berücksichtigt werden müssen. Diese entstehen jedoch auch bei der Durchführung in Standardtechnik bzw. in Technik mit hohem Frischgasflow. Somit ist aus unserer Sicht eindeutig zu fordern, dass im täglichen Gebrauch die konsequente Durchführung der Anästhesie mit niedrigem Frischgasflow angewendet werden sollte. Für diese Argumentation spricht, dass der technische Stand der Anästhesiegeräte einen niedrigen Frischgasflow zulässt und dass die Geräte sogar zum Teil für Low-Flow-Anästhesietechniken konzipiert sind.

Zusammenfassend nimmt die Effektivität der verwendeten Anästhesiegase mit der Verminderung des Frischgasflows zu. Erst bei der quantitativen Anästhesie mit geschlossenem System kann der Quotient für Sauerstoff (ggf. Lachgas) und die volatilen Anästhetika vorübergehend den maximalen Wert von 1 annehmen.

Die Effektivität entspricht dann dem Quotienten aus Uptake und der zeitgleich ins Atemsystem eingespeisten Frischgasmenge und Anästhesiegase.

$$\text{Effektivität} = \frac{\text{VU l/min}}{\text{FGF l/min}}$$

VU = Patienten-Uptake

FGF = Frischgasflow

2.4 Geringere Belastung durch volatile Anästhetika

Die modernen Inhalationsanästhetika gehören zu den teilsubstituierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) bzw. Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). Sie haben in der Atmosphäre eine lange Lebensdauer. Damit verfügen sie über 5 bis 13 % der ozonschädigenden Potenz der industriell genutzten vollsubstituierten FCKW. Die Jahresproduktion volatiler Anästhetika beträgt etwa 1 % der Jahresproduktion vollsubstituierter FCKW. Es ist jedoch unbestritten, dass die Forderung nach weitestgehender Verminderung unnützer Emission von Anästhesiegasen zur adäquaten Nutzung von Rückatemsystemen führen muss.

Die Reduktion von Anästhesiegasen um bis zu 90 % führt zu einem weiteren positiven Effekt: Die Belastung am Anästhesie-Arbeitsplatz für das Personal sinkt merklich²⁰.

Bei fehlender zentraler Gasabsaugung konnte allein durch die konsequente Nutzung von Rückatemsystemen mit einer Reduktion des Frischgasflows für N₂O auf 0,5 l/min (Low-Flow) oder sogar 0,2 l/min (Minimal-Flow) die Arbeitsplatzbelastung mit Lachgas auf 29 bzw. 15 ppm für eine zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration gesenkt werden, wie Virtue et al. zeigen konnten²¹. Diese Werte unterschreiten nicht nur den vom Amt für Arbeitsschutz in Hamburg festgesetzten Grenzwert von 50 ppm; sie genügen sogar den noch strengeren Empfehlungen des amerikanischen National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), das eine Grenzkonzentration von 25 ppm angibt. Die Verminderung der Arbeitsplatzbelastung durch Reduktion des Anästhesiegasverbrauches kommt unmittelbar in allen Arbeitsbereichen zum Tragen.

03 Voraussetzungen für Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien

3.1 Sauerstoffverbrauch	30
3.2 Anästhesiegas-Uptake	31
3.3 Lachgas-Uptake	36
3.4 Steuerung über den MAC-Wert	37
3.5 Auswirkungen eines verminderten Frischgasflows	44
3.6 Monitoring	48

03 Voraussetzungen für Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien

3.1 Sauerstoffverbrauch

Die Anwendung von Low-Flow-Techniken erlaubt neben der Aufrechterhaltung eines besser an physiologische Gegebenheiten orientierten Atemwegsklimas auch die Überwachung oder zumindest Abschätzung des wichtigen Parameters Sauerstoffverbrauch.

Der Sauerstoffverbrauch des Patienten während einer Narkose entspricht seinem jeweiligen metabolischen Verbrauch und kann als annähernd konstant angenommen werden.

Bereits 1945 führte Samuel Brody umfangreiche Studien zum Energie- und Sauerstoffverbrauch sowohl an Tieren als auch beim Menschen durch. Daraus entwickelte er seine bis heute gebräuchliche Formel²²:

$$VO_2 = 10 \times KG[kg]^{3/4}$$

VO_2 = Sauerstoff-Uptake

$KG[kg]$ = Körpergewicht in Kilogramm

In den folgenden Jahren wurde sie von verschiedenen Autoren weiterentwickelt und auf Körperoberfläche, Körperkompartimente und Alter bezogen. Allerdings ist bekannt, dass beim anästhesierten Patienten der Sauerstoffverbrauch insbesondere in höheren Gewichtsklassen um 10 bis 20 % überschätzt wird. Trotzdem beziehen auch wir uns weiterhin auf die Brody-Formel, indem wir die tendenzielle Überschätzung des Sauerstoffverbrauches als Sicherheitsmarge in die Berechnungen einbeziehen.

Als Faustformel gilt: Der Sauerstoffverbrauch in ml/min entspricht ungefähr:

$$VO_2 = 3.5 \times KG \text{ [ml/min]}$$

VO_2 = Sauerstoff-Uptake in ml/min
 KG = Körpergewicht in Kilogramm

Dies bedeutet beispielsweise für einen 100 Kilogramm schweren Patienten, dass mit einer Sauerstoffaufnahme von 350 ml/min gerechnet werden muss.

3.2 Anästhesiegas-Uptake

Der Anästhesiegas-Uptake basiert auf der Pharmakokinetik und -dynamik des verwendeten volatilen Anästhetikums. Die Aufnahme der Inhalationsanästhetika nimmt – eine konstante Gaszusammensetzung im Anästhesiesystem vorausgesetzt – exponentiell im zeitlichen Ablauf einer Anästhesie ab. Sie verhält sich dabei entsprechend der Formel nach Lowe proportional zur angestrebten Konzentration und Löslichkeit des Anästhetikums und zum Herz-Zeit-Volumen^{23,24}.

$$V_{AN} = f \times MAC \times \bar{\lambda}_{B/G} \times Q \times t^{1/2} \text{ [ml/min]}$$

V_{AN} = Aufnahme Inhalationsanästhetika (Anästhesiegas-Uptake) in ml/min
 $f \times MAC$ = angestrebte expiratorische Narkosemittelkonzentration des Anästhetikums als Funktion f der minimalen alveolären Konzentration (z. B. $0.8 \times MAC$)
 $\bar{\lambda}_{B/G}$ = Blut-Gas-Löslichkeitskoeffizient
 Q = Herzminutenvolumen (dl/min)

Valide erscheinen auch die Vorhersagemodelle basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵. Dadurch kann die Verteilung von Anästhesiegasen im menschlichen Körper berechnet werden.

Heute werden zudem Rechenmodelle zu Vorhersagemodulen für Anästhesiegase benutzt, die rein auf empirischen Daten über Organvolumen, Blutflüsse, physiologische Verteilungsmuster und Löslichkeitskoeffizienten basieren. Diese berechnen die mutmaßlichen Gasverläufe und listen den bisherigen Gasverbrauch auf^{26,27}.

Von großer klinischer Bedeutung ist, dass der größte Anästhesiegas-Uptake in den ersten Minuten, in der sogenannten Anflutungszeit und Anflutungsphase/Einwaschphase stattfindet. In der weiteren Phase der konstanten Anästhesieführung ist der Anästhesiegas-Uptake annähernd konstant, da die Kompartimente des Patienten als gesättigt anzusehen sind. Entscheidend für die eigentliche Wirkung der Anästhesie ist die Zielkonzentration im Effektkompartiment, dem Gehirn. Ebenso wesentlich ist die Wahl des geeigneten Inhalationsanästhetikums, bei dem die jeweilige Pharmakodynamik und die Pharmakokinetik berücksichtigt werden müssen. Nicht alle gängigen Anästhetika eignen sich in gleicher Weise zur Durchführung von Low- und Minimal-Flow-Anästhesien. Dies beruht vor allem auf der unterschiedlichen Löslichkeit und der damit verbundenen anästhetischen Potenz und der physiologischen Aufnahme des Anästhetikums²⁸.

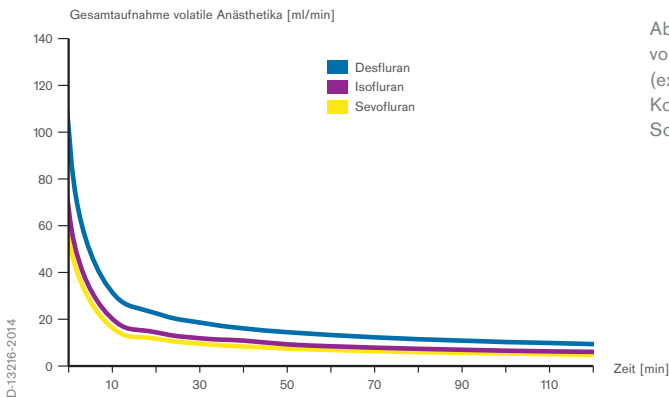


Abb. 15: Gesamtaufnahme volatiler Anästhetika (expiratorische Konzentration – Sollzustand: $0.9 \times \text{MAC}$)

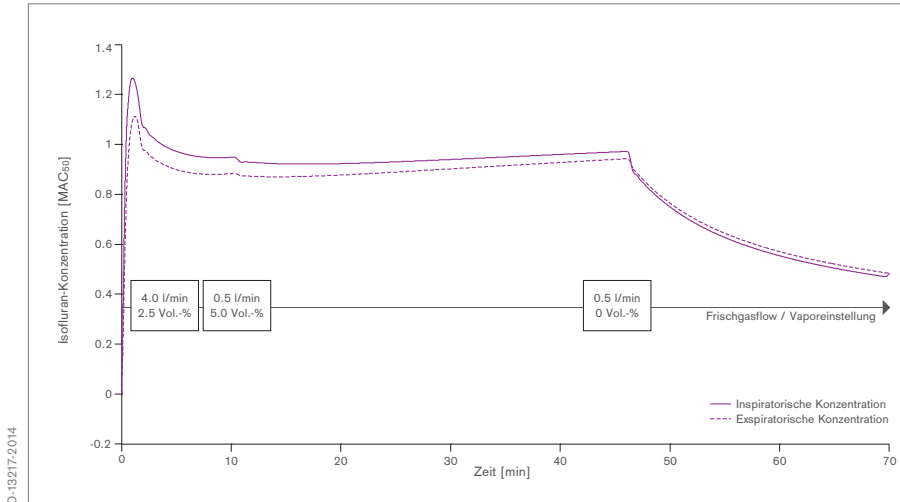


Abb. 16: Inspiratorische und expiratorische Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas.

Start mit 4 l/min Frischgasflow, Vaporeinstellung 2.5 Vol.-%.
Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC, Änderung Frischgasflow auf 0.5 l/min und Änderung Vaporeinstellung auf 5 %.
Nach 45 Minuten Änderung Vaporeinstellung auf 0 Vol.-%.
Keine Änderung Frischgasflow.

Anpassungen der Vaporeinstellungen zur Aufrechterhaltung des Sollwertes entsprechend Erhöhung/Vertiefung der Narkosemittelkonzentrationen unter Ausnutzung der verschiedenen Zeitkonstanten.

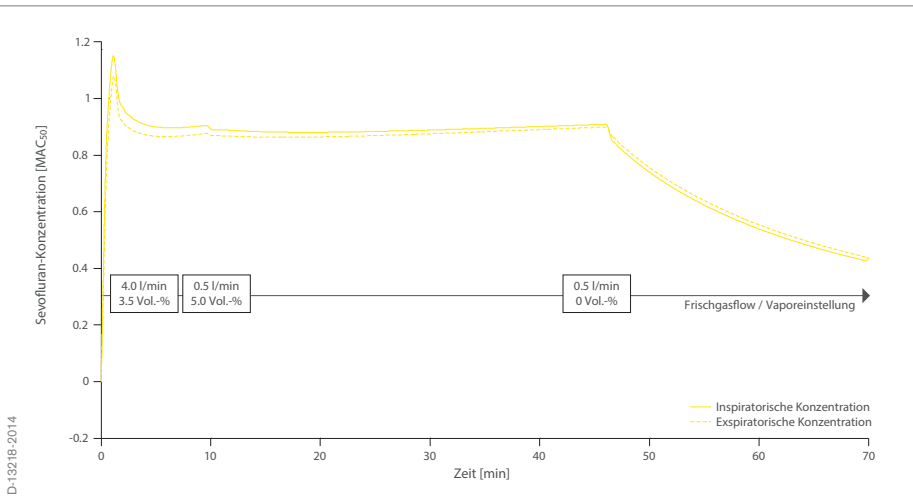


Abb. 17: Inspiratorische und expiratorische Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas.

Start mit 4 l/min Frischgasflow, Vaporeinstellung 3.5 Vol.-%.
Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC, Änderung Frischgasflow auf 0.5 l/min und Änderung Vaporeinstellung auf 5 %.
Nach 45 Minuten Änderung Vaporeinstellung auf 0 Vol.-%.
Keine Änderung Frischgasflow.

Anpassungen der Vaporeinstellungen zur Aufrechterhaltung des Sollwertes entsprechend Erhöhung/Vertiefung der Narkosemittelkonzentrationen unter Ausnutzung der verschiedenen Zeitkonstanten.

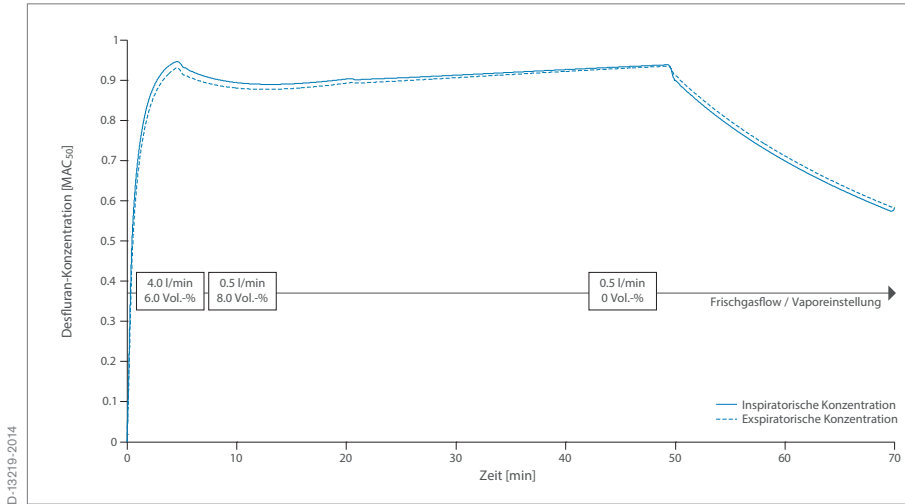


Abb. 18: Inspiratorische und expiratorische Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas.

Start mit 4 l/min Frischgasflow, Vaporeinstellung 6 Vol.-%.
 Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC, Änderung Frischgasflow auf 0.5 l/min und Änderung Vaporeinstellung auf 8 %.
 Nach 45 Minuten Änderung Vaporeinstellung auf 0 Vol.-%.
 Keine Änderung Frischgasflow.

Anpassungen der Vaporeinstellungen zur Aufrechterhaltung des Sollwertes entsprechend Erhöhung/Vertiefung der Narkosemittelkonzentrationen unter Ausnutzung der verschiedenen Zeitkonstanten.

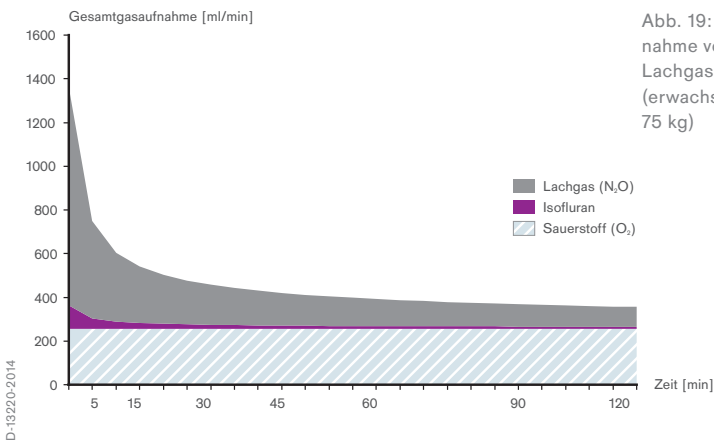
3.3 Lachgas-Uptake

Lachgas wird im Körper nicht metabolisiert. Daher wird die Aufnahme von N_2O nur durch die alveolo-kapilläre Partialdruckdifferenz bestimmt. Zu Beginn einer Anästhesie ist diese Differenz hoch, aber sie nimmt im zeitlichen Ablauf mit zunehmender Sättigung des Gases in den Geweben ab. Die Lachgasaufnahme lässt sich näherungsweise für einen normgewichtigen erwachsenen Patienten mit der angegebenen Exponentialfunktion nach Severinghaus kalkulieren²⁹:

$$V_{N_2O} = 1.000 \times t^{-1/2}$$

V_{N_2O} = Lachgasaufnahme

t = Zeit nach Einleitung der Narkose (min)



3.4 Steuerung über den MAC-Wert

Die volatilen Anästhetika unterscheiden sich deutlich in Pharmakodynamik und Pharmakokinetik. Entscheidend sind der Blut-Gas-Verteilungskoeffizient und die Fettlöslichkeit der Konzentration. Die im Inspirationsgemisch enthaltene Anästhetikakonzentration passiert die Alveolarschranke, löst sich im Blut, verteilt sich in den verschiedenen Körperkompartimenten und erreicht letztendlich als Ziel- oder Effektkompartiment das Gehirn.

Die Tiefe einer Inhalationsanästhesie wird von der Konzentration der Anästhetika im Gehirn bestimmt, die über die Blutkonzentration direkt von dem Alveolarpartialdruck abhängig ist. Somit wird die Anästhesietiefe über eine Veränderung der Inhalationskonzentration des jeweiligen volatilen Anästhetikums im expiratorischem Atemgas etabliert. Zwischen der Wirkstärke des Anästhetikums und der Fettlöslichkeit besteht ein linearer Zusammenhang: Je größer die Fettlöslichkeit, desto potenter das Inhalationsanästhetikum und desto kleiner die benötigte alveoläre Konzentration, um eine definierte Anästhesietiefe zu erreichen.

Der MAC-Wert ist die minimale alveoläre Konzentration eines volatilen Anästhetikums, bei dem 50 % der Patienten auf eine Hautinzision nicht mehr mit Abwehrreaktionen reagieren. Je niedriger der MAC-Wert eines Anästhetikums, desto größer ist seine Wirkstärke.

Der MAC-Wert unterscheidet sich je nach verwendetem Trägergas^{30,31}. Anders definiert ist der MAC₅₀ Awake. Dies ist der Wert, bei dem die Hälfte der Patienten nach einer Narkose die Augen öffnet.

Wenn also im täglichen Gebrauch von dem MAC-Wert gesprochen wird, ist der MAC₅₀ gemeint, der als approximatives Maß für die Wirkstärke der Inhalationsanästhetika bezogen auf das jeweils verwendete Trägergas steht.

Tabelle 1: MAC-, MAC Aware- und MAC Awake-Werte verschiedener volatiler Anästhetika (modifiziert nach Heller AR et al. ³⁰⁾)

Anästhetische Potenz	MAC	MAC AWARE	MAC AWAKE
	(Vol.-% in O ₂)	(70 % von MAC) (Vol.-% in O ₂)	(35 % von MAC) (Vol.-% in O ₂)
Isofluran	1.15	0.78	0.42
Sevofluran	2.05	1.43	0.71
Desfluran	5 – 6	4.2	2.1

MAC-Werte volatiler Anästhetika bei 40-jährigen Patienten

EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN MAC-WERT

Eine große Anzahl von Studien hat gezeigt, dass weder Größe und Gewicht eines Patienten noch Anästhesiedauer Einfluss auf den jeweiligen MAC-Wert haben. Hingegen reduzieren zentralnervös wirksame Medikamente und Drogen den MAC-Wert. Dies ist in der täglichen Anwendung der Kombinationsanästhesie ausdrücklich gewünscht und konzeptionell gefordert (siehe balancierte Anästhesie, Seite 39). So führen Opiode und Co-Anästhetika wie Sedativa zu einer Reduktion des MAC-Wertes. Beim Prinzip der balancierten Anästhesie werden die einzelnen Anästhesiekomponenten mittels Kombination verschiedener Medikamente beeinflusst. Dies führt im Idealfall dazu, dass man Komponenten (Hypnose, Analgesie, Muskelrelaxierung) getrennt steuern und andererseits die Dosierung der verwendeten Substanzen zugunsten einer niedrigen Nebenwirkungsrate reduzieren kann.

Auch führen Hypothermie und beispielsweise Schwangerschaft zu einer Reduktion des MAC-Wertes. Im Gegensatz hierzu führen Hyperthermie bei Fieber und chronischer Alkoholismus zu einem erhöhten Bedarf an Inhalationsanästhetika und somit zu einem höheren MAC-Wert.

Der Einsatz des Dräger SmartPilot® View kann Minimal-Flow-Techniken sinnvoll unterstützen.

BALANCIERTE ANÄSTHESIE NACH HÖNEMANN C.³³

Eine Allgemeinanästhesie, die durch eine Kombination verschiedener Anästhetika mit synergistischen pharmakologischen Eigenschaften aufrechterhalten wird, wird als balancierte Anästhesie bezeichnet. Monoanästhesien, d. h. Anästhesien unter Verwendung von nur einem Anästhetikum, werden heute praktisch nicht mehr durchgeführt.

Bei einer totalen intravenösen Anästhesie (TIVA) wird ein Hypnotikum (Propofol) mit einem Analgetikum (z. B. Remifentanyl) kombiniert. Bei einem Aufrechterhalten der Narkose im Sinne der Inhalationsanästhesie wird ausschließlich eine Kombinationsanästhesie aus Lachgas, Sauerstoff, Luft und einem Inhalationsanästhetikum durchgeführt.

Heute wird mit dem Begriff der balancierten Anästhesie meistens eine Kombination aus intravenöser Opioidgabe (Analgesie) und Inhalationsanästhesie (Hypnose) verbunden. Der Begriff ist jedoch, wie oben bereits erwähnt, nicht eng definiert und wurde auch schon für andere Kombinationen von Anästhetika wie etwa Regionalanalgesie und Inhalationsanästhesie verwendet.

Die balancierte Anästhesie ist das häufigste weltweit angewendete Anästhesieverfahren. Die Allgemeinanästhesie besteht aus vier unterschiedlichen Grundqualitäten:

- Hypnose,
- Analgesie,
- Muskelrelaxation
- und vegetative Abschirmung.

Bei der balancierten Anästhesie wird dies durch einzelne Medikamente nach den aktuellen Erfordernissen hervorgerufen. Die Anästhesie (als Ziel bzw. Gesamtwirkung) wird somit durch die Kombination unterschiedlicher niedrig dosierter Anästhetika erreicht, anstatt nur ein Medikament in einer

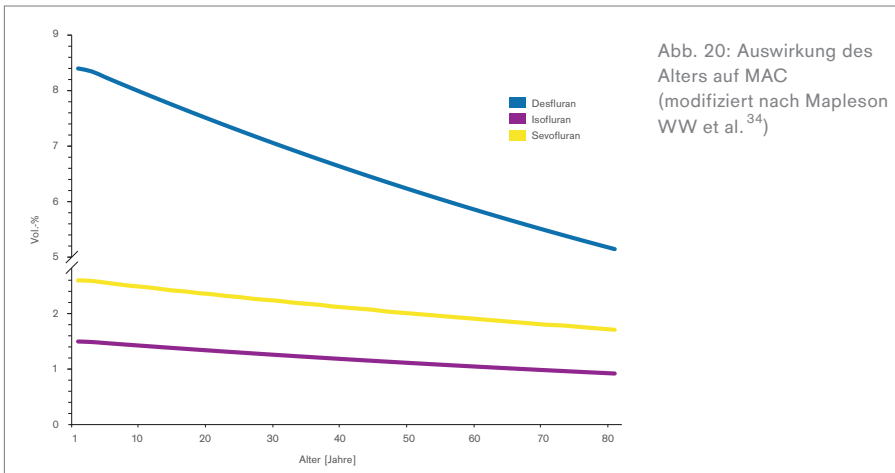
hohen Dosierung einzusetzen. Die Einzelkomponenten balancieren die Anästhesie aus. Durch die Reduktion der Dosierungen der einzelnen Medikamente treten unerwünschte Nebenwirkungen seltener auf und die Anästhesieführung ist insgesamt geringeren Schwankungen unterworfen.

Bei der balancierten Anästhesie im herkömmlichen Sinne werden volatile Anästhetika, Lachgas, Opioide und Muskelrelaxanzien miteinander kombiniert. Das Bewusstsein des Patienten wird mit den volatilen Anästhetika ausgeschaltet. Das Auftreten von intraoperativen Wachheitsphasen wird durch volatile Anästhetika effektiver verhindert, als durch den Einsatz von intravenös verabreichten Hypnotika. Während der Einsatz einer EEG-gestützten Anästhesietiefenmessung zur Vermeidung intraoperativer Awareness aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität bei einer i.v.-Anästhesie notwendig erscheint, wird dies im Rahmen einer balancierten Anästhesie noch immer kontrovers diskutiert, scheint aber nicht erforderlich.

Zusätzlich haben volatile Anästhetika muskelrelaxierende Eigenschaften und verstärken so die Wirkung der adjuvant eingesetzten Muskelrelaxanzien. Lachgas und intravenös verabreichte Opioide reduzieren den Bedarf an volatilen Anästhetika. Der Bedarf wird um den Faktor 10 bis 15 % reduziert. Durch die geringeren Gaskonzentrationen ist die Aufsättigung der bradytrophen Gewebe vermindert. Dies beschleunigt das postoperative Erwachen.

WEITERE EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN MAC-WERT

Der Einfluss des Alters auf die MAC-Werte ist von Nickalls und Mapleson umfassend beschrieben worden. So steigt der MAC-Wert ab der 32. Gestationswoche bis zum ersten Lebensjahr an, um dann konsekutiv bis ins hohe Alter abzufallen³¹.



D-383/04-2015

Die höchsten Inhalationskonzentrationen im Inspirationsgemisch werden im Säuglingsalter benötigt. Sie fallen kontinuierlich bis ins Senium ab. Um eine äquivalente Anästhesietiefe zu erreichen, werden in den verschiedenen Lebensphasen bei der gleichen Substanz unterschiedliche MAC-Werte benötigt. Bei Kombinationen aus einer Allgemeinanästhesie mit einem Regionalanästhesieverfahren lassen sich Inhalationsanästhetika und andere Hypnosemedikationen einsparen, die Anästhesie kann flacher gehalten werden und mit niedrigeren MAC-Werten zu einer adäquaten Reizabschottung führen.

Wenn in heute üblicher Weise verschiedene Medikamentengruppen durch Prämedikation mittels Sedativums, Einleitung und Anästhesieinduktion mit einem i.v. Opiod und gebräuchlichem i.v. Hypnotikum kombiniert werden, die durch eine Aufrechterhaltung der Anästhesie mit einem Inhalationsanästhetikum erfolgt, werden für eine ausreichende Anästhesietiefe MAC-Werte zwischen 0,8 bis 1,2 benötigt. Ein Überschreiten dieser Werte ist weder aus pharmakologischer noch anästhesiologischer Sicht sinnvoll.

Im Gegenteil: Die Überhöhung des MAC-Wertes birgt erhebliche Gefahren und erhöht perioperative Morbidität und Mortalität.

Aktuelle Daten von Eger et al. belegen nachdrücklich eine verlängerte Aufwachezeit und gesteigerte Mental Disorder im Sinne eines postoperativen Durchgangssyndroms für die Inhalationsanästhetika im Senium³². Desgleichen scheinen Daten aus großen Metaanalysen darauf hinzuweisen, dass überhöhte MAC-Werte bei Anästhesien in den ersten vier Lebensjahren mit einer gestörten kognitiven Entwicklung einhergehen könnten.

Es existiert kein rationaler Grund, der eine Erhöhung des MAC-Wertes bei über 1,2 rechtfertigt.

Aus dem vorher Beschriebenen erschließt sich, dass sich die Anästhesietiefe am besten mit den volatilen Anästhetika steuern lässt, welche möglichst geringe Löslichkeiten und damit geringe anästhetische Potenzen aufweisen.

Da der alveoläre Partialdruck die entscheidende Terminante für die Aufnahme des Inhalationsanästhetikums ist, erscheint die Geschwindigkeit, mit der dieser Wert ansteigt, entscheidend für die Narkoseanflutung (Narkoseeinleitung) sowie deren Vertiefung. Er hängt von der inspiratorischen Konzentration, der alveolären Ventilation, der funktionellen Residualkapazität und der Löslichkeit des Inhalationsanästhetikums im Blut ab.

Durch diese Tatsache empfehlen sich besonders inhalative Anästhetika mit einem schlechten Blut-/Gas-Verteilungskoeffizienten, wie ihn Sevofluran (0,65) und Desfluran (0,45) aufweisen.

Umgekehrt gilt, dass Isofluran mit seinem vergleichsweise hohen Blut-/Gas-Verteilungskoeffizienten von 1,4 sich nicht optimal für die Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Narkose eignet, da es hier zu einer längeren An- und Abflutungskinetik kommt.

Durch Erhöhen der Vaporeinstellung und des Frischgasflows kann das rasche Vertiefen der Narkose mit zusätzlicher additiver intravenöser Injektion eines Hypnotikums erzielt werden. Darüber hinaus lässt sich durch Schließen des Vapors das Abflachen der Narkose bei einem zu hohen MAC-Wert von Isofluran erreichen²⁸.

Tabelle 2: Pharmakokinetische und pharmakodynamische Eigenschaften unterschiedlicher volatiler Anästhetika (modifiziert nach Baum JA et al.²⁸)

	Isofluran	Sevofluran	Desfluran
λ Blut/Gas	1.4	0.65	0.42
λ Fett/Gas	64	34	12
λ Fett/Blut	45	48	27
Metabolismus			
Biotransformation (%)	< 1.0	3 – 5	< 0.1
Anästhetische Potenz			
MAC (Vol.-%)	1.2	2.0	6.0
MAC Awake	0.4	0.7	2.0
MAC 3 – 5 Jahre	1.6	2.5	8.6
MAC ca. 30 Jahre	1.2	2.1	7.3
MAC ca. 70 Jahre	1.1	1.5	5.2

3.5 Auswirkungen eines verminderten Frischgasflows

Bei einem hohen Frischgasflow entspricht die Gaszusammensetzung des Frischgases jener des Kreissystems (Frischgasflow > Atemminutenvolumen). Bei einer Anästhesie mit einem hohen Frischgasflow führen Änderungen der Frischgaszusammensetzung zu raschen und gleichsinnigen Veränderungen der inspiratorischen und expiratorischen Anästhetikakonzentration im Anästhesiesystem. Durch eine Reduktion des Frischgasflows ändert sich die Zusammensetzung der Gase im Kreissystem im Vergleich zur Zusammensetzung des Frischgases. Zusätzlich wird bei niedrigem Frischgasflow eine Änderung der Gaszusammensetzung im Kreissystem nur sehr verzögert und träge zu einer Veränderung der in- und expiratorischen Anästhetikakonzentration führen. Demnach ist die Zeitkonstante umgekehrt proportional zum Frischgasflow. Dies gilt für frischgasabhängig dosierende Narkosegeräte, wenn diese als halbgeschlossene Systeme, beispielsweise bei Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien oder als nicht-quantitative Anästhesien im geschlossenen System verwendet werden.

Dieser Effekt kann insbesondere am Ende einer Anästhesie genutzt werden, indem die Anästhesiegaszufuhr durch Schließen des Vapors circa 10 bis 15 Minuten vor Ende der Operation beendet wird. Durch die lange Zeitkonstante bei niedrigem Frischgasflow kommt es nur zu einem geringen Abfall der Anästhesiegaskonzentration im Kreissystem, da ein Auswaschen nur langsam stattfindet. Erst eine Erhöhung des Frischgasflows auf Werte des Atemminutenvolumens führt zu einem sehr schnellen Auswaschen des Anästhesiegases und innerhalb kürzester Zeit zu einem Erwachen des Patienten.

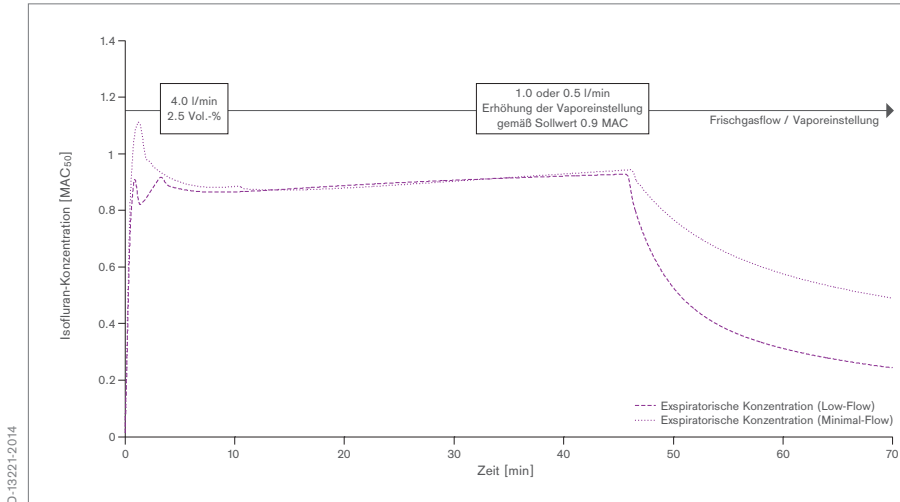


Abb. 21: Vergleich der expiratorischen Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O_2 /Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellungen von 2.5 Vol.-% Isofluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 1.0 oder 0.5 l/min. Je niedriger der Frischgasflow, desto höher muss die Vaporeinstellungen sein, um die expiratorische Isofluran-Konzentration von 0.9 MAC aufrechtzuhalten.

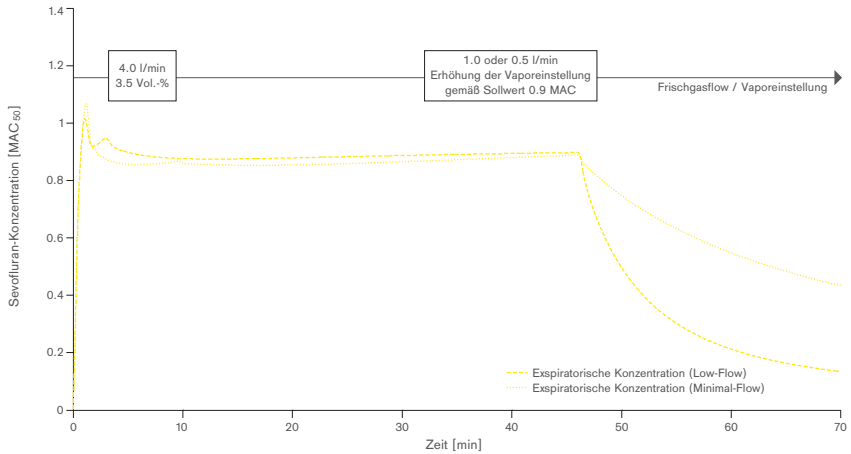


Abb. 22: Vergleich der expiratorischen Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalations-Anästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellungen von 3.5 Vol.-% Sevofluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 1.0 oder 0.5 l/min. Je niedriger der Frischgasflow, desto höher muss die Vaporeinstellungen sein, um die expiratorische Sevofluran-Konzentration von 0.9 MAC aufrechtzuerhalten.

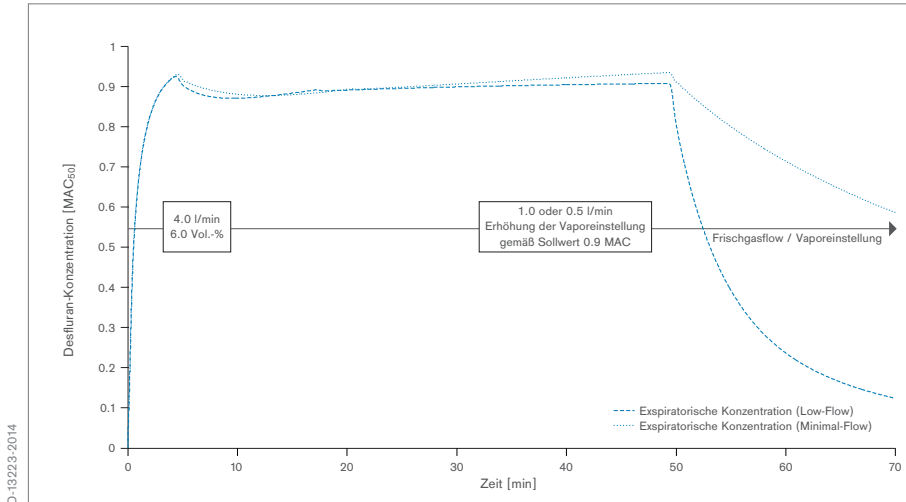


Abb. 23: Vergleich der expiratorischen Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellungen von 6 Vol.-% Desfluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 1.0 oder 0.5 l/min. Je niedriger der Frischgasflow, desto höher muss die Vaporeinstellungen sein, um die expiratorische Desfluran-Konzentration von 0.9 MAC aufrechtzuhalten.

3.6 Monitoring

Zum Monitoring beschränken wir uns auf die Überwachung der Anästhesiegaszusammensetzung im Kreissystem. Im Wesentlichen sind diese von den Einstellungen der unterschiedlichen Gase (O_2 , Luft, N_2O plus volatile Anästhetika) und dem Uptake des Patienten abhängig. Während bei einem hohen Frischgasflow die Gaszusammensetzung im Kreissystem ähnlich der des Frischgases ist, unterscheidet sich bei niedrigem Frischgasflow die Zusammensetzung erheblich von der des Frischgases. Die Routineüberwachung der Hämodynamik von Patienten ist vollkommen unabhängig vom gewählten Frischgasflow.

So regeln verbindliche technische Verordnungen und Empfehlungen der Anästhesie-Standesorganisationen (DGAI, BDA)* sowie geltende Lehrmeinungen das erforderliche Monitoring. Dieses umfasst unter anderem die ständige Anwesenheit und klinische Überwachung des Patienten durch den Anästhesisten. Weiterhin besteht das Monitoring aus einer kontinuierlichen Ableitung des Elektrokardiogramms, regelmäßigen Kreislaufkontrollen, Messung des Atemwegdrucks und des Expirationsvolumen. Bezüglich der Anästhesiegas-Überwachung gelten die Vorschriften nach ISO 21647 bzw. ISO 80601-2-55. Eine kontinuierliche Überwachung der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration ist obligatorisch. Unabdingbar ist die kontinuierliche Überwachung der expiratorischen Anästhesiegaskonzentration und der expiratorischen CO_2 -Konzentration des Atemwegsdrucks und des Atemminutenvolumens. Hier bedarf es eines automatisierten Algorithmus, der die Alarmer aktiviert. Besonders die inspiratorische Sauerstoffkonzentration muss über einen Alarm überwacht werden. Der Alarm sollte auf eine FiO_2 von 28 % eingestellt sein, um eine Hypoxie zu vermeiden.

* DGAI = Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin
BDA = Berufsverbandes Deutscher Anästhesisten

Aufgrund der großen Unterschiede der Anästhesiegase (Frischgaszusammensetzung – Gaskonzentrationen im Kreissystem) ist für den in Low- und Minimal-Flow-Anästhesien ungeübten Anwender die Überwachung der inspiratorischen und expiratorischen Anästhesiegaskonzentration äußerst wesentlich. Es müssen sowohl Anästhesiegase und inspiratorische Sauerstoff-Luft als auch die in- und expiratorischen CO_2 -Konzentrationen überwacht werden.

Die chemische Elimination des Kohlendioxids im Kreissystem hat eine essentielle Bedeutung. Die Erschöpfung des Kohlendioxidabsorbers ist bei einer Rückatemtechnik unbedingt zu verhindern, da eine Kumulation von Kohlendioxid im Kreissystem zu einer respiratorischen Azidose führt. Moderne Atemkalke bieten hier allein über den Farbumschlagsindikator noch keine ausreichende Sicherheit.

04 Durchführung einer Minimal-Flow-Anästhesie

4.1	Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas	52
4.1.1	Tipps und Tricks	54
4.1.2	Diskussion des Einsatzes eines Sauerstoff-Luft-Gemisches	55
4.2	Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff als Trägergas	58
4.2.1	Tipps und Tricks	60
4.2.2	Diskussion des Einsatzes von reinem Sauerstoff	62
4.3	Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Lachgas-Gemisch als Trägergas	68
4.3.1	Tipps und Tricks	70
4.3.2	Diskussion	72

04 Durchführung einer Minimal-Flow-Anästhesie

4.1 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas

SCHEMATISCHE VORGEHENSWEISE*

Prämedikation

Prämedikation nach gewohntem Schema

Einleitung

- Präoxygenierung mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min für 1 bis 3 Minuten unter Vorhalten einer Gesichtsmaske
- Intravenöse Gabe des Hypnotikums oder Inhalationseinleitung
- Analgesie und Relaxation (Achtung: Einleitungssopiod eventuell bis 20 % höher dosieren)
- Endotracheale Intubation oder Einlegen einer Larynxmaske
- Anschluss des Patienten an das Kreissystem

Initialphase

- Einstellungen Frischgasflow

Sauerstoff 1 l/min,	Luft 3 l/min (40 % Sauerstoff und 4 l/min Frischgasflow)
---------------------	---
- Vaporeinstellungen (siehe auch Abb. 21 bis 23)

Isofluran	2,5 Vol.-%
Sevofluran	3,5 Vol.-%
Desfluran	6 Vol.-%
- Die inspiratorische Sauerstoffkonzentration wird sich zwischen 35 und 40 Vol.-% einpendeln.

* Alle Angaben sind klinisch erprobte Orientierungswerte. Sie müssen aber im Einzelfall unbedingt der individuellen Reaktionslage des Patienten, den Leistungsmerkmalen der verwendeten Geräte und den operativen Erfordernissen entsprechend angepasst werden.

Diese schematischen Vorgehensweisen gibt es ebenfalls als Ausdrücke. Sie sind direkt über Dräger zu beziehen.

Nach Erreichen des Ziel-MAC-Wertes von 0,8 bis 1

- Verminderung Frischgasflow für Sauerstoff auf 0,3 l/min,
für Luft auf 0,2 l/min (68 % Sauerstoff und 0,5 l/min Frischgasflow)
- Erhöhung der Vaporeinstellung für

Isofluran auf	5 Vol.-%
Sevofluran auf	5 Vol.-%
Desfluran auf	8 Vol.-% (siehe auch Abb. 21 bis 23)

Monitoring

- Inspiratorische Sauerstoffkonzentration mit einer unteren Alarmgrenze von mindestens 28 Vol.-%
- Atemminutenvolumen: untere Alarmgrenze auf 0,5 l/min unter dem angestrebten Sollwert einstellen.
- Überwachung der Narkosemittelkonzentration im Atemsystem:
Obergrenzen für Isofluran auf 2 bis 2,5 Vol.-% setzen,
für Sevofluran auf 3 bis 3,5 Vol.-% und für Desfluran auf 8 bis 10 Vol.-%.
- Der Einsatz des Trägers SmartPilot View kann Minimal-Flow-Techniken sinnvoll unterstützen.

Ausleitung

- Reduzierung der Vaporeinstellung auf 0 % etwa 10 Minuten vor OP-Ende.
- Beibehalten des niedrigen Frischgasflows von 0,5 l/min.
- Überführen des Patienten zur Spontanatmung.
- Nach Ende der Naht, vor Extubation:
Spülen des Systems mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min.
- Postoperative Betreuung des Patienten entsprechend den üblichen abteilungsinternen Verfahrensweisen.

4.1.1 Tipps und Tricks

Erhöhung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert bei ungefähr 0,5 l/min.
- Die Vaporeinstellung um 1 bis 2 Vol.-% erhöhen (manchmal auch bis auf die maximale Abgabeleistung).
- Wenn die gewünschte Konzentration erreicht ist, den Vapor auf einen Wert von 0,5 bis 1 Vol.-% höher als den gewünschten Sollwert einstellen.

Verminderung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert bei 0,5 l/min.
- Die Vaporeinstellung um 1 bis 3,5 Vol.-% vermindern.
- Wenn die gewünschte niedrige Konzentration erreicht ist, den Vapor auf die vorherige Einstellung zurückstellen.

Narkose rasch vertiefen oder abflachen unter

Ausnutzung einer kurzen Zeitkonstante

- Den Vapor auf einen Wert von 0,5 bis 1 Vol.-% über oder unter der gewünschten Menge an Narkosegas einstellen.
- Erhöhen des Frischgasflows auf 4 l/min (1 Liter Sauerstoff, 3 Liter Luft).
- Wenn die gewünschte Narkosemittelkonzentration erreicht ist – in der Regel nach etwa 5 Minuten – den Frischgasflow erneut auf 0,5 l/min vermindern.
- Bei allen Niedrigflussnarkosen ist die expiratorische endtidale Narkosemittelmessung im Atemsystem obligatorisch. Alternativ zur kurzfristigen Vertiefung der Narkose durch Erhöhung des Frischgasflows ist eine additive intravenöse Injektion des Hypnotikums oder Analgetikums zu erwägen.

Achtung – inspiratorischer O₂-Alarm

- Fällt bei der gewählten Einstellung die inspiratorische Sauerstoffkonzentration auf weniger als 28 Vol.-% ab, den Frischgasflow Sauerstoff von 0,3 auf 0,5 l/min erhöhen und Luft auf 0 l/min reduzieren (100 % Sauerstoff und 0,5 l/min Frischgasflow).

Achtung – zu niedriger Frischgasflow

- Das Atemminutenvolumen fällt ab, der Atemwegspitzendruck fällt ab, das Gerät gibt Frischgasalarm, der Reservoirbeutel kollabiert.
- Auffüllen des Atemsystems durch Erhöhen des Frischgasflows auf 4 l/min (1 Liter Sauerstoff, 3 Liter Luft).
- Suche der Leckage (Loch im Schlauchsystem, Handbeatmungsbeutel, CO₂ Absorber korrekt befestigt?). Wenn die Leckage sich nicht beheben lässt, den Frischgasflow um 0,5 l/min erhöhen und zur Low-Flow-Anästhesie mit 1 l/min (0,3 l/min Sauerstoff und 0,7 l/min Luft oder 45 % Sauerstoff und 1 l/min Frischgasflow) übergehen.

Frischer Atemkalk muss sein

- Achten Sie auf die inspiratorische CO₂-Konzentration und auf den Atemkalk. Steigt die inspiratorische CO₂-Konzentration an, ist dies häufig ein Hinweis darauf, dass der Atemkalk erneuert werden sollte.

4.1.2 Diskussion des Einsatzes eines Sauerstoff-Luft-Gemisches

Die Vorteile der Durchführung der Minimal-Flow-Anästhesie mit einem Sauerstoff-Luft-Gemisch liegen in der Vereinfachung und Beschleunigung des Verfahrens. So vereinfacht der Verzicht auf Lachgas Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesien extrem, da etwaige chirurgische Kontraindikationen (intrazerebrale Eingriffe, Distension von luftgefüllten Körperhöhlen) sowie Gasvolumenschwankungen (z. B. durch den

Second-Gas-Effekt) nicht berücksichtigt werden müssen. Der Verzicht auf Lachgas führt zudem zu einer Beschleunigung des Verfahrens kürzeren High-Flow-Phasen. Auf suffiziente Denitrogenisierung und die Vermeidung von Volumenimbancen muss nur untergeordnet geachtet werden.

Durch diese Vorgehensweise und die schnelle Reduzierung auf einen niedrigen Frischgasflows von 0,5 l/min – nach Erreichen eines MAC-Wertes von 0,8 – ist mit einer erheblichen Kostenersparnis zu rechnen. Dies liegt daran, dass laut aktuellen Untersuchungen 60 bis 70 % des Verbrauches volatiler Anästhetika in den ersten zehn Minuten der Wash-in-Phase stattfinden. In der Anflutungsphase muss sichergestellt sein, dass das zugeführte Frischgasvolumen nicht niedriger ist als die Gasverluste durch die individuelle Gasaufnahme und die Leckagen des Systems.

Um auf ein Frischgas-Defizit im Anästhesiesystem aufmerksam zu machen, ist beispielsweise in Dräger-Geräten ein Frischgasmangel-Alarm installiert. Zusätzlich kann ein Ökonometer bei der Durchführung einer Low- und Minimal-Flow-Anästhesie als vorgezogenes ›Frühwarnsystem‹ für das Aufdecken von Frischgas-Defiziten (z. B. Leckagen) nützlich sein. Das Überprüfen der Füllung des Handbeatmungsbeutels der dem Anästhesiegerät jederzeit als Reservoir zur Verfügung steht, stellt jedoch für den Anwender eine ausreichende Überprüfung der Volumenbalance dar.

Die bei Körpertemperatur angefeuchtete Luft hat unter BTPS-Bedingungen (Body temperature pressure saturated, d. h. 37 °C, Barometerdruck = 100 kPa = 747 mmHg) die folgenden Partialdrücke in kPa:

$$pO_2 = 19,6 \text{ kPa}$$

$$pCO_2 = 0 \text{ kPa}$$

$$pN_2 = 74,1 \text{ kPa} \text{ (hierbei sind auch alle Edelgase unter Stickstoff, wie Argon und Xenon etc. einbezogen)}$$

$$pH_2O = 6,3 \text{ kPa}$$

Geht man bei der Durchführung der Anästhesie mit niedrigen Frischgasflows nach oben beschriebenen Regime vor, so wird eine inspiratorische O_2 -Konzentration von 35 bis 40 % erreicht.

Bei länger andauernden Eingriffen können sich Gase niedriger Löslichkeit akkumulieren (Stickstoff, Methan, Argon, Wasserstoff). Problematische oder gesundheitsgefährdende Konzentrationen dieser Gase wurden in keinem Fall nachgewiesen. Nur Stickstoff kann in so nennenswerter Konzentration im System auftreten, dass sowohl Sauerstoff oder Lachgaskonzentrationen beeinflusst werden. Durch intermittierende Spülphasen mit einem Frischgasflow von 5 l/min können die Gase geringer Löslichkeit ausgewaschen werden. In jedem Fall ist daher eine exakte Einstellung der Alarmgrenzen notwendig. In unseren Kliniken liegt die Alarmgrenze bei einer minimalen inspiratorischen O_2 -Konzentration von 28 %.

Bei einer ausschließlichen Benutzung von Sauerstoff als Trärgas ist eine Minimal-Flow-Anästhesie sicherer im Hinblick auf akzidentielle Hypoxämiegefahren und einfacher in der Durchführung.

Stickstoffkonzentration
[Vol.-%]

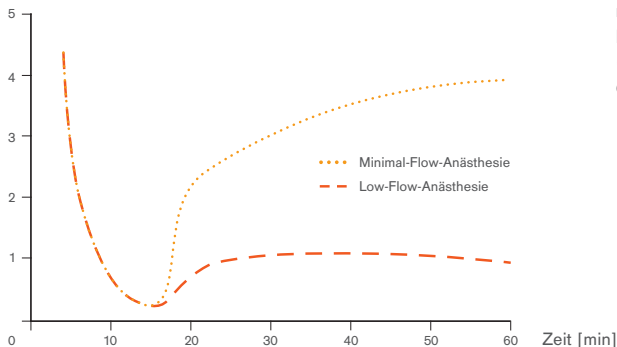


Abb. 24: Stickstoffakkumulation im Atemsystem, Patientengewicht 75 kg (modifiziert nach Baum JA et al.⁸⁾)

4.2 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff als Trägergas

SCHEMATISCHE VORGEHENSWEISE*

(AB EINEM PATIENTENALTER > 6 MONATE)

Prämedikation

Prämedikation nach gewohntem Schema

Einleitung

- Präoxygenierung mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min für 1 bis 3 Minuten unter Vorhalten einer Gesichtsmaske
- Intravenöse Gabe des Hypnotikums oder Inhalationseinleitung
- Analgesie und Relaxation (Achtung: Einleitungssopioid eventuell bis 20 % höher dosieren)
- Endotracheale Intubation oder Einlegen einer Larynxmaske
- Anschluss des Patienten an das Kreissystem

Initialphase

- Dauer 1 bis 8 Minuten – Einstellungen Frischgasflow
100 % Sauerstoff 1 l/min
- Vaporeinstellungen

Isofluran	5 bis 6 Vol.-%
Sevofluran	5 bis 6 Vol.-%
Desfluran	12 Vol.-%
- Die inspiratorische Sauerstoffkonzentration wird sich in Abhängigkeit von Alter und Gewicht zwischen 60 und 80 Vol.-% einpendeln.

* Alle Angaben sind klinisch erprobte Orientierungswerte. Sie müssen aber im Einzelfall unbedingt der individuellen Reaktionslage des Patienten, den Leistungsmerkmalen der verwendeten Geräte und den operativen Erfordernissen entsprechend angepasst werden.

Diese schematischen Vorgehensweisen gibt es ebenfalls als Ausdrücke. Sie sind direkt über Dräger zu beziehen.

Nach Erreichen des Ziel-MAC-Wertes von 0,8 bis 1

- Verminderung Frischgasflow für 100 % Sauerstoff auf 0,25 bis 0,35 l/min
- Änderung der Narkosemittelkonzentration siehe Tipps und Tricks (Seite 60)

Monitoring

- Inspiratorische Sauerstoffkonzentration mit einer unteren Alarmgrenze von mindestens 28 Vol.-%
- Atemminutenvolumen: Untere Alarmgrenze auf 0,5 l/min unter dem angestrebten Sollwert einstellen.
- Überwachung der Narkosemittelkonzentration im Atemsystem:
Obergrenzen für Isofluran auf 2 bis 2,5 Vol.-% setzen, für Sevofluran auf 3 bis 3,5 Vol.-% und für Desfluran auf 8 bis 10 Vol.-%.
- Der Einsatz des Dräger SmartPilot View kann Minimal-Flow-Techniken sinnvoll unterstützen.

Ausleitung

- Reduzierung der Vaporeinstellung auf 0 % etwa 10 bis 15 Minuten vor OP-Ende.
- Beibehalten des niedrigen Frischgasflows von 0,35 l/min.
- Überführen des Patienten zur Spontanatmung.
- Nach Ende der Naht, vor Extubation: Spülen des Systems mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min.
- Postoperative Betreuung des Patienten entsprechend den üblichen abteilungsinternen Verfahrensweisen.

4.2.1 Tipps und Tricks

Erhöhung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert auf 0,35 l/min.
- Die Vaporeinstellungen auf maximale Abgabeleistung erhöhen. Besonderheit Isofluran: Eine Vertiefung der Narkose allein mit Isofluran ist nur mit maximaler Abgabeleistung des Isofluran-Vapors bei gleichzeitiger Erhöhung des Frischgasflows zu etablieren.
- Wenn die gewünschte Konzentration erreicht ist, Vapor auf folgenden Wert einstellen:

Isofluran	maximale Abgabeleistung: 5 oder 6 Vol.-%
Sevofluran	5 bis 7 Vol.-%
Desfluran	12 bis 14 Vol.-%

Verminderung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert bei 0,35 l/min.
- Den Vapor schließen; kurz bevor die gewünschte niedrige Konzentration erreicht ist, Vapor auf folgenden Wert einstellen:

Isofluran	4,5 Vol.-%
Sevofluran	4,5 bis 5 Vol.-%
Desfluran	8 bis 12 Vol.-%

Narkose rasch vertiefen oder abflachen unter

Ausnutzung einer kurzen Zeitkonstante

- Frischgasflow auf 4 l/min 100 % Sauerstoff erhöhen (Achtung Vapor-Einstellung eventuell anpassen/reduzieren).
- Wenn die gewünschte Narkosemittelkonzentration erreicht ist – in der Regel nach 1 bis 3 Minuten – den Frischgasflow erneut auf 0,35 l/min vermindern.

- Vapor auf folgenden Wert einstellen:

Isofluran	maximale Abgabeleistung: 5 oder 6 Vol.-%
Sevofluran	4,5 bis 5 Vol.-%
Desfluran	8 bis 12 Vol.-%
- Bei allen Niedrigflussnarkosen ist die expiratorische endtidale Narkosemittelmessung im Atemsystem obligatorisch. Alternativ zur kurzfristigen Vertiefung der Narkose durch Erhöhung des Frischgasflows ist eine supplementorische intravenöse Injektion des Hypnotikums oder Analgetikums zu erwägen.

Achtung – inspiratorischer O₂-Alarm

- Fällt bei der gewählten Einstellung die inspiratorische Sauerstoffkonzentration auf weniger als 28 Vol.-% ab, den Frischgasflow Sauerstoff auf 0,5 l/min erhöhen.
- Prüfen des Systems auf Leckagen.
- Prüfen der Sauerstoffmessung auf Plausibilität.

Achtung – zu niedriger Frischgasflow

- Das Atemminutenvolumen fällt ab, der Atemwegspitzendruck fällt ab, das Gerät gibt Frischgasalarm, der Reservoirbeutel kollabiert.
- Auffüllen des Atemsystems durch Erhöhen des Frischgasflows auf 2 l/min über etwa eine Minute.
- Suche der Leckage (Loch im Schlauchsystem, Handbeatmungsbeutel, CO₂ Absorber korrekt befestigt?). Wenn die Leckage sich nicht beheben lässt, Erhöhung des Frischgasflows mit 100 % Sauerstoff um 0,5 l/min und zur Minimal-Flow- bzw. Low-Flow-Anästhesie mit 1 l/min übergehen.

Frischer Atemkalk muss sein

- Achten Sie auf die inspiratorische CO₂-Konzentration und auf den Atemkalk. Steigt die inspiratorische CO₂-Konzentration an, ist dies häufig ein Hinweis darauf, dass der Atemkalk erneuert werden sollte.

4.2.2 Diskussion des Einsatzes von reinem Sauerstoff

Generell: Die logische Folge der Anwendung der Minimal-Flow-Anästhesie unter Verzicht auf ein Sauerstoff-Lachgas- bzw. Sauerstoff-Luft-Gemisch ist die Metabolic-Flow-Anästhesie.

Durch die Anwendung von reinem Sauerstoff als Trägergas kann zu Beginn der Inhalationsanästhesie auf eine Denitrogenisierung verzichtet werden, weil Lachgas nicht eingewaschen werden muss. Somit können die Vorteile der Rückatemsysteme von Beginn an genutzt werden. Ein initial hoher Frischgasflow ist nur kurz bzw. nicht erforderlich.

Die Abgabeleistung der Vapore ist für Isofluran 5 bis 6 % (je nach Hersteller und Baujahr), Sevofluran 8 % und Desfluran 18 %. Nach Präoxygenierung kann zu Beginn der Inhalationsanästhesie ein niedriger Frischgasflow gewählt werden. Die Höhe des Frischgasflows ist abhängig von der Zeit, in der eine ausreichende Anästhesiegaskonzentration etabliert sein soll. Je höher der Frischgasflow, desto schneller ist die gewünschte Anästhesiegaskonzentration im Rückatemsystem erreicht. Je niedriger der Frischgasflow, desto langsamer steigt die Konzentration der volatilen Anästhetika an.

Aus unserer klinischen Erfahrung empfehlen wir einen Frischgasflow von 0,5 bis 1 l/min, um eine ausreichende Anästhesiegaskonzentration im Kreissystem zu erreichen. Hierdurch wird innerhalb von 5 bis 7 Minuten ein MAC-Wert von 0,9 für jedes moderne Anästhesiegas erzielt. Dieses Zeitfenster ist gegeben, da durch die Gabe eines intravenösen Hypnotikums (Thiopental, Propofol) für 7 bis 9 Minuten eine ausreichende Hypnosetiefe induziert wird. Mit dem Abfall der Plasmakonzentration der Hypnotika steigt zeitgleich die Konzentration der Inhalationsanästhetika an.

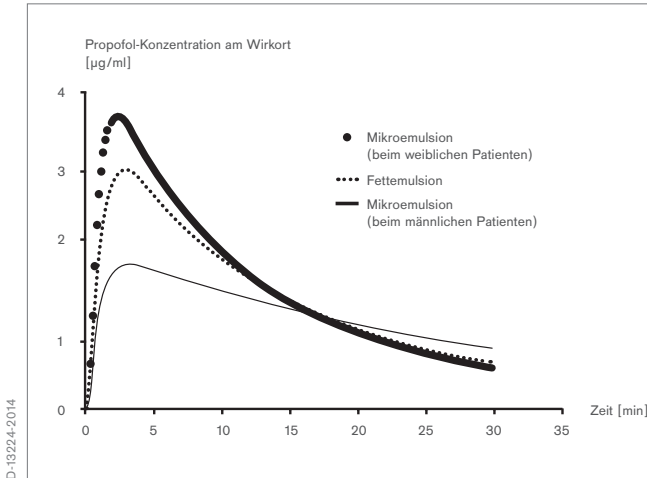


Abb. 25: Simulation eines intravenösen Bolus an Propofol 2 mg/kg in verschiedenen Emulsionen (Mikroemulsion sowie Fettemulsion) an einer Person mit 65 kg, 170 cm und einem Alter von 44 Jahren. Konzentration im Effektkompartiment (modifiziert nach Kim KM et al.³⁵)

Moderne Anästhesiegase metabolisieren nur gering, weisen eine schlechte Löslichkeit auf und sind somit gut steuerbar. Dadurch ist die Zeit für das Einwaschen der Anästhesiegase ins Kreissystem vereinfacht durch folgende Faktoren definiert: Zum größten Teil hängt dies vom Volumen des Kreissystems und der maximalen Abgabeleistung des Vapors sowie vom Lungenvolumen und vom Körpergewicht des Patienten ab.

Diese Tatsache belegen Untersuchungen zu den Anflutungsgeschwindigkeiten der Anästhesiegase Sevofluran und Desfluran in den Anästhesiegeräten Primus und Zeus³⁶. Wie aus den folgenden Abbildungen hervorgeht, unterscheiden sich die Geschwindigkeiten nur geringfügig und sind klinisch nicht relevant (Frischgasflow 0,5 l/min bis 1 l/min zur Anflutung im Frischgasmodus). Bei Isofluran hingegen lässt sich dies nur mit einem Frischgasflow von 1 l/min erreichen (siehe Abbildung 30).

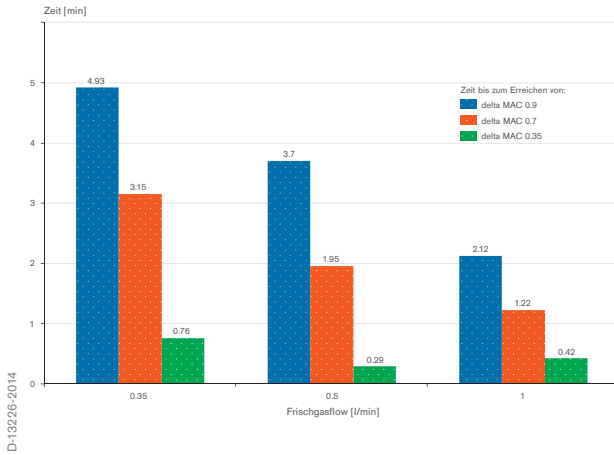


Abb. 26: Daten des Primus – Sevofluran

Maximale Abgabeleistung des Vapors 8 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $4 \times \text{MAC}$)

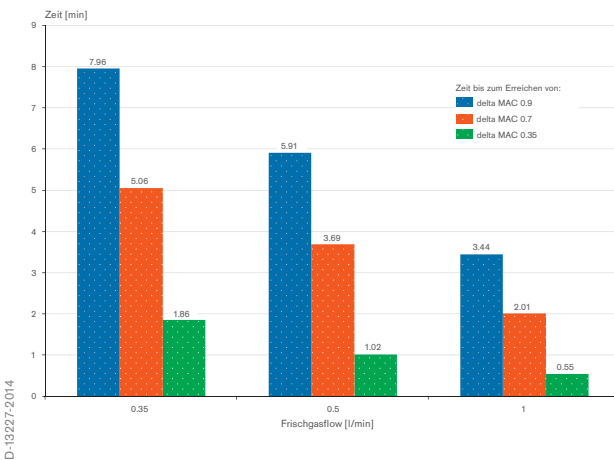


Abb. 27: Daten des Primus – Desfluran

Maximale Abgabeleistung des Vapors 18 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $3 \times \text{MAC}$)

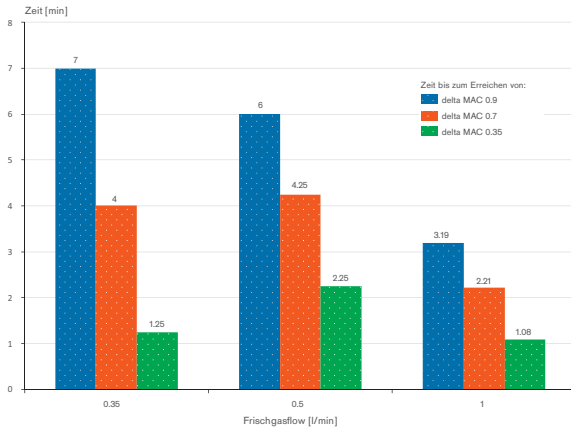


Abb. 28: Daten des Zeus – Sevofluran Anflutung im Frischgasmodus

Maximale Abgabeleistung des Vapors 8 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $4 \times \text{MAC}$)

D-13226-2014

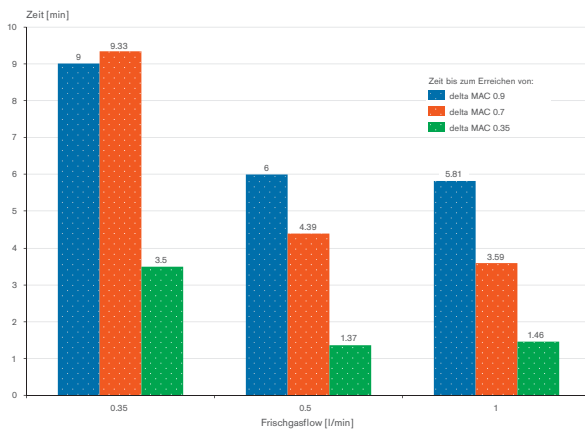


Abb. 29: Daten des Zeus – Desfluran Anflutung im Frischgasmodus

Maximale Abgabeleistung des Vapors 18 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $3 \times \text{MAC}$)

D-13229-2014

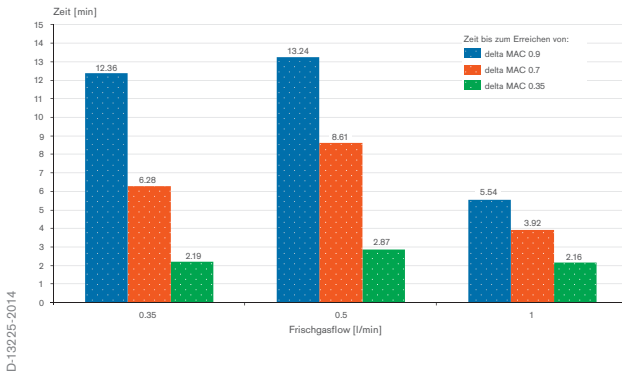


Abb. 30: Daten des Primus – Isofluran

Maximale Abgabeleistung des Vapors 5 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $4 \times \text{MAC}$)

Hinweis: Alle Daten in den Abbildungen 21 bis 25 stammen aus der Quelle³⁶.

Nachdem die Anästhesiegaskonzentration im Kreissystem den gewünschten Wert erreicht hat (z. B. MAC 0,9), kann der Frischgasflow weiter reduziert werden (z. B. von 0,5 auf 0,35 l/min, 100 % O₂). Ein solches Vorgehen ermöglicht ein adäquates Nutzen des Rückatemsystems.

Wie bei der Minimal-Flow-Anästhesie kann circa 10 Minuten vor dem Ende der Operation der Vapor geschlossen werden.

Zeitgleich mit der letzten Naht wird der Frischgasflow auf 4 bis 6 l/min erhöht, um das Anästhesiegas auszuwaschen. Ein noch höherer Frischgasflow in der Ausleitungsphase führt zu keinem schnelleren Auswaschen des Anästhesiegases. Grund ist, dass bei einem Frischgasflow von 4 bis 6 l/min der Rückatemanteil schon unter 2,5 % liegt. Eine Verdreifachung des Frischgasflows auf 18 l/min verringert die Rückatmung von 2,5 auf nur circa 0,75 % und wird klinisch die Ausleitung kaum weiter beschleunigen.

Bei der Metabolic-Flow-Anästhesie wird trotz weitestgehender Reduktion des Frischgasflows auf ein gewisses Überschussgasvolumen und die Einstellung einer standardisierteren Frischgaszusammensetzung nicht verzichtet. Dieses Verfahren, wie es von Professor Baum beschrieben wurde, ist im klinischen Routinebetrieb vollkommen problemlos durchzuführen. Das bedeutet noch einmal eine deutliche Erleichterung der Low- und Minimal-Flow-Anästhesie im Vergleich zu den Low- und Minimal-Flow-Anästhesien mit einem Sauerstoff-Luft-Gemisch beziehungsweise Sauerstoff-Lachgas-Gemisch als Trägergas⁹.

In den Kliniken Vechta und Damme sind seit 2004 mehr als 100.000 durchgeführte Anästhesien mit Sauerstoff als Trägergas dokumentiert^{37, 38}.

4.3 Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Lachgas-Gemisch als Trägergas

SCHEMATISCHE VORGEHENSWEISE*

Prämedikation

Prämedikation nach gewohntem Schema

Einleitung

- Präoxygenierung mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min für 1 bis 3 Minuten unter Vorhalten einer Gesichtsmaske
- Intravenöse Gabe des Hypnotikums oder Inhalationseinleitung
- Analgesie und Relaxation
- Endotracheale Intubation oder Einlegen einer Larynxmaske
- Anschluss des Patienten an das Kreissystem

Initialphase

- Einstellungen Frischgasflow
 - Sauerstoff 1,4 l/min, Lachgas 3 l/min (32 % Sauerstoff und 4,4 l/min Frischgasflow)
- Vaporeinstellungen

Isofluran	1 bis 1,5 Vol.-%
Sevofluran	2 bis 2,5 Vol.-%
Desfluran	4 bis 6 Vol.-%
- Die inspiratorische Sauerstoffkonzentration wird sich zwischen 30 und 40 Vol.-% einpendeln

* Alle Angaben sind klinisch erprobte Orientierungswerte. Sie müssen aber im Einzelfall unbedingt der individuellen Reaktionslage des Patienten, den Leistungsmerkmalen der verwendeten Geräte und den operativen Erfordernissen entsprechend angepasst werden.

Diese schematischen Vorgehensweisen gibt es ebenfalls als Ausdrücke. Sie sind direkt über Dräger zu beziehen.

Nach Erreichen des Ziel-MAC-Wertes von 0,8 bis 1

- Verminderung Frischgasflow auf insgesamt 0,5 l/min
(Sauerstoff 0,3 l/min, Lachgas 0,2 l/min, 60 % Sauerstoff und 0,5 l/min Frischgasflow)
- Erhöhung der Vaporeinstellung

Isofluran auf	2,5 Vol.-%
Sevofluran auf	3 bis 3,5 Vol.-%
Desfluran auf	5 bis 7,5 Vol.-%

Monitoring

- Inspiratorische Sauerstoffkonzentration mit einer unteren Alarmgrenze von mindestens 28 Vol.-%
- Atemminutenvolumen: untere Alarmgrenze auf 0,5 l/min unter dem angestrebten Sollwert einstellen.
- Überwachung der Narkosemittelkonzentration im Atemsystem: Obergrenzen für Isofluran auf 2 bis 2,5 Vol.-%, für Sevofluran auf 3 bis 3,5 Vol.-% und für Desfluran auf 8 bis 10 Vol.-% setzen.
- Der Einsatz des Dräger SmartPilot View kann Minimal-Flow-Techniken sinnvoll unterstützen.

Ausleitung

- Reduzierung der Vaporeinstellung auf 0 % etwa 10 bis 15 Minuten vor OP-Ende.
- Beibehalten des niedrigen Frischgasflows von 0,5 l/min.
- Überführen des Patienten zur Spontanatmung.
- Nach Ende der Naht, vor Extubation: Spülen des Systems mit 100 % Sauerstoff mit 6 l/min.
- Postoperative Betreuung des Patienten entsprechend den üblichen abteilungsinternen Verfahrensweisen.

4.3.1 Tipps und Tricks

Erhöhung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert bei ungefähr 0,5 l/min.
- Die Vaporeinstellung um 1 bis 2 Vol.-% erhöhen (manchmal auch bis auf die maximale Abgabeleistung).
- Wenn die gewünschte Konzentration erreicht ist, den Vapor auf einen Wert von 0,5 bis 1 Vol.-% höher als den gewünschten Sollwert einstellen.

Verminderung der Narkosemittelkonzentration unter

Ausnutzung der langen Zeitkonstante

- Der Frischgasflow bleibt unverändert bei 0,5 l/min.
- Die Vaporeinstellung um 1 bis 3,5 Vol.-% vermindern.
- Wenn die gewünschte niedrige Konzentration erreicht ist, den Vapor auf die vorherige Einstellung zurückstellen.

Narkose rasch vertiefen oder abflachen unter

Ausnutzung einer kurzen Zeitkonstante

- Den Vapor auf einen Wert von 0,5 Vol.-% über oder unter der gewünschten Menge an Narkosegas einstellen.
- Erhöhen des Frischgasflows auf 4,4 l/min (1,4 Liter Sauerstoff, 3 Liter Lachgas).
- Wenn die gewünschte Narkosemittelkonzentration erreicht ist – in der Regel nach etwa 5 Minuten – den Frischgasflow erneut auf 0,5 l/min (0,3 Liter Sauerstoff, 0,2 Liter Lachgas) vermindern.
- Bei allen Niedrigflussnarkosen ist die expiratorische endtidale Narkosemittelmessung im Atemsystem obligatorisch. Alternativ zur kurzfristigen Vertiefung der Narkose durch Erhöhung des Frischgasflows ist eine additive intravenöse Injektion des Hypnotikums oder Analgetikums zu erwägen.

Achtung – inspiratorischer O₂-Alarm

- Fällt bei der gewählten Einstellung die inspiratorische Sauerstoffkonzentration auf weniger als 28 Vol.-% ab, den Frischgasflow des Sauerstoffs von 0,3 auf 0,35 l/min erhöhen und Lachgas von 0,2 auf 0,15 l/min (70 % Sauerstoff und 0,5 l/min Frischgasflow) vermindern.

Achtung – zu niedriger Frischgasflow

- Das Atemminutenvolumen fällt ab, der Atemwegspitzendruck fällt ab, das Gerät gibt Frischgasalarm, der Reservoirbeutel kollabiert.
- Auffüllen des Atemsystems durch Erhöhen des Frischgasflows auf 4,4 l/min (1,4 Liter Sauerstoff, 3 Liter Lachgas).
- Suche der Leckage (Loch im Schlauchsystem, Handbeatmungsbeutel, CO₂ Absorber korrekt befestigt?). Wenn die Leckage sich nicht beheben lässt, den Frischgasflow um 0,5 l/min erhöhen und zur Low-Flow-Anästhesie mit 1 l/min (0,4 l/min Sauerstoff und 0,6 l/min Lachgas, 40 % Sauerstoff und 1 l/min Frischgasflow) übergehen.

Frischer Atemkalk muss sein

- Achten Sie auf die inspiratorische CO₂-Konzentration und auf den Atemkalk. Steigt die inspiratorische CO₂-Konzentration an, ist dies häufig ein Hinweis darauf, dass der Atemkalk erneuert werden sollte.

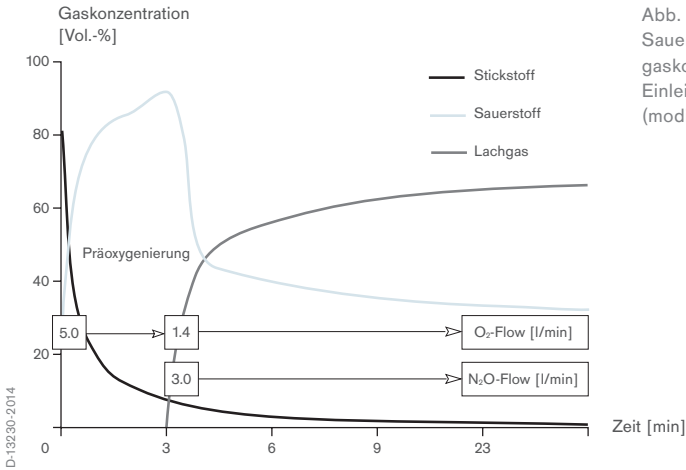


Abb. 31: Inspiratorische Sauerstoff- und Lachgaskonzentrationen beim Einleiten der Narkose (modifiziert nach Baum J²⁸)

4.3.2 Diskussion

IST DIESES VORGEHEN NOCH ZEITGEMÄSS?

Distickstoffmonoxid oder Lachgas (N_2O) ist ein Gas aus der Gruppe der Stickoxide. Die Literatur bezeichnet es auch als Stickoxydul beziehungsweise Stickoxidul. Der amerikanische Chemiker Joseph Priestley entdeckte 1772 das farblose Lachgas. Humphry Davy (1778 bis 1829), ebenfalls englischer Chemiker, gilt heute als Erstbeschreiber von dessen analgetischer Wirkung (1799). In der ersten Hälfte des 19. Jahrhundert fand Lachgas jedoch wegen seiner stimulierenden Wirkung hauptsächlich Anwendung in Vorführungen auf Jahrmärkten. Es gibt sogar Berichte über Lachgaspartys. Erstmalig wissenschaftlich aufgearbeitet hat das Thema der schottische Zahnarzt Horace Wells. Bei einer Zahnextraktion wurde Lachgas 1844 zum

ersten Mal eingesetzt. Nachdem seine schmerzstillende Wirkung feststand, ist Lachgas am häufigsten von allen Anästhesiegasen weltweit eingesetzt worden.

Wenn über die Verwendung von Lachgas in der Anästhesie diskutiert wird, sollte bedacht werden, dass der maximale additive anästhetische Effekt durch Lachgas eher unbedeutend ist. Somit kann es durch Erhöhung der Konzentration des volatilen Anästhetikums um nicht mehr als das 0,1 bis 0,15-fache des MAC-Wertes ersetzt werden. Um den Effekt des Lachgases zu ersetzen, können alternativ Opiode (z. B. Sufentanyl, Remifentanyl oder Alfentanyl) verwendet werden. Diese weisen nicht nur einen additiven Effekt auf, sondern verfügen darüber hinaus über eine gute Steuerbarkeit.

Weiterhin sind bei der Verwendung von Lachgas klar definierte Kontraindikationen zu beachten. Gerade bei bestimmten Risikoeingriffen in der Neurochirurgie, wo es zu einer Compliance-Abnahme und Hirndrucksteigerung kommen kann, ist Lachgas mittlerweile verzichtbar. Durch die supportive Therapie mit effektiven modernen Antiemetika können neue Anästhetika eingesetzt werden.

In der Herzchirurgie ist durch eventuelle myokale Depressionen und pulmonale Widerstandserhöhungen auf Lachgas besser zu verzichten. Dasselbe gilt für die Viszeralchirurgie wegen der Gefahr eines Ileus. Wegen des zunehmenden Kostendrucks – nicht erst seit der Einführung der diagnosebezogenen Fallgruppen (DRGs) in Deutschland – ist heute eine Kosten-Nutzen-Abwägung sinnvoll.

Neben sehr wirkungsvollen Antiemetika erlauben neue Anästhetika auf Lachgas ganz zu verzichten. Darüber hinaus gilt es unter dem zunehmenden Kostendruck eine Kosten-Nutzen-Abwägung vorzunehmen. Vor diesem Hintergrund scheint ebenfalls der Einsatz von Lachgas zur Supplementierung eher vernachlässigbar.

Sowohl Erfahrungen als auch aus der eigenen klinischen Praxis sowie aus zwei Krankenhäusern zeigen: Der konsequente Verzicht auf Lachgas bei der Durchführung von mehr als 100.000 Inhalationsanästhesien sowie der intravenösen Anästhesie erweist sich bisher als vollkommen unproblematisch.

Trotzdem werden die positiven und negativen Eigenschaften sehr kontrovers diskutiert. Während manche die Anwendung noch befürworten, praktizieren andere den vollständigen Verzicht auf Lachgas. Für viele Anästhesisten ist Lachgas ein vertrauter Bestandteil des Trägergases in Anästhesierückatemsystemen. Dabei werden als Argumente unter anderem eine relativ gute Steuerbarkeit und ein nennenswerter analgetischer Effekt erwähnt. Die sympathomimetische Wirkung von Lachgas kann den Kreislaufdepressiven Effekt der Inhalationsanästhetika kompensieren. Zudem kann es zu einem Einspareffekt an Anästhetika kommen. Zusätzlich scheint ein Second-Gas-Effekt bei Maskeninhalationseinleitung die Wirkung der Inhalationsanästhetika zu beschleunigen. Lachgas schützt aktiv vor intraoperativer Wachheit und unterdrückt spinale Abwehrreflexe durch Anästhetika.

Trotz der aufgezählten Vorteile sprechen viele Argumente gegen den weiteren routinemäßigen Einsatz von Lachgas³⁹:

- Im Tierexperiment ist Lachgas im Vergleich zu Stickstoff embryotoxisch und teratogen.
- Lachgas ist ökologisch nicht unbedenklich und trägt zum Treibhauseffekt bei.

- Sein Beitrag im Gesamtkonzept während einer Inhalationsanästhesie ist eher von geringer Bedeutung.
- Bei Langzeitanwendungen von Lachgas kann es zu megaloblastischen Veränderungen des Knochenmarks kommen.
- Dies führt zu entsprechenden Veränderungen des peripheren Blutbildes, welches auf eine Vitamin B₁₂-Hemmung zurückzuführen ist. Damit einhergehend können die DNA-Synthese gehemmt und Demyelinisierungsprozesse an Nervenzellen bewirkt werden. In den vergangenen Jahren wurde von schwerwiegenden neurologischen Störungen berichtet, die vor allem bei strengen Vegetariern und Veganern bereits nach vergleichsweise kurzer Anästhesie mit Lachgas aufgetreten sind.
- Lachgas führt zu einer zerebralen Vasodilatation und so auch zu einer Erhöhung des intrakraniellen Druckes. Besonders bei Patienten mit eingeschränkter zerebraler Compliance tritt dies auf. Lachgas diffundiert seinem Konzentrationsgefälle folgend in luftgefüllte Höhlen und Räume des Körpers. Handelt es sich hierbei um abgeschlossene Räume, kann es zu einer Druckerhöhung beziehungsweise Ausdehnung dieser Räume kommen. Hieraus ergeben sich als Kontraindikation für die Anwendung vom Lachgas:
 - der Ileus,
 - der Pneumothorax,
 - das Pneumomediastinum,
 - das Pneumoperikard,
 - Eingriffe am Mittelohr,
 - Luftembolien,
 - neurochirurgische und herzchirurgische Eingriffe und Operationen am offenen Ohr.

Weitere Argumente für einen Verzicht auf den Einsatz von Lachgas sind eher technischer Natur. So wird eine zentrale Lachgasversorgung vollkommen unnötig. Dadurch ergeben sich Einsparpotenziale bei Logistik und technischer Wartung. Die Gasdosierungssysteme an den Anästhesiegeräten können vereinfacht werden. Bei konsequentem Verzicht auf Lachgas lassen sich Anästhesien mit nahezu geschlossenen Systemen auch mit konventionellen Anästhesiegeräten in der Klinikroutine realisieren.

Das stärkste Argument gegen die Verwendung von Lachgas ist die Tatsache, dass es sich um ein hypoxisches Gas handelt. Das heißt, Sauerstoff muss von außen zugemischt werden.

05 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät

5.1 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät	78
5.2 Maximale Verdampferleistung je nach Anästhesiegas	79
5.3 Kreissystemvolumen und Zeitkonstante	83

05 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät

5.1 Technische Anforderungen an das Anästhesiegerät

Anästhesiegeräte der neueren Generation entsprechen allen Anforderungen zur sicheren Durchführung von Minimal-Flow-Anästhesien. Die Dosiersysteme und Verdunster/Verdampfer arbeiten präzise – auch im niedrigsten Flussbereich. Die Kompaktatemsysteme sind hochdicht. Die Geräte sind außerdem mit einem umfangreichen Monitoring ausgestattet. Dabei wird die kontinuierliche Überwachung der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration, des Atemwegsdruckes, des Atemminutenvolumens und der Anästhemittelkonzentration (bei einem Flow von weniger als 1 l/min) gewährleistet. Diese sicherheitstechnische Ausstattung ist normativ national und international verbindlich geregelt. Zudem wird ein solches Monitoring gefordert von den neuen Leitlinien zur Qualitätssicherung in der Anästhesiologie der Deutschen Gesellschaft für Anästhesie- und Intensivmedizin (DGAI)⁴⁰.

5.2 Maximale Verdampferleistung je nach Anästhesiegas

Herkömmliche Anästhesiesysteme bestehen aus einem Atemkreissystem, in welches Frischgas eingespeist wird. Die volatilen Anästhetika werden dem Frischgasflow beigemischt und dann ebenfalls ins Atemkreissystem eingespeist. Dies bedeutet, dass je nach Frischgaszufuhr und Größe des jeweiligen Atemkreissystems, die Gaszusammensetzung im Frischgas und im Kreissystem komplett unterschiedlich sein kann (siehe Abbildungen 5, 6 und 7: Gasflussdiagramme am Beispiel der Rückatemsysteme Primus, Perseus A500 und Zeus IE).

Damit bei reduzierten Frischgasflows noch genügend Anästhesiegas in das Kreissystem eingeleitet werden kann, ist die maximale Verdampferleistung von entscheidender Bedeutung. In der Anästhesiephase des Steady-State stößt die Verdampferleistung bei niedrigen Frischgasflows aber schnell an ihre Grenzen. So ist die maximale Verdampferleistung nicht mehr als drei- bis fünffacher MAC des jeweiligen Anästhesiegases. Zum Beispiel speisen Vapore bei einem Frischgasflow von 250 ml/min nicht mehr als 12,5 ml/min gasförmiges Isofluran, 20 ml/min Sevofluran oder 45 ml/min Desflurandampf in das Frischgassystem ein.

Am besten erfüllen Desfluran und Sevofluran die Voraussetzungen, um die gewünschte expiratorische Konzentration des Anästhesiegases zu etablieren. Insbesondere Sevofluran und Desfluran zeichnen sich durch eine geringere Löslichkeit aus. Eine vergleichsweise »hohe« maximale Abgabeleistung des Verdampfers beider Gase unter Verwendung niedriger Frischgasflows empfiehlt die Nutzung im geschlossenen System.

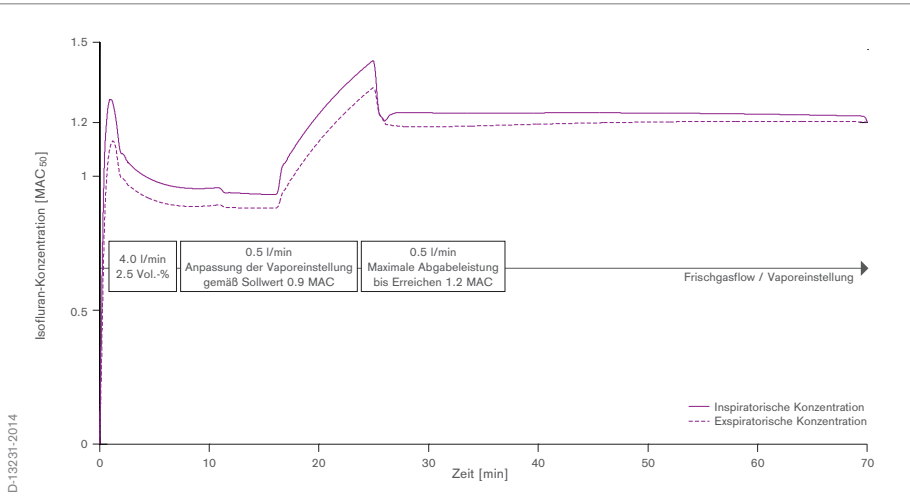


Abb. 32: Inspiratorische und expiratorische Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC, danach Erhöhung auf 1.2 MAC

Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellung von 2.5 Vol.-% Isofluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 0.5 l/min und Anpassung der Vaporeinstellung gemäß Sollwert 0.9 MAC.

Anmerkung: Bei lang andauernden Narkosen (> 90 Min.) muss die Vaporeinstellung entsprechend nach unten korrigiert werden, damit der gewünschte Sollwert 0.9 MAC beibehalten wird.

Nach 15 Minuten Erhöhung des Vaporeinstellung auf maximale Abgabeleistung bis die expiratorische Konzentration von 1.2 MAC erreicht ist.

Besonderheit Isofluran: Bei einer Metabolic-Flow Anästhesie mit einem Frischgasflow von 0.25 l/min bis 0.35 l/min kann die gewünschte Isofluran-Konzentration von 1.2 MAC, unter Ausnutzung der langen Zeitkonstante, nur durch Erhöhung der Vaporeinstellung bis auf die maximale Abgabeleistung bei gleichzeitiger Erhöhung des Frischgasflows erreicht werden.

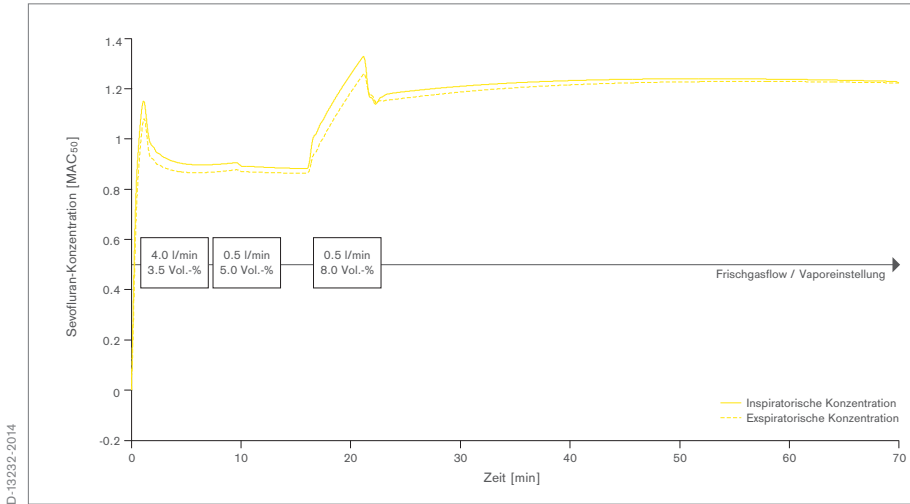


Abb. 33: Inspiratorische und expiratorische Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC, danach Erhöhung auf 1.2 MAC
 Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellung von 3.5 Vol.-% Sevofluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 0.5 l/min und Erhöhung der Vaporeinstellung auf 5 Vol.-%. Nach 15 Minuten Erhöhung des Vaporeinstellung auf maximale Abgabeleistung (hier 8 Vol.-%) bis die expiratorische Konzentration von 1.2 MAC erreicht ist.

Bei konstantem Flow von 0.5 l/min kann die gewünschte Sevofluran-Konzentration von 1.2 MAC, unter Ausnutzung der langen Zeitkonstante durch Erhöhung der Vaporeinstellung bis auf die maximale Abgabeleistung erreicht werden.

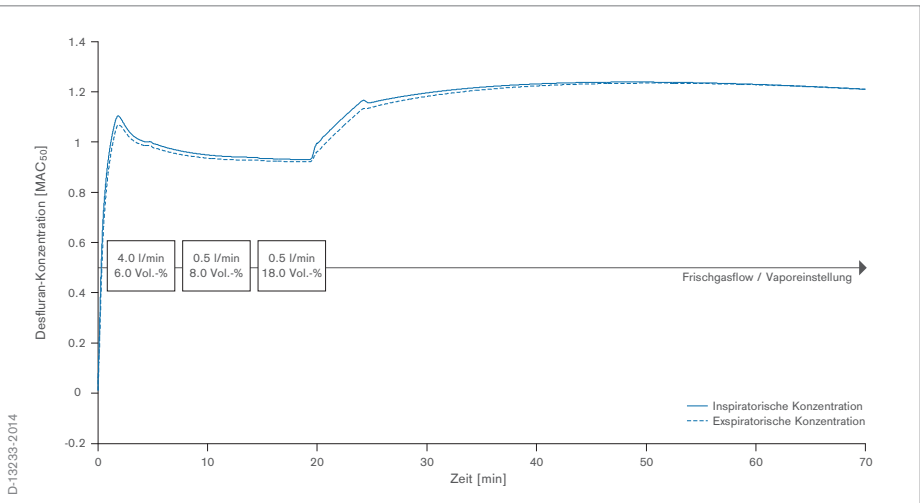


Abb. 34: Inspiratorische und expiratorische Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O₂/Air als Trägergase

Illustrative Grafik basierend auf dem 5-Kompartiment-Modell nach Bailey²⁵

Sollwert: expiratorische Konzentration: 0.9 MAC, danach Erhöhung auf 1.2 MAC
Vaporeinstellungen: siehe auch schematische Vorgehensweise Minimal-Flow-Anästhesie mit Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas (Seite 52/53).

Initialphase mit 4.0 l/min und einer Vaporeinstellung von 6 Vol.-% Desfluran. Bei Erreichen von Sollwert 0.9 MAC reduzieren des Flows auf 0.5 l/min und Erhöhung der Vaporeinstellung auf 8 Vol.-%. Nach 15 Minuten Erhöhung des Vaporeinstellung auf maximale Abgabeleistung (hier 18 Vol.-%) bis die expiratorische Konzentration von 1.2 MAC erreicht ist.

Bei konstantem Flow von 0.5 l/min kann die gewünschte Desfluran-Konzentration von 1.2 MAC, unter Ausnutzung der langen Zeitkonstante durch Erhöhung der Vaporeinstellung bis auf die maximale Abgabeleistung erreicht werden.

5.3 Kreissystemvolumen und Zeitkonstante

Die Zeitkonstante beschreibt die Zeit, in der Einstellungsveränderungen an der Gasdosiereinrichtung zu entsprechender Veränderung der Gaszusammensetzung im Atemsystem führen.

$$T = V_s / (V_D - V_U)$$

T = Zeitkonstante

V_s = Systemvolumen

V_D = in das System eingespeistes Frischgasvolumen

V_U = Gasvolumen, das vom Patienten aufgenommen wird (Patienten-Uptake)

Aus der Conway-Formel geht hervor, dass sich die Zeitkonstante T proportional zum Systemvolumen V_s (Geräte- und Lungenvolumen) und umgekehrt proportional zum Frischgasvolumen V_D verhält.

Daraus folgt: Je kleiner das zirkulierende Volumen im Kreissystem und je größer das eingespeiste Frischgasvolumen ist, desto kleiner ist die resultierende Zeitkonstante und desto schneller kommen Verdampferänderungen beim Patienten an.

06 Kontraindikationen von Niedrigflussnarkosen

06 Kontraindikationen von Niedrigflussnarkosen

6.1 Kontraindikationen von Niedrigflussnarkosen

Wenn durch eine kontrollierte Beatmung ein Herauswaschen von toxischen Gasen erreicht oder eine Kumulation verhindert werden soll, ist eine Durchführung von Minimal-Flow-Anästhesien kontraindiziert. Der Frischgasflow sollte dann 1 l/min nicht unterschreiten, um einen ausreichenden Auswascheffekt zu gewährleisten (ca. 50 %).

Bei einer Rauchgasvergiftung (Kohlenmonoxid, Cyanid-Intoxikation) ist ebenfalls eine Durchführung in Niedrigflusstechnik kontraindiziert. Ebenso gilt eine maligne Hyperthermie als Kontraindikation, wenn eine suffiziente Abatmung des Kohlendioxids erreicht werden muss und ein sofortiger Stopp der Zufuhr volatiler Anästhetika zu erfolgen hat. Kritisch für die Durchführung einer Minimal-Flow-Anästhesie erscheinen folgende weitere Indikationen: bei Patienten im ketoazidotischen Koma, bei Diabetes mellitus oder bei Patienten, die einer ketoazidotischen Stoffwechsellaage unterliegen (z. B. bei Anorexia nervosa). Beim Abatmen von Gasen mit hoher Fett- und Wasserlöslichkeit, wie bei Patienten mit Alkohol- oder Azetonvergiftung, ist eine solche Anästhesie ebenfalls eher kontraindiziert.

Selbstverständlich müssen in der präoperativen Visite und in dem Anästhesievorgespräch die patientenspezifischen Risiken und Voraussetzungen in gleicher Weise erfasst werden wie auch der Umfang und die Art der bevorstehenden Operation. So kann im Hinblick auf das Anästhesieverfahren, die Durchführung der Anästhesie und das Monitoring ein individuell optimal abgestimmtes Anästhesieverfahren mit dem Patienten besprochen werden.

Bei Routineeingriffen aber auch bei spontan auftretenden intraoperativen Komplikationen kann bei hoher Gasleckage, inadäquater Anästhesietiefe oder eventuell bei insuffizienter Denitrogenisierung eine Phase des High-Flows zur intermittierenden Spülung (5 l/min für 1 bis 5 Minuten) notwendig sein. Allerdings muss dann in Kauf genommen werden, dass durch diese kurzfristige Frischgaserhöhung die bereits erreichte Atemgasklimatisierung unterbrochen bzw. verschlechtert wird.

Unter Beachtung der Kontraindikationen lässt sich zusammenfassend erklären, dass sich bei den meisten Anästhesien ein niedriger Frischgasflow (unter 0,25 l/min bis 1 l/min) anbietet und unter den verschiedensten Gesichtspunkten bewährt.

07 Etablierung und Ausblicke

7.1 Etablierung von Niedrigflussnarkosen	90
7.2 Zukunftsperspektive Niedrigflussnarkose?	91

07 Etablierung und Ausblicke

7.1 Etablierung von Niedrigflussnarkosen

Die größte Gefahr bei einer Anästhesieführung sehen Experten darin, dass die uns anvertrauten Patienten während der Anästhesie eine akzidentielle Hypoxie erleiden. Dies wird als Hauptkritikpunkt bei der Etablierung und Implementierung von Low- und Minimal-Flow-Anästhesien im klinischen Alltag angeführt. Darüber hinaus vertreten auch erfahrene Anästhesisten manchmal die Meinung, dass diese Verfahren nicht für Anästhesisten in Weiterbildung oder junge Kollegen geeignet wären.

Diesen beiden Kritikpunkten können wir aus unserer weitreichenden klinischen Erfahrung heraus widersprechen: Eine Hypoxie lässt sich ausschließen, wenn die geräteseitigen Alarmparameter adäquat eingestellt sind. Das heißt, dass eine inspiratorische O_2 -Konzentration von 28 % und die kontinuierliche SpO_2 -Messung gewährleistet sein müssen. Ferner ist die Durchführung der Low- und Minimal-Flow-Anästhesie selbstverständlich auch geeignet für Weiterbildungskolleg. In der gründlichen Planung der anstehenden Operationen und durch Berücksichtigung der individuellen Voraussetzung des Patienten wird der mutmaßliche Sauerstoff-Uptake des jeweiligen Patienten einkalkuliert und bei Durchführung mit Sauerstoff als Trägergas eine sehr sichere und einfach durchzuführende Anästhesie angeboten.

Wir hoffen, dass wir den Kollegen mit unseren in diesem Buch angebotenen Konzepten vermitteln konnten, dass es sich um eine sichere Anästhesie handelt. Sicherheit und technisches Können der heutigen Anästhesiegeräte machen die Low-Flow-, Metabolic-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesien zum Verfahren der Wahl.

7.2 Zukunftsperspektive Niedrigflussnarkose?

Um diese Anästhesietechniken künftig noch stärker zu etablieren, wäre es nützlich, in den Geräten verlastete Algorithmen zu installieren, die ein Niedrigflussregime für den jeweiligen Patienten nach Eingabe von Alter, Körpergewicht und Größe vorschlagen könnten. Der Einsatz des Dräger SmartPilot View kann Minimal-Flow-Techniken sinnvoll unterstützen.

Weiterhin sollte an dieser Stelle noch einmal kritisch Stellung zu Sauerstoff als Trägergas bezogen werden. Denn die einfachste Durchführung dieser Anästhesietechniken beruht auf einem Sauerstoff-Trägergas. Selbstverständlich ist bekannt, dass Sauerstoff als Trägergas durchaus kontrovers diskutiert wird. So weisen belastbare Daten darauf hin, dass bei akut kardiologisch eingeschränkten Patienten, insbesondere nach stattgefundener Reanimation, ein zu hoher FiO_2 kontraindiziert ist.

In diesem Kontext spricht man auch von einem 'secondary hit', der oftmals dann vorkommt, wenn vormals ischämische Organsysteme reperfundiert werden. Hierbei scheint es so zu sein, dass zelluläre Schutzmechanismen gegen oxidativen Stress erschöpft sind und einer erhöhten Anflutung von Sauerstoffradikalen nicht entgegenreten können. Insbesondere erschöpfen sich die enzymatischen und nichtenzymatischen Radikalfänger (Antioxidatives Schutzsystem) und damit sekundär die Reparaturmechanismen der DNA. Um die Datenlage zu dieser Problematik weiter zu untermauern, werden weltweit und auch von uns Studien und weiterführende Datenerhebungen durchgeführt ^{41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48}.

Andrerseits ist unbestritten, dass die überwiegende Anzahl von Patienten mit elektiven Operationen (OP-Zeit < 8 Stunden) mit Sauerstoff als Trägergas bei Low- und Minimal-Flow-Anästhesien hervorragend versorgt sind. Dadurch können potenzielle Vorteile wie weniger Übelkeit, bessere Wundheilung, niedriges Risiko der akzidentiellen Hypoxie und Einfachheit der Durchführung voll zum Tragen kommen.

Zusammengefasst sehen wir dieses Regime der Anästhesieführung als elegantes, ressourcenschonendes, ökonomisch gebotenes und sicheres Verfahren für unsere Patienten an.

08 Literatur/Referenzen

8.1 Literaturverzeichnis	94
8.2 Abbildungsverzeichnis	98
8.3 Stichwortverzeichnis	101
8.4 Farblegende	103

08 Literatur/Referenzen

8.1 Literaturverzeichnis

- 1 Onishchuk JL. The early History of Low-Flow Anaesthesia. In Fink, B.R., L.E. Morris, C.R. Stephen, eds. The History of Anesthesia. Third International Symposium, Proceedings. Park Ridge, Illinois: Wood Library-Museum of Anesthesiology, 1992:308-313
- 2 Foldes F, Ceravolo A, Carpenter S. The administration of nitrous oxide – oxygen anesthesia in closed systems. *Ann Surg.* 1952;136:978-81
- 3 Virtue R. Minimal flow nitrous oxide anesthesia. *Anesthesiology* 1974;40:196-8
- 4 Baum JA, Enzenauer J, Krausse T, Sachs G. Soda lime – service, consumption and costs in relation to fresh gas flow. *Anaesthesiologie Reanimation* 1993;18(4):108-13 191
- 5 Baum JA, Aitkenhead AR. Low flow anaesthesia. *Anaesthesia* 1995; 50 Suppl: 37-44
- 6 Baum JA. Narkosesysteme. *Anaesthesist* 1987;36:393-399
- 7 Hönemann C, Hagemann O. Anaesthesie mit niedrigem Frischgasflow unter <http://kath-kliniken.de/images/Abteilungen/anaesthesie/Anaesthesie-mit-niedrigem-Gasfluss.pdf> (abgerufen am 01.07.2015).
- 8 Baum JA, Sachs G, v. d. Driesch C, Stanke HG. Carbon monoxide generation in carbon dioxide absorbents. *Anesth Analg* 1995;81:144-146
- 9 Baum JA: Die Anästhesie mit niedrigem Frischgasfluß: Darstellung des Verfahrens in Frage und Antwort / von Jan Baum, – Melsungen: Bibliomed, Med. Verl.-Ges., 1993, ISBN 3-921958-90-3
- 10 Ballard K, Cheeseman W, Ripiner T, Wells S. Humidification for ventilated patients. *Intensiv. Crit. Care. Nurs.* 1992;8:2-9
- 11 Chalou J, Loew D, Malebranche J. Effect of dry anaesthetic gases on tracheobronchial epithelium. *Anesthesiology* 1972;37:338-343
- 12 Hönemann C, Hagemann O, Doll D. Inhalational anaesthesia with low fresh gas flow. *Indian J Anaesth* 2013;57:345-50

- 13 Kleemann PP. Humidity of anaesthetic gases with respect to low flow anaesthesia. *Anaesth Intensive Care*. 1994;22:396-408
- 14 Aldrete JA, Cubillos P, Sherrill D. Humidity and temperature changes during low flow and closed system anaesthesia. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1981;25:312-4
- 15 Bilgi M, Goksu S, Mizrak A, et al. Comparison of the effects of low-flow and high-flow inhalational anaesthesia with nitrous oxide and desflurane on mucociliary activity and pulmonary function tests. *Eur J Anaesthesiol*. 2011;28(4):279-83
- 16 Aldrete JA. Closed circuit anesthesia prevents moderate hypothermia occurring in patients having extremity surgery. *Circular* 1987;4:3-4
- 17 Suttner S, Boldt J. Low-flow anaesthesia. Does it have potential pharmacoeconomic consequences? *Pharmacoeconomics*. 2000;17:585-90
- 18 Baum JA. *Low Flow Anaesthesia with Dräger Machines*. 2004
- 19 Lortat-Jacob B, Billard V, Buschke W, Servin F. Assessing the clinical or pharmacoeconomical benefit of target controlled desflurane delivery in surgical patients using the Zeus anesthesia machine. *Anaesthesia*. 2009;64(11):1229-1235
- 20 Baum JA. Low-flow anesthesia: Theory, practice, technical preconditions, advantages, and foreign gas accumulation. *J Anesth*. 1999;13:166-74
- 21 Virtue RW. Low flow anesthesia: advantages in its clinical application, cost, and ecology. In: Aldrete JA, Lowe HJ, Virtue RW, eds. *Low Flow and Closed System Anesthesia*. New York: Grune & Stratton 1979;103-109
- 22 Brody JS. New York: Reinhold; 1945. *Bioenergetics and Growth, with Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals*
- 23 Goldberg IS, Mostert JW, Lanzl EF, Lowe HJ. A pharmacokinetic model of closed-circuit inhalation anesthesia. *Ann Biomed Eng*. 1978;6:231-49
- 24 Lowe HJ, Mostert JW. Quantitative closed circuit anaesthesia. *Anaesthesia*. 1974;29:110-1
- 25 Bailey JM. The pharmacokinetics of volatile anesthetic agent elimination: a theoretical study. *J Pharmacokinetic Biopharm* 1989;17(1):109-23

- 26 Kreuer S, Bruhn J, Wilhelm W, Bouillon T. Pharmakokinetische/pharmakodynamische Modelle für Inhalationsanästhetika, *Anaesthesist* 2007;56:538-556
- 27 Eger EI. et al., Consumption of Volatile Agents under Low Flow and Metabolic Flow Conditions, *Anesthesiology* 2004;101:A485
- 28 Baum JA. Low Flow Anaesthesia with Dräger Machines, *Dräger Medical* 2008; 15-17
- 29 Severinghaus JW. The rate of uptake of nitrous oxide in man. *J Clin Invest.* 1954;33:1183-9
- 30 Heller AR, Brückner JB. Update Inhalationsanästhesie. (2009) unter http://www.ai-online.info/abstracts/pdf/dacAbstracts/2009/01_Heller-Brueckner.pdf
- 31 Nickalls RW, Mapleson WW. Age-related iso-MAC charts for isoflurane, sevoflurane and desflurane in man. *Br J Anaesth.* 2003;91(2):170-4
- 32 Eger EI. Age, minimum alveolar anesthetic concentration, and minimum alveolar anesthetic concentration-awake. *Anesthesia and Analgesia.* 2001;93:947-953
- 33 Hönemann C. Balancierte Anästhesie. In Tonner, PH, Hein L. *Pharmakotherapie in der Anästhesie und Intensivmedizin. Grundlagen und klinische Konzepte.* Springer-Verlag 2011, 291-302
- 34 Mapleson WW. Effect of age on MAC in humans: a meta-analysis. *Br J Anaesth.* 1996;76(2):179-85
- 35 Kim KM, Choi BM, Park SW et al. Pharmacokinetics and pharmacodynamics of propofol microemulsion and lipid emulsion after an intravenous bolus and variable rate infusion. *Anesthesiology.* 2007;106(5):924-34
- 36 Cand. med. Y. Dietzler, Marienhospital Vechta, Dissertationsarbeit, Data not published
- 37 Baum JA, von Bormann B, Meyer J, van Aken H. Sauerstoff als Trägergas in der klinischen Anästhesie. *Anästhesiologie und Intensivmedizin* 2004; 45: 124-135
- 38 Baum JA. The carrier gas in anaesthesia: nitrous oxide/oxygen, medical air/oxygen and pure oxygen. *Curr Opin Anaesthesiol.* 2004;17(6):513-6.

- 39 Onody P, Gil P, Hennequin M. Safety of inhalation of a 50 % nitrous oxide/oxygen premix: a prospective survey of 35.828 administrations. *Drug Saf* 2006;29:633-40
- 40 Leitlinien zur Qualitätssicherung in der Anästhesiologie der Deutschen Gesellschaft für Anästhesie- und Intensivmedizin (DGAI) unter <http://www.dgai.de/publikationen/leitlinien>
- 41 Joshua D, Koch. Brief exposure to hyperoxia depletes the glial progenitor pool and impairs functional recovery after hypoxic-ischemic brain injury! *J Cereb Blood Flow Metab.* 2008 July
- 42 Greif R, Akca O, Horn EP, Kurz A, Sessler DI. Supplemental perioperative oxygen to reduce the incidence of surgical-wound infection. *N Engl J Med* 2000;342:161-167
- 43 Greif R, Laciny S, Rapf B, Hickley RS, Sessler DI. Supplemental oxygen reduces the incidence of postoperative nausea and vomiting. *Anesthesiology* 1999;91:1246-1252
- 44 Akca O, Podolski A, Eisenhuber E, Panzer O, Hetz H, Lampl K, Lachner FX, Wittmann K, Grabenwoeger F, Kurz A, Schultz AM, Negishi C, Sessler DI. Comparable postoperative pulmonary atelectasis in patients given 30 % or 80 % oxygen during and for two hours after colon resection. *Anesthesiology* 1999;91:991-998
- 45 Meier J, Habler O. Rationaler Einsatz von Sauerstoff in der Anästhesie und Intensivmedizin. *Anaesthesist* 2011;4:292-302
- 46 Habre W, Peták F. Perioperative use of oxygen: variabilities across age. *Br. J. Anaesth.* 2014;113(suppl 2):ii26-ii36
- 47 Kopp VJ. Might hyperoxia during surgical anaesthesia contribute to older patients' higher dementia risk? *Br J Psychiatry.* 2014;204(2):163
- 48 Decalmer S, O'Driscoll BR. Oxygen: friend or foe in peri-operative care? *Anaesthesia.* 2013;68(1):8-12. Epub 2012 Nov 7

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

CME Artikel: Low and Minimal flow inhalation anaesthesia, Alan D. Baxter, *Canadian Journal of Anaesthesia*, 1997

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb.-Nr.	Beschreibung	Seite
Abb. 1	Überblick über Low-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesien im Rückatemsystem	09
Abb. 2	Low-Flow- und Minimal-Flow-Anästhesie mit einem O ₂ /N ₂ O-Gemisch als Trägergas im halbgeschlossenen Atemsystem Primus	10
Abb. 3	Low-Flow-, Minimal-Flow- und Metabolic-Flow-Anästhesie	10
Abb. 4	Prozentualer Anteil der Ausatemluft, der in Abhängigkeit vom Flow nach Zumischung des Frischgases und Abstrom des Überschussgases wieder zum Patienten gelangt	12
Abb. 5	Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Primus/Primus IE	14
Abb. 6	Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Perseus A500	16
Abb. 7	Gasflussdiagramm am Beispiel des Rückatemsystems Zeus/Zeus IE	17
Abb. 8	Vergleich der absoluten Feuchte des inspiratorischen Atemgases	21
Abb. 9	Atemgastemperatur in °C gemessen am Y-Stück im Inspirationsschenkel im zeitlichen Anästhesieverlauf am Anästhesiegerät Dräger Primus	22
Abb. 10	Relative Feuchte in % gemessen am Y-Stück im Inspirationsschenkel im zeitlichen Anästhesieverlauf am Anästhesiegerät Dräger Primus	22
Abb. 11	Absolute Feuchte in [g/m ³] gemessen am Y-Stück im Inspirationsschenkel im zeitlichen Anästhesieverlauf am Anästhesiegerät Dräger Primus	23
Abb. 12	Durchschnittliche ösophageale Körpertemperatur bei unterschiedlichen Frischgasflows (0.5 vs. 5 l/min)	23
Abb. 13	Kosteneinsparungen in Euro durch Minimal-Flow-Anästhesie von 0.5 l/min im Vergleich zur Standardtechnik mit einem Frischgasflow von 3 l/min	25
Abb. 14	Kosten der Inhalationsanästhetika in Euro auf Basis einer 2-Stunden-Inhalationsanästhesie	25
Abb. 15	Gesamtaufnahme volatiler Anästhetika (expiratorische Konzentration – Sollzustand 0.9 × MAC)	32

Abb.-Nr.	Beschreibung	Seite
Abb. 16	Inspiratorische und expiratorische Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O ₂ /Air als Trägergase	33
Abb. 17	Inspiratorische und expiratorische Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O ₂ /Air als Trägergase	34
Abb. 18	Inspiratorische und expiratorische Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie mit O ₂ /Air als Trägergase	35
Abb. 19	Gesamtgasaufnahme von Sauerstoff mit Lachgas als Trägergas (erwachsener Patient, 75 kg)	36
Abb. 20	Auswirkung des Alters auf MAC	41
Abb. 21	Vergleich der expiratorischen Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O ₂ /Air als Trägergase	45
Abb. 22	Vergleich der expiratorischen Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalations- Anästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O ₂ /Air als Trägergase	46
Abb. 23	Vergleich der expiratorischen Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Verschiedene Frischgasflows (Low-Flow vs. Minimal-Flow) mit O ₂ /Air als Trägergase	47
Abb. 24	Stickstoffakkumulation im Atemsystem, Patientengewicht 75 kg	57
Abb. 25	Simulation eines intravenösen Bolus an Propofol 2 mg/kg in verschiedenen Emulsionen (Mikroemulsion sowie Fettemulsion) an einer Person mit 65 kg, 170 cm und einem Alter von 44 Jahren. Konzentration im Effektkompartiment	63
Abb. 26	Daten des Primus – Sevofluran Maximale Abgabeleistung des Vapors 8 Vol.-% (dies entspricht ungefähr 4 × MAC)	64
Abb. 27	Daten des Primus – Desfluran Maximale Abgabeleistung des Vapors 18 Vol.-% (dies entspricht ungefähr 3 × MAC)	64
Abb. 28	Daten des Zeus – Sevofluran Anflutung im Frischgasmodus Maximale Abgabeleistung des Vapors 8 Vol.-% (dies entspricht ungefähr 4 × MAC)	65

Abb.-Nr.	Beschreibung	Seite
Abb. 29	Daten des Zeus – Desfluran Anflutung im Frischgasmodus Maximale Abgabeleistung des Vapors 18 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $3 \times \text{MAC}$)	65
Abb. 30	Daten des Primus – Isofluran Maximale Abgabeleistung des Vapors 5 Vol.-% (dies entspricht ungefähr $4 \times \text{MAC}$)	66
Abb. 31	Inspiratorische Sauerstoff- und Lachgaskonzentrationen beim Einleiten der Narkose	72
Abb. 32	Inspiratorische und expiratorische Isofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O_2/Air als Trägergase	80
Abb. 33	Inspiratorische und expiratorische Sevofluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O_2/Air als Trägergase	81
Abb. 34	Inspiratorische und expiratorische Desfluran-Konzentration im zeitlichen Ablauf einer Inhalationsanästhesie. Zusammenhang zwischen Frischgasflow und maximaler Vaporeinstellung mit O_2/Air als Trägergase	82
Tabelle 1	MAC-, MAC Aware- und MAC Awake-Werte verschiedener volatiler Anästhetika	38
Tabelle 2	Pharmakokinetische und pharmakodynamische Eigenschaften unterschiedlicher volatiler Anästhetika	43

8.3 Stichwortverzeichnis*

A	K
akzidentielle Hypoxämiegefahr.....57	Kohlendioxidabsorber.....11, 49
Alarmüberwachung.....48	Kosteneinsparung.....24, 25
Alveolarpartialdruck.....37	
Arbeitsplatzbelastung.....27	L
Atemgasfeuchte.....20ff	Lachgas.....36, 73ff
Atemgasklimatisierung.....12, 20ff	Lowe, Formel für Anästhesiegas-Uptake...31
Atemkalk.....11, 55, 61, 71ff	Low-Flow-Anästhesie.....07
B	M
Balancierte Anästhesie.....39	MAC-Wert.....37ff.
Brody-Formel.....30	Maximale Verdampferleistung.....78
	Mental Disorder.....42
C	Metabolic-Flow-Anästhesie.....62, 67
Closed-loop-Feedback-Regelung.....17	Minimal-Flow-Anästhesie.....07
Conway-Formel.....83	Mukoziliäre Clearance.....20
	Muskelrelaxanzien.....40
E	
Effektivität Anästhesiegase.....26	
	N
G	Nahezu geschlossenes System.....15
Geschlossenes System.....17	Nicht-quantitative Anästhesie.....08, 15
	Niedrigflussnarkosen.....07ff
H	
Halbgeschlossenes System.....13	O
Halboffenes System.....13	O ₂ -Konzentration Mangelalarm.....56

* Bei den hier aufgeführten Stichwörtern werden die hauptsächlichen Seiten zu dem Stichwort berücksichtigt und nicht jeweils weitere einzelne Nennungen im Text.

Q

Quantitative Anästhesie.....08, 17

R

Rückatemsystem (Defintion).....07

S

Sauerstoff als Trägergas.....58ff

Sauerstoff-Lachgas-Gemisch
als Trägergas.....68ff

Sauerstoff-Luft-Gemisch als Trägergas...52ff

Sauerstoffverbrauch.....30

T

Totale intravenöse Anästhesie (TIVA).....39


















Z

Zeitkonstante.....83

#

5-Kompartiment-Modell nach Bailey.....31

8.4 Farblegende

Farbe	Element
	Isofluran
	Sevofluran
	Desfluran
	Sauerstoff (O ₂)
	Lachgas (N ₂ O)
	Stickstoff (N)
	Low-Flow-Anästhesie
	Minimal-Flow-Anästhesie
	Metabolic-Flow-Anästhesie
	Nicht-quantitative Anästhesie im geschlossenen System
	delta MAC 0.35
	delta MAC 0.9
	delta MAC 0.7
	Gesamtgasaufnahme
	Frischgasflow 0.35 l/min
	Frischgasflow 2 l/min
	Frischgasflow 6 l/min

UNTERNEHMENSZENTRALE
Drägerwerk AG & Co. KGaA
Moislinger Allee 53–55
23558 Lübeck, Deutschland

www.draeger.com

HERAUSGEBER
Drägerwerk AG & Co. KGaA
Moislinger Allee 53–55
23558 Lübeck, Deutschland