

Aus der Klinik für Anästhesiologie
(Prof. Dr. med. K. Meissner)
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Gesamtbetriebskosten zweier
Narkosemaschinen
(Aisys[®] und Zeus[®] IE[®])
während operativer Eingriffe
in der Allgemeinchirurgie**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Arne Klaus Holger Blecken

aus

Northeim

Göttingen 2019

Dekan:	Prof. Dr. med. W. Brück
Referent:	Prof. Dr. med. J. Hinz
Ko-Referent:	PD Dr. med. T. Sprenger

Datum der mündlichen Prüfung: 18.05.2020

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel „Gesamtbetriebskosten zweier Narkosemaschinen (Aisys[®] und Zeus[®] IE[®]) während operativer Eingriffe in der Allgemeinchirurgie" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den
.....
(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Ökonomische Hintergründe	1
1.1.1 Gesamtbetriebskosten	1
1.1.2 Entwicklung der Krankenhausfinanzierung	2
1.1.3 Stellung der Universitätsklinik	4
1.2 Medizinische Hintergründe	4
1.2.1 Geschichte der Anästhesie	4
1.2.2 Systematik der Narkosemaschinen	5
1.2.3 Niedrigflussnarkose	7
1.2.4 Inhalationsanästhetikum Sevofluran	8
1.3 Entwicklung der Studienidee	9
1.4 Vorteile der zielgesteuerten Anästhesie	11
1.5 Fragestellung	11
2 Material und Methoden	12
2.1 Patientenrekrutierung und Randomisierung	12
2.2 Der Bereich Allgemeinchirurgie	14
2.3 Die Narkosemaschinen	15
2.3.1 Aisys® - GE Healthcare	15
2.3.2 Zeus® Infinity Empowered® – Drägerwerke AG & Co. KGaA	16
2.4 Einstellungen der Narkosemaschinen	17
2.4.1 Minimale alveoläre Konzentration von Sevofluran	17
2.4.2 Beatmungseinstellungen	18
2.5 Narkoseverfahren	20
2.5.1 Narkoseinduktion	20
2.5.2 Narkoseführung	21
2.5.3 Narkoseausleitung	22
2.6 Verbrauchsmessungen	22
2.6.1 Ermittlung des tatsächlichen Verbrauches von Sevofluran	23
2.6.2 Ermittlung der tatsächlichen Verbräuche der übrigen Gase	23
2.6.3 Ablauf der Verbrauchsmessungen	24
2.7 Kostenermittlung	25
2.7.1 Kostenermittlung Sevofluran	25
2.7.2 Kostenermittlung Sauerstoff	25

2.7.3	Kostenermittlung medizinische Druckluft.....	26
2.7.4	Kostenermittlung elektrischer Strom.....	27
2.7.5	Kostenermittlung Anschaffung der Geräte und Wartung.....	27
2.8	Statistische Auswertung.....	28
3	Ergebnisse	30
3.1	Patienten.....	30
3.1.1	Vergleich der biometrischen Daten.....	30
3.1.2	Vergleich der ASA-Klassifikationen	31
3.2	Vergleich der Zeitintervalle	32
3.3	Vergleich der Verbräuche der medizinischen Gase.....	33
3.4	Verbrauch von elektrischem Strom.....	35
3.5	Übersicht der Betriebskosten.....	35
3.6	Vergleich zwischen gemessenen und durch die Narkosemaschine angezeigten Verbrauch.....	37
3.6.1	Abweichungen im angezeigten Sevofluranverbrauch.....	37
3.6.2	Abweichungen im angezeigten Sauerstoffverbrauch	38
3.6.3	Abweichungen im angezeigten Verbrauch von medizinischer Druckluft	41
4	Diskussion.....	44
4.1	Gesamtbetriebskosten	44
4.2	Interpretation der Betriebskosten.....	45
4.3	Methodendiskussion	51
4.4	Limitationen.....	53
4.5	Schlussfolgerung	54
5	Zusammenfassung	55
6	Anhang	57
6.1	Messprotokoll.....	57
6.2	Tabelle Sevoflurankonzentration und Atemzugvolumen.....	59
7	Literaturverzeichnis.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bereinigte Kosten der Krankenhäuser 1991-2017	3
Abbildung 2: Strukturformel Sevofluran	9
Abbildung 3: Narkosemaschine Aisys®	15
Abbildung 4: Zeus® IE®	16
Abbildung 5: Turbine aus einem Zeus® IE®	17
Abbildung 6: Druckminderer LEO1	23
Abbildung 7: Narkosemaschine Aisys® mit 50-l- bzw. 10-l-Druckgasflasche	24
Abbildung 8: Anlieferung Sauerstoff durch Firma AIR LIQUIDE	26
Abbildung 9: Übersicht über verschiedene Wartungsmodelle	28
Abbildung 10: Aufteilung der Patienten in ASA-Klassen.....	32
Abbildung 11: Übersicht der Zeitintervalle	33
Abbildung 12: Laufende Betriebskosten der Narkosemaschinen	37
Abbildung 13: Boxplot Sevofluranverbrauch.....	38
Abbildung 14: Boxplot Sauerstoffverbrauch in der Zeusgruppe	40
Abbildung 15: Boxplot Sauerstoffverbrauch in der Aisysgruppe.....	40
Abbildung 16: Boxplot Verbrauch an medizinischer Druckluft in der Zeusgruppe	42
Abbildung 17: Boxplot Verbrauch an medizinischer Druckluft in der Aisysgruppe	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exemplarische Komponenten zur TCO-Berechnung von Narkosemaschinen.....	2
Tabelle 2: Übersicht der Narkosesysteme	5
Tabelle 3: Apfel-Score	13
Tabelle 4: Ausgangswerte der Preisberechnung pro m ³ Sauerstoff	25
Tabelle 5: Berechnung der Sauerstoffkosten pro m ³ Sauerstoff.....	26
Tabelle 6: Vergleich der biometrischen Daten	31
Tabelle 7: Vergleich der Zeitintervalle.....	33
Tabelle 8: Übersicht Gasverbrauch	35
Tabelle 9: Übersicht der Betriebskosten in 10 Jahren	36
Tabelle 10: Vergleich zwischen errechnetem und angezeigtem Sevofluranverbrauch	38
Tabelle 11: Abweichungen im Sauerstoffverbrauch	41
Tabelle 12: Abweichungen im Verbrauch von medizinischer Druckluft	43

Abkürzungsverzeichnis

AMV	Atemminutenvolumen
ARDS	<i>acute respiratory distress syndrome</i>
ASA	American Society of Anesthesiologists
AutoDosierung	Automatische Dosierung (Zeus [®] IE [®])
AutoFlow	Beatmungsmodus (Zeus [®] IE [®])
AZV	Atemzugvolumen
BMI	Body Mass Index
DIVA	<i>direct injection of volatile agents</i>
DRG	<i>diagnosis-related group</i>
ET-Ctrl	Endtidal-control (Aisys [®])
EtCO ₂	Endtidale Konzentration von Kohlendioxid
F _{ACO₂}	Expiratorischer Anteil an Kohlendioxid
F _I CO ₂	Inspiratorischer Anteil an Kohlendioxid
F _e O ₂	Expiratorischer Anteil an Sauerstoff
F _I O ₂	Inspiratorischer Anteil an Sauerstoff
IBW	<i>ideal body weight</i>
MAC	minimale alveoläre Konzentration
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
NAVat	<i>Symposium on automated low flow anaesthesia and visual drug display systems, Belgium</i>
OP	Operation
PCV-VG	<i>Pressure-controlled ventilation - Volume guaranteed</i>
PONV	<i>postoperative nausea and vomiting</i>
SOP	<i>standard operating procedure</i>
SGB	Sozialgesetzbuch
STK	Sicherheitstechnische Kontrolle
TCA	<i>target-controlled anaesthesia</i>
TCO	<i>total cost of ownership</i>
TIVA	totale intravenöse Anästhesie
UMG	Universitätsmedizin Göttingen
Zeus [®] IE [®]	Zeus [®] Infinity Empowerd [®]
ZVK	zentraler Venenkatheter

1 Einleitung

In der anästhesiologischen Forschung nehmen neben klinischen Fragestellungen zunehmend auch Themen der Ökonomie einen Forschungsschwerpunkt ein, da perioperative Prozesse zu einem Hoherlösbereich im Krankenhaus zählen. In der Kostenkalkulation eines Krankenhauses stellen Sachkosten und somit kostenintensive Medizingeräte einen wesentlichen Faktor der Gesamtbetriebskosten dar. Diese prospektive Studie beschäftigt sich mit der Ermittlung der Gesamtbetriebskosten zweier Narkosemaschinen unter Berücksichtigung von Anschaffungs- und Wartungskosten, aber insbesondere auch der laufenden Kosten für Verbrauchsmaterialien.

1.1 Ökonomische Hintergründe

1.1.1 Gesamtbetriebskosten

Der Begriff der Gesamtbetriebskosten, *total cost of ownership* (TCO), wurde 1987 erstmalig von Bill Kirwin beschrieben. Er veranschaulichte ein Berechnungsverfahren für den Bereich der Informationstechnologie, welches im Auftrag von Microsoft® entwickelt wurde. Es definiert die Gesamtkosten eines Anschaffungsgegenstandes, die während des Lebenszyklus durch Beschaffung, Nutzung, Management und Entsorgung anfallen. Dies war insofern ein neuer Ansatz, da es bis zu diesem Zeitpunkt üblich war, lediglich die Anschaffungskosten für Beschaffungsplanungen zu berücksichtigen. Laufende Betriebskosten waren dagegen weitgehend von einer Berechnung ausgenommen. Das Konzept wurde in den folgenden Jahren von mehreren Firmen weiterentwickelt (Wild und Herges 2000). Ziel war und ist es, Kostentreiber bzw. versteckte Kosten im Rahmen einer Investitionsentscheidung zu identifizieren.

Am Beispiel der Anschaffung von Narkosemaschinen können TCO in folgende Bereiche aufgeteilt werden (Tabelle 1):

Tabelle 1: Exemplarische Komponenten zur TCO-Berechnung von Narkosemaschinen

Investition	Wartung	Betrieb
Preis	Schulungen	Volatile Gase
Leasing	Eigene Leistung	Sauerstoff
Kreditfinanzierung	Fremdfirmen	Druckluft
Barzahlung	Reparaturen	Strom

1.1.2 Entwicklung der Krankenhausfinanzierung

Das heutige Gesundheitswesen wurde strukturell sowie inhaltlich durch gesetzliche Grundlagen geprägt, die im letzten Jahrhundert geschaffen wurden. Unter Otto von Bismarck wurde 1883 das „Gesetz, betreffend die Krankenversicherung der Arbeiter“ verkündet. Es folgten weitere Sozialgesetze zur Unfall-, Alters- und Invalidenversicherung. Hierdurch waren weite Teile der Bevölkerung gegen soziale Risiken abgesichert. 1975 wurde ein neues Sozialgesetzbuch (SGB) erstellt, welches die bis dahin erlassenen Gesetze und Verordnungen ersetzte. Das SGB V regelt seitdem die Beziehungen zwischen Versicherten, Krankenkassen sowie Leistungserbringern. In den nachfolgenden Jahrzehnten folgten weitreichende Reformen mit dem Ziel, die zunehmenden Ausgaben im stationären Sektor zu begrenzen. Krankenhausintern wird diese Aufgabe vom Kosten- und Leistungsmanagement überwacht und gesteuert (Bauer et al. 1999). Dies alles führte zu relevanten Veränderungen im Bereich der Finanzierung des Gesundheitssystems. Im Jahre 2000 erfolgte durch ein Gesetz zur Reform der gesetzlichen Krankenversicherung die Einführung eines leistungsorientierten und pauschalierenden Vergütungssystems.

Seit dem Jahr 2004 werden Krankenhausbehandlungen in *diagnosis-related groups* (DRG) eingeteilt. Hierbei werden einzelne Behandlungsfälle unter Berücksichtigung von Kriterien wie Diagnose, Schweregrad, Komorbiditäten und Alter zusammengefasst. Die Behandlungsvergütung

erfolgt hierauf basierend als Fallpauschale und damit unabhängig von der Zahl der Behandlungstage oder dem Behandlungsumfang. In Folge dieser Veränderungen konnten die Krankenhäuser eine Kostensenkung bei gleichbleibender hoher Behandlungs- und Ergebnisqualität nur durch eine Effizienzerhöhung erreichen. Es kam zu einem weitreichenden strukturellen Wandel. Dieser zwang Krankenhäuser dazu, Prozesse und Strukturen zu optimieren, um in einem nun zunehmend marktwirtschaftlich geprägten Umfeld Kosten zu reduzieren und wettbewerbsfähig zu bleiben (Bauer und Bach 1999). Bezogen auf unmittelbar perioperative Prozesse sind hierzu eine fortwährende Überwachung und Optimierung der Arbeitsabläufe erforderlich (Bauer et al. 2007).

Dem Kostennachweis des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2017 ist zu entnehmen, dass die Kosten der Krankenhäuser in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) 103,6 Milliarden Euro betragen. Subtrahiert man hiervon die Kosten, die für nichtstationäre Leistungen entstehen (wissenschaftliche Forschung, Lehre und Ambulanzen), ergeben sich sogenannte „bereinigte Kosten“ von 91,3 Milliarden Euro. Die Personalkosten betragen hiervon 60,3%, weitere 37,0% entfallen auf Sachkosten. Betrachtet man isoliert die Sachkosten, entfallen hiervon 49,1% auf den medizinischen Bedarf (Statistisches Bundesamt 2018). Im Vergleich dazu betragen im Jahr 1991 die bereinigten Kosten 37,42 Milliarden Euro. Dies entspricht einem durchschnittlichen Kostenanstieg von ca. 3,5% pro Jahr (Abbildung 1).

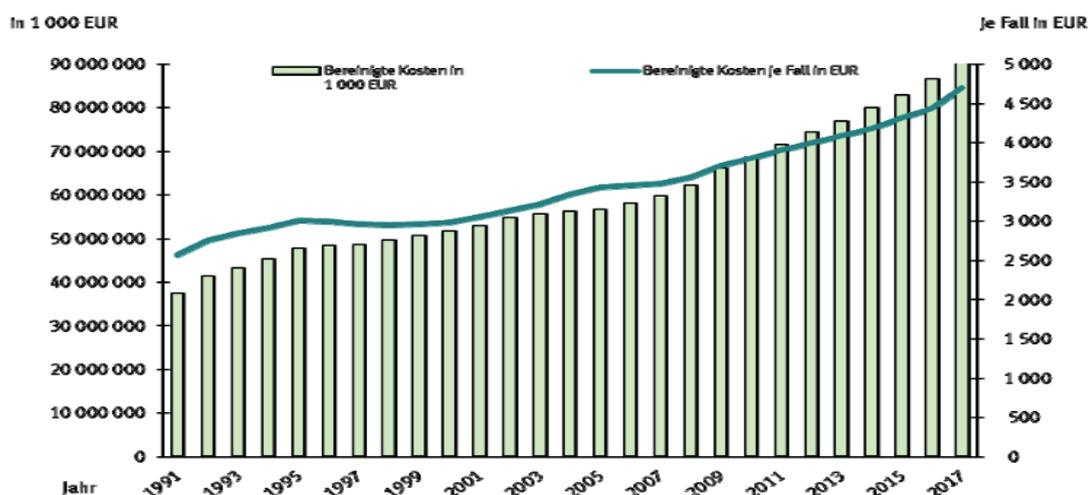


Abbildung 1: Bereinigte Kosten der Krankenhäuser 1991-2017 (Quelle: Statistisches Bundesamt, Kostennachweis der Krankenhäuser, Fachserie 12 Reihe 6.3. Abgerufen am 01.03.2019)

1.1.3 Stellung der Universitätsklinik

Aktuell stehen Krankenhäuser in Deutschland unter einem erheblichen Kostendruck, der sich insbesondere durch Steigerungen im Energie-, Personal- und Sachkostenbereich weiter erhöhen wird. Einen besonderen Stellenwert innerhalb der Krankenhäuser nehmen Universitätsklinik ein, da diese neben der Krankenversorgung auch umfangreiche Aufgaben im Bereich Forschung und Lehre erbringen (Schmidt et al. 2005). Durch ihre Stellung als Supramaximalversorger ist eine Konzentration auf überdurchschnittlich ertragreiche Bereiche nicht möglich. Eine gesonderte Leistungsvergütung erfolgt im Vergleich zu anderen Krankenhäusern jedoch nicht (Albrecht et al. 2013). Durch den medizinischen Fortschritt sowie die zügig voranschreitende technische Entwicklung sind insbesondere investitions- und kostenintensive Behandlungsgeräte in den Fokus der Kostenanalyse geraten. Hierdurch erklärt sich das zunehmende Interesse an der Berechnung der Gesamtbetriebskosten, um auf der Basis von Anschaffungs- und Betriebskosten eine wirtschaftlich begründbare Kaufentscheidung zu treffen und somit Einsparungen im Bereich der Sachkosten zu realisieren.

1.2 Medizinische Hintergründe

Zum 200. Jahrestag des New England Journal of Medicine (NEJM) wurde nach dem wichtigsten Artikel in der Geschichte des NEJM gefragt. Diese Umfrage konnte der Report des Bostoner Chirurgen Henry Jacob Bigelow aus dem Jahr 1846 für sich entscheiden. Er beschrieb die Unempfindlichkeit während chirurgischer Eingriffe durch Inhalation von Äther (Bigelow 1846). Dies verdeutlicht den Stellenwert der Anästhesie, welche die heutige moderne Medizin, insbesondere im operativen Bereich erst ermöglicht hat.

1.2.1 Geschichte der Anästhesie

Am 16.10.1846 wurde die erste Inhalationsnarkose mittels Äther als Narkotikum durch William Thomas Green Morton öffentlich durchgeführt. Einige Jahre später wurde auch das bereits 1831 durch Justus Liebig entdeckte Chloroform eingesetzt. Allgemeinanästhesien waren in den nachfolgenden Jahren trotz erheblicher Nebenwirkungen und Gefahren, wie

z. B. der Entflammbarkeit von Äther und der Toxizität von Chloroform der anästhesiologische Standard. Die Idealvorstellung eines gasförmigen (volatilen) Narkosemittels sollte dabei folgende Ansprüche erfüllen:

- Gute analgetische und hypnotische Wirkung
- Einen niedrigen Blut/Gas-Koeffizienten, um eine gute Steuerbarkeit durch schnelle An- und Abflutung zu erreichen
- Keine humanpathogene Toxizität und keine Interaktion mit anderen Pharmaka oder Atemkalk
- Keine kardiovaskulären oder respiratorischen Nebenwirkungen, insbesondere keine Reizung der Atemwege

In Bezug auf Sicherheitsaspekte, ökologische und ökonomische Faktoren sind des Weiteren noch folgende Anforderungen bedeutsam:

- Fehlende Entflammbarkeit
- Keine Ökotoxikologie
- Hohe therapeutische Breite
- Niedrige Verbrauchskosten

1.2.2 Systematik der Narkosemaschinen

Die Nomenklatur der verschiedenen Narkosesysteme zur Durchführung einer Inhalationsanästhesie wurde von Moyers beschrieben (Moyers 1953). Die Einteilung erfolgt nach funktionellen Kriterien in offene, halboffene, halbgeschlossene und geschlossene Systeme. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die von Moyers beschriebene Systematik, in der sich vor allem Unterschiede in Bezug auf das Vorhandensein eines Reservoirs und der Möglichkeit zur Rückatmung finden.

Tabelle 2: Übersicht der Narkosesysteme

	Reservoir	Rückatmung
Offen	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Halboffen	Vorhanden	Nicht vorhanden
Halbgeschlossen	Vorhanden	Teilweise
Geschlossen	Vorhanden	Teilweise

Die zur Verfügung stehende Technik war in den Anfangsjahren der Anästhesie sehr simpel. Die damals verwendete Schimmelbuschmaske ist ein Beispiel für ein offenes Narkosegerät. Es handelt sich um eine Konstruktion aus einem Drahtkäfig, über den eine Stofflage gespannt wird. Diese stellte man über Mund und Nase des Patienten, die Stofflage wurde dann mit Äther oder Chloroform getränkt. Durch eine Rinne am Rand der Metallkonstruktion wurde verhindert, dass überschüssige Flüssigkeit mit der Haut des Patienten in Berührung kam. Dieses Verfahren war zwar einfach in der Anwendung, hatte aber eine Reihe von gravierenden Nachteilen. Diese Art der Narkoseführung setzte eine erhaltene Spontanatmung des Patienten voraus. Eine genaue Dosierung und Konzentrationsbestimmung der Anästhetika war nicht möglich, die Rate an Zwischenfällen und tödlichen Komplikationen dementsprechend hoch. Ökonomisch betrachtet wurden aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Rückgewinnung von Expirationsluft hohe Mengen an Anästhetika benötigt, die dann - bedingt durch nicht vorhandene Absaugmöglichkeiten - zusätzlich das umstehende Personal belasteten. Ebenfalls war es nicht möglich, das Atemgasgemisch anzuwärmen oder zu befeuchten.

Im Zuge der technischen Weiterentwicklung wurden zunächst halboffene Systeme verwendet. Charakteristisch hierfür ist die patientennahe Trennung von In- und Expirationsluft. Das Inspirationsgemisch wird in einem Reservoir gesammelt und kann durch Komprimieren desselben zur Beatmung des Patienten genutzt werden. Die ersten Systeme waren ventillfrei und benötigten daher hohe Frischgasflüsse in Richtung Reservoir, um einen Rückfluss der Expirationsluft in das Reservoir zu verhindern. Ein klassischer Vertreter dieser Geräte ist das sogenannte Kuhn-System. Neuere Systeme arbeiten mit Ventilen, die einen Rückfluss der Expirationsluft in Richtung Reservoir verhindern. Als Beispiel hierfür ist der klassische Beatmungsbeutel aufzuführen. Vorteilhaft sind hierbei die einfache technische Handhabung sowie die Möglichkeit der kontrollierten Beatmung des Patienten. Die ökonomischen und ökologischen Nachteile entsprechen weitgehend denen der offenen Systeme. Abgesehen von den bereits erwähnten Beatmungsbeuteln finden diese Systeme heute in der operativen Anästhesiologie keine Anwendung mehr.

Die Entwicklung von halbgeschlossenen Systemen war erst mit der Möglichkeit realisierbar, Kohlendioxid (CO_2) in der Ausatemluft mittels Kohlendioxidabsorber zu eliminieren. Die Expirationsluft wird auf diese Art gefiltert und dann in ein Kreissystem geleitet. Mithilfe von unidirektionalen Ventilen zirkuliert das Narkosegas in diesem Kreislauf in vorgegebener Richtung. Durch das Kreissystem ist es möglich Frischgasflüsse zu verwenden, die erheblich unterhalb des Atemminutenvolumens (AMV) des Patienten liegen. In Abhängigkeit vom zugeführten Frischgasvolumen spricht man von einer Low-Flow-Anästhesie bei einem Frischgasfluss von bis zu 1 Liter pro Minute (Foldes et al. 1952). Eine Minimal-Flow-Anästhesie kennzeichnet sich durch einen Fluss von bis zu 0,5 Liter Frischgas pro Minute (Virtue 1974). Aufgrund des geringeren Frischgasflusses ergibt sich ein erhebliches Einsparpotential, konsekutiv auch in Bezug auf das zugeführte volatile Anästhetikum (Bach et al. 1997). Bei entsprechend niedrigem Frischgasvolumen steht hierbei zunehmend angewärmte und angefeuchtete Atemluft zur Verfügung. Das im Expirationsschenkel überschüssige Gas wird aus dem Kreissystem in ein Absaugsystem geleitet. Hierdurch wird die Narkosegasbelastung am Arbeitsplatz so gering wie möglich gehalten. Nach diesem Prinzip arbeiten viele der heutzutage verwendeten Narkosemaschinen.

In einem geschlossenen System wird die gesamte Expirationsluft von Kohlendioxid gereinigt und dem Patienten erneut zugeführt. Lediglich die metabolisierte Menge an Sauerstoff und volatilem Anästhetikum muss dem Kreissystem zusätzlich zugeführt werden. Zur Aufrechterhaltung einer zuverlässigen Funktion dürfen jedoch keinerlei Leckagen vorhanden sein. Das einzige zurzeit am Markt erhältliche Narkosegerät, das über einen geschlossenen Modus verfügt, ist der Zeus[®] Infinity Empowered[®] (Zeus[®] IE[®]) (Drägerwerke AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland). Die Vorgängerversion Zeus[®] wurde bereits 2002 am Markt eingeführt (De Cooman et al. 2014).

1.2.3 Niedrigflussnarkose

Ökonomische Vorteile ergeben sich durch den im Vergleich zu High-Flow-Anästhesien geringeren Gasfluss und die daraus resultierenden

Einsparungen von den verwendeten Gasen. Neben ökonomischen Vorteilen sind jedoch auch ökologische Aspekte relevant. Die ökologischen Eigenschaften des in dieser Studie verwendeten Anästhetikums Sevofluran werden unter Punkt 1.2.4 betrachtet.

Klinische Vorteile im Rahmen einer Niedrigflussnarkose ergeben sich u. a. durch die bessere Atemgasklimatisierung. Durch die Anwendung eines Endotrachealtubus oder einer Larynxmaske wird der obere Respirationstrakt umgangen, wodurch dessen physiologische Funktionen des Erwärmens und Anfeuchtens der Inspirationsluft entfallen. Hierdurch wurden Veränderungen am Atemwegsepithel mit in der Folge auftretendem Sekretverhalt oder bronchialer Obstruktion beschrieben (Kleemann 1994; Hönemann et al. 2013). Durch die Atemgasklimatisierung wird dieser negative Effekt gemindert. Technisch problematisch sind bei Niedrigflussnarkosen jedoch bereits geringe Leckagen im Gaskreislauf die z. B. bei operativen Eingriffen an der Lunge oder der Verwendung von Doppellumentuben entstehen. Bei der Anwendung von volatilen Anästhetika kommt es bei Leckagen auch zu einer Belastung der Umgebungsluft durch das austretende Narkosegas. Kontraindiziert ist die Anwendung von Niedrigflussnarkosen, wenn eine Beatmung zur Eliminierung von Gasen, z. B. nach einem Tauchunfall oder bei einer Intoxikation mit Kohlenmonoxid, erforderlich ist. Im Fall einer auftretenden intraoperativen malignen Hyperthermie ist neben dem Tausch des Kohlendioxidabsorbers ebenfalls ein hoher Frischgasfluss indiziert, um eine schnellstmögliche Elimination der Triggersubstanz zu erreichen (Glahn et al. 2010).

1.2.4 Inhalationsanästhetikum Sevofluran

Chemisch betrachtet ist Sevofluran (Abbildung 2) ein mit sieben (Sevo) Fluor-Atomen „-fluran“ halogenierter Methylether, der in den siebziger Jahren unabhängig voneinander von Ross Terrell sowie von Bernard Regan synthetisiert wurde (Wallin et al. 1975; Burns und Eger 2011). Die Zulassung von Sevofluran als Narkosegas erfolgte in Deutschland 1995. In der Universitätsmedizin Göttingen wird Sevofluran zur Durchführung von Inhalationsnarkosen verwendet (Sevorane[®], Abbvie GmbH & Co. KG, Wiesbaden, Deutschland). Die Substanz weist eine geringe Blutlöslichkeit

auf. Der Blut/Gas-Verteilungskoeffizient ist mit 0,7 entsprechend niedrig, wodurch sich die gute Steuerbarkeit erklären lässt. Weitere wesentliche Merkmale der farblosen, nicht brennbaren Flüssigkeit sind die Möglichkeit zur inhalativen Narkoseeinleitung aufgrund der fehlenden Atemwegsreizung. Aus diesem Grund wird Sevofluran häufig in der Kinderanästhesie eingesetzt (Doi und Ikeda 1993; Behne et al. 1999). Vorteilhaft ist auch, dass sich unter der Anwendung nur eine geringe Depression des Herz-Kreislaufsystems beobachten lässt. Hierdurch gilt es als das Inhalationsanästhetikum, welches die wenigsten kardiozirkulatorischen Probleme verursacht (Conzen und Hobbhahn 2008). In mehreren Studien wurden Sevofluran sogar kardio-protective Eigenschaften im Rahmen einer ischämischen Präkonditionierung zugeschrieben (De Hert et al. 2005; Van Allen et al. 2012). Zu den negativen Eigenschaften der Substanz zählt die Metabolisierungsrate von 3 bis 5%. Während der Biotransformation von Sevofluran entsteht als Abbauprodukt Compound A, dem in Tierversuchen an Ratten nephrotoxische Eigenschaften zugeschrieben wurden (Morio et al. 1992; Kharasch et al. 1997). In Studien am Menschen konnten ähnliche Auswirkungen auf die Niere jedoch nicht nachgewiesen werden (Bito et al. 1997; Eger et al. 1997). Sevofluran gehört zur Gruppe der halogenierten Kohlenwasserstoffe und begünstigt den Treibhauseffekt durch die Zerstörung der Ozonschicht. Der Effekt ist jedoch geringer ausgeprägt als bei anderen Inhalationsanästhetika wie z. B. Desfluran und Isofluran (Langbein et al. 1999; Ryan und Nielsen 2010; Gadani und Vyas 2011).

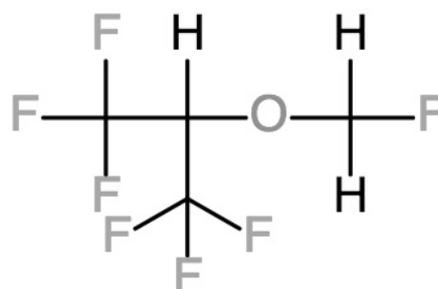


Abbildung 2: Strukturformel Sevofluran

1.3 Entwicklung der Studienidee

Eine Studie zur Verbrauchsermittlung von Narkosegasen wurde an der Universitätsmedizin Göttingen (UMG) bereits durchgeführt. Der Fokus lag

dabei jedoch auf dem Vergleich zwischen zielgesteuerter und manueller Narkosegassteuerung. Es wurde eine Narkosemaschine Dräger Zeus[®] der ersten Generation mit einem Dräger Primus[®] verglichen, welcher nicht über diese Funktion verfügt. Ziel der Fragestellung war, ob sich die höheren Wartungskosten des Zeus[®] durch einen geringeren Verbrauch an Narkosegasen amortisieren (Hinz et al. 2012). Bei diesem Zeus[®] handelte es sich um ein Gerät mit einer frühen Softwareversion, welche häufig Frischgasspülvorgänge durchführte und folglich einen hohen Verbrauch verursachte. De Cooman beschrieb, dass trotz vorhandener technischer Möglichkeit das eigentliche Ziel eines geschlossenen Systems durch diese Softwareversion nicht erreicht wurde (De Cooman et al. 2014). Sowohl Software als auch Hardware wurden im Laufe der Zeit kontinuierlich weiterentwickelt. Die aktuelle Studienidee entstand aufgrund der Tatsache, dass ein Nachfolgemodell der zuvor verwendeten Narkosemaschine Zeus[®] auf dem Markt erschien - der Zeus[®] IE[®]. Zudem verfügt die UMG auch über mehrere Narkosemaschinen der Firma General Electric (GE). Da beide Geräte über die Möglichkeit einer zielgesteuerten Narkoseführung verfügen, sollten nun beide direkt miteinander verglichen werden. Neben den ökonomischen Vorteilen, wie die Einsparungen der verbrauchten Gase spielen auch ökologische Aspekte, wie die Reduktion der Emission von halogenierten Kohlenwasserstoffen, eine zunehmende Rolle. Zudem kommt es durch die automatische Steuerung der Narkosegaskonzentration zu erheblich weniger Interaktionen zwischen Anästhesist und Narkosemaschine. Insbesondere in kritischen Situationen wird eine Unterdosierung mit der Gefahr von unerwünschten Wachzuständen während Narkosen bzw. eine Überdosierung mit der Gefahr der Kreislaufdepression zuverlässiger vermieden. Auf einem Symposium konnte Bauer 2014 aufzeigen, dass ohne zielgesteuerte Narkosegasdosierung im Median acht zusätzliche Interaktionen zwischen Anästhesist und Narkosemaschine erforderlich waren, um die gewünschte Sevoflurankonzentration in der Expirationsluft zu erreichen (Bauer 2014).

1.4 Vorteile der zielgesteuerten Anästhesie

Bei einer zielgesteuerten Narkose (*target-controlled anaesthesia*, TCA) führt die Narkosemaschine eine automatisierte Überwachung und kontinuierliche Anpassung der Konzentration von volatilem Anästhesiegas und Sauerstoff im Kreissystem durch. Die definierbaren Zielparameter sind bei der Narkosemaschine Aisys[®] die Konzentration von volatilem Anästhesiegas und Sauerstoff am Ende der Expiration (F_eO_2). Bei der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] wird die Sauerstoffkonzentration in der Inspirationsfraktion (F_iO_2), die Sevoflurankonzentration analog zum Aisys[®] am Ende der Expiration gewählt. Der hämodynamische oder metabolische Zustand des Patienten bleibt für diese Steuerung unberücksichtigt. In einer Vergleichsstudie mit der Narkosemaschine Zeus[®] wurde bereits 2009 aufgezeigt, dass durch die Verwendung von TCA der Verbrauch von Desfluran um 65% gesenkt werden konnte. Ebenso waren signifikant weniger Interaktionen zwischen Anästhesist und Narkosemaschine erforderlich, um die gewünschte Konzentration an Narkosegas sowie Sauerstoff zu erreichen. Dies bietet insbesondere in kritischen Situationen erhebliche Vorteile für die Patientensicherheit (Lortat-Jacob et al. 2009; Bauer 2014).

1.5 Fragestellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Wie unterscheidet sich der Verbrauch der Narkosemaschinen Aisys[®] und Zeus[®] IE[®] in Bezug auf die Gase Sauerstoff, medizinische Druckluft und Sevofluran sowie Strom?
2. Wie hoch sind die Gesamtbetriebskosten der beiden Narkosemaschinen im Vergleich?

2 Material und Methoden

Die laufenden Betriebskosten wurden aufgrund der unterschiedlichen Antriebsweisen beider Geräte mittels einer prospektiven Studie an 104 Patienten errechnet. Hierzu wurden über einen Zeitraum von insgesamt 299 Stunden die Verbräuche der sogenannten medizinischen Gase Sauerstoff und medizinische Druckluft sowie des volatilen Anästhetikums Sevofluran während Narkosen ermittelt. Zur Ermittlung der Anschaffungs- und Wartungskosten der beiden Narkosemaschinen wurden Gespräche und Analysen mit den Herstellern der beiden Narkosemaschinen sowie mit der Abteilung Medizintechnischer Service an der Universitätsmedizin Göttingen geführt.

2.1 Patientenrekrutierung und Randomisierung

Das Studienprotokoll mit der Antragsnummer 31/6/12An wurde durch die zuständige örtliche Ethikkommission am 21.06.2012 genehmigt. Es ist beim Deutschen Register klinischer Studien unter der Nummer DRKS00004754 registriert. Gemäß Genehmigung der Ethikkommission handelte es sich um kein aufklärungspflichtiges Forschungsvorhaben.

Folgende Einschlusskriterien wurden für die Studienteilnahme festgelegt:

- Geplante OP-Dauer über 60 Minuten
- Patientenalter 14 – 99 Jahre
- Risikogruppe gem. American Society of Anesthesiologists (ASA) I bis III
- Geplante balancierte Anästhesie mit Sevofluran

Folgende Ausschlusskriterien wurden für die Studienteilnahme festgelegt:

- Tatsächliche OP-Zeit unter 60 Minuten
- Schwangerschaft, Stillzeit
- Risikoscore gem. Tabelle 3 nach Apfel größer 2 Punkte (Apfel et al. 1999)
- Positive Eigen- oder Familienanamnese bezüglich neuromuskulärer Erkrankungen
- Geplante Ein-Lungen-Ventilation

Tabelle 3: Apfel-Score

Risikofaktor	Punkte
Weibliches Geschlecht	1
Positive Anamnese auf PONV oder Reisekrankheit	1
Nichtraucher	1
Vermuteter postoperativer Bedarf an Opioiden	1
Summe	0 – 4

In der Vorbereitungsphase der Studie kam es zu einigen Problemen mit den T-Adaptoren an den Druckgasflaschen, was in mehreren Fällen zu einer Leckage führte. Aufgrund von notwendigen Ersatzlieferungen wurde der Studienbeginn verzögert. In dieser Zeit wurden jedoch weitere Testmessungen durchgeführt und unerwartete Fehlerquellen eliminiert. So zeigte sich in den ersten Messungen, dass die üblichen 10-Liter-Druckgasflaschen mit medizinischer Druckluft nicht ausreichend dimensioniert für die Verwendung an der Narkosemaschine Aisys[®] waren. Der Verbrauch lag in Abhängigkeit von der Narkosedauer über 2000 Liter medizinischer Druckluft. Aus diesem Grund wurden extra 50-Liter-Flaschen bestellt und es musste eine spezielle Transporteinrichtung für diese Flaschen beschafft werden. Für die Studie wurden Untersuchungen während Narkosen bei 107 Patienten durchgeführt, hiervon konnten 104 Patienten eingeschlossen werden. Während der laufenden Studie kam es lediglich zu drei Studienausschlüssen. In einem Fall wurde der Narkosegasverdampfer während einer laufenden

Messung durch einen Mitarbeiter der Anästhesiepflege nachgefüllt, wodurch eine Verbrauchsbestimmung nicht mehr möglich war. In den anderen beiden Fällen erfolgte der Abbruch der Studie aufgrund einer potentiell lebensbedrohlichen Blutung intraoperativ. Die Randomisierung der verwendeten Narkosemaschinen erfolgte im Vorfeld tagesabhängig per Zufallsgenerator. Da jede Narkosemaschine vor der täglichen Inbetriebnahme ausführlichen Tests gemäß der Bedienungsanleitung unterzogen werden muss, war es aus Gründen der zeitlichen Prozesssicherheit nicht möglich während eines Tages die Narkosemaschinen zu wechseln. Bei den Patienten der Zeusgruppe wurde für die Durchführung der Narkose die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] (Drägerwerke AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland) verwendet. Bei den Patienten der Aisysgruppe wurde für die Durchführung der Narkose die Narkosemaschine Aisys[®] (GE Healthcare, Chalfont St Giles, Großbritannien) verwendet.

2.2 Der Bereich Allgemeinchirurgie

In der UMG wird durch die Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Kinderchirurgie (Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. M. Ghadimi) ein umfangreiches operatives Spektrum angeboten. Der Bereich der Allgemeinchirurgie wurde für diese Studie ausgewählt, da viele der Patienten und der operativen Eingriffe die unter Punkt 2.1 beschriebenen Ein- und Ausschlusskriterien erfüllen. Von besonderem Vorteil ist der ausschließliche Einsatz eines Endotrachealtubus zur Atemwegsicherung. Ein möglicher Unterschied in Bezug auf Leckagen bei verschiedenen Atemwegshilfen konnte somit ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden Eingriffe im Bereich des Ösophagus von der Studie ausgenommen. Aufgrund der dort temporär erforderlichen Ein-Lungenventilation kommt es bei den bronchoskopischen Lagekontrollen über den für diese Beatmung erforderlichen Doppellumentubus zwangsläufig zu Leckagen.

2.3 Die Narkosemaschinen

2.3.1 Aisys[®] - GE Healthcare

Die Narkosemaschine Aisys[®] (Abbildung 3) verfügt über die Möglichkeit, sowohl die gewünschte endtidale Konzentration von volatilen Anästhetika als auch die avisierte expiratorische Sauerstoffkonzentration (F_{eO_2}) automatisch zu steuern. Als endtidal wird die höchste gemessene Konzentration eines Gases in der Expirationsphase bezeichnet. In diesem von GE Healthcare Endtidal-Control (Et-Ctrl) genannten Modus steuert Aisys[®] die Zufuhr von Sauerstoff, medizinischer Druckluft und volatilem Anästhetikum in das Kreisteil vollautomatisch, um die vom Anwender gewählten Einstellungen zu erreichen. Trotz automatischer Steuerung beträgt der minimal mögliche Frischgasfluss dabei 500 ml pro Minute. Es handelt sich somit um ein halbgeschlossenes System. Hierdurch entsteht fortwährend überschüssiges Gas im Kreissystem, welches über die Narkosegasabsaugung abgeleitet wird. Aufgrund der pneumatischen Funktionsweise des Aisys[®] („Bag in bottle“) wird für den Betrieb neben elektrischem Strom auch zusätzlich ein Antriebsgas benötigt. Bei dieser Antriebsform wird zur Inspiration ein in einer druckfesten Kammer befindlicher Balg durch in die Kammer einströmendes Antriebsgas ausgedrückt. Hierzu wird medizinische Druckluft verwendet. Geräte dieses Typs wurden durch die Universitätsmedizin Göttingen erworben und befinden sich auch aktuell noch in Verwendung (Stand: Mai 2019).



Abbildung 3: Narkosemaschine Aisys[®] (mit freundlicher Genehmigung von GE Healthcare)

2.3.2 Zeus[®] Infinity Empowered[®] – Drägerwerke AG & Co. KGaA

Die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] (Abbildung 4) verfügt ebenfalls über die Möglichkeit, die endtidale Konzentration von volatilen Anästhetika sowie die Sauerstoffkonzentration automatisch zu steuern. Im Gegensatz zum Aisys[®] definiert der Anwender beim Zeus[®] IE[®] aber die inspiratorische Sauerstoffkonzentration (F_iO_2). In diesem von Dräger „AutoDosierung“ genannten Modus schaltet der Zeus[®] IE[®] von einem halbgeschlossenen auf einen geschlossenen Modus um, sobald ein stabiles Niveau der gewünschten Gaskonzentrationen erreicht ist. Dadurch ist temporär ein Betrieb ohne Frischgasfluss möglich. Bei Verwendung von höheren Gasflüssen wird das überschüssige Gas durch die Narkosegasabsaugung fortgeleitet. Für den Antrieb wird ausschließlich Strom genutzt. Das Gerät erzeugt den inspiratorischen Gasfluss über eine elektrisch angetriebene Turbine, den sogenannten Blower (Abbildung 5). Der Antrieb wird vom Hersteller „TurboVent“ genannt und ist eine Eigenentwicklung von Dräger. Eine weitere Besonderheit stellt der Narkosegasverdampfer dar, welcher im Gegensatz zu konventionellen Narkosegasverdampfern ein nicht abhängiger Teil des Kreissystems ist. Das Narkosegas wird durch das DIVA[®]-Modul (*direct injection of volatile agents*) in das Kreissystem injiziert. Hierdurch ist die Zufuhr von Narkosegas unabhängig vom gewählten Frischgasfluss möglich. Für die Durchführung dieser Studie wurde die Narkosemaschine sowie zwei Druckminderer für die Dauer der Untersuchungen kostenfrei durch den Hersteller zur Verfügung gestellt.



Abbildung 4: Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] (mit freundlicher Genehmigung von Dräger)



Abbildung 5: Turbine aus einem Zeus® IE® im Größenvergleich mit einer 2 Euro Münze (Quelle: Eigene Aufnahme)

2.4 Einstellungen der Narkosemaschinen

2.4.1 Minimale alveoläre Konzentration von Sevofluran

Der Begriff minimale alveoläre Konzentration (MAC) definiert die alveoläre Konzentration eines volatilen Anästhetikums, bei der 50% der Patienten nicht mehr mit zielgerichteter Abwehr auf einen bestimmten Schmerzreiz, z. B. einen Hautschnitt, reagieren (Eger et al. 1965). Neben diesem beschriebenen MAC-Incision₅₀-Wert werden in der Literatur noch weitere MAC-Werte differenziert. Neben der MAC-Incision₉₅, bei der 95 Prozent der Probanden nicht mehr auf den Schmerzreiz reagieren, verwenden Conzen und Hobbahn den Begriff MAC-BAR (BAR = *blockade of adrenergic response*). Dieser ist definiert als MAC-Wert, bei dem fast keine (<15%) kardiovaskulären Reaktionen, wie z. B. der Anstieg des arteriellen Blutdruckes oder der Herzfrequenz nachweisbar sind (Conzen und Hobbahn 2008). Aufgrund der Tatsache, dass der Zustand der Empfindungslosigkeit während einer Narkose jedoch mit mehreren Substanzen erreicht wird (balancierte Anästhesie) und die Analgesie im Wesentlichen durch die Supplementierung mit einem Opiat entsteht, findet die klassische Definition der MAC-Incision₅₀ weitverbreitete Verwendung. Dieser ist bei dem abstrakten Wert von 1,0 MAC erreicht. In Studien wurde die entsprechende Konzentration von Sevofluran, die erforderlich ist um einen MAC von 1,0 zu erreichen, bestimmt. Sie ist bei Säuglingen am

höchsten und nimmt zum Senium hin ab. 1987 beschrieben Katoh und Ikeda eine Konzentration von 2,05 Volumenprozent Sevofluran in einem Atemgasgemisch ohne Lachgas bei Patienten im Alter von 40 Jahren um 1,0 MAC zu erreichen (Katoh und Ikeda 1987). In einer späteren Metaanalyse beschrieb Mapleson 1996 die Hypothese einer linearen Funktion der MAC-Werte, ausgehend von der erforderlichen Konzentration im Alter von 40 Jahren (Mapleson 1996). Bezug nehmend auf die auch in der Fachinformation von Sevofluran angegebenen Konzentration von 2,05 Volumenprozent in einem Alter von 40 Jahren wurde für diese Studie eine Tabelle erstellt, die unter Berücksichtigung der linearen Funktion von Mapleson die altersentsprechende Konzentration von Sevofluran angibt. Diese Tabelle ist im Anhang unter 6.2 aufgeführt.

2.4.2 Beatmungseinstellungen

Da zur invasiven Atemwegssicherung mittels Endotrachealtubus sowie während der Durchführung von Operationen im Bereich der Allgemeinchirurgie häufig eine neuromuskuläre Blockade (pharmakologische Muskelrelaxation) erforderlich ist, werden kontrollierte Beatmungsformen verwendet. Die hierfür gebräuchlichen Beatmungsmodi sind entweder volumen- oder druckkontrolliert. Bei der volumenkontrollierten Beatmung werden das Atemzugvolumen sowie die Atemfrequenz am Respirator eingestellt. Bei dieser Beatmungsform gibt die Narkosemaschine das gewählte Volumen unabhängig von dem dafür erforderlichen Beatmungsdruck ab. Als Sicherheitsgrenze wird vom Anwender der maximale obere Beatmungsdruck gewählt. Ein Erreichen dieser Grenze führt zu einem Abbruch der Inspiration. Bei der druckkontrollierten Beatmung wird neben der Atemfrequenz der Beatmungsdruck eingestellt, aus dem in Abhängigkeit von Resistance (Widerstand) und Compliance (Dehnbarkeit) der Lunge das Atemzugvolumen resultiert. Ergeben sich intraoperativ Änderungen von Resistance und Compliance führt dies zwangsläufig zu einer Änderung des Atemzugvolumens. Daher ist bei dieser Beatmungsform eine engmaschige Überwachung des Atemzugvolumens erforderlich.

2008 zeigte Cadi an 36 Patienten, die sich bariatrischen Eingriffen unterzogen, dass die Anwendung von druckkontrollierter Beatmung zu

signifikant geringeren Beatmungsdrücken bei verbesserter Oxygenierung führte (Cadi et al. 2008). Eine im selben Jahr erschienene Publikation von de Baerdemaeker, ebenfalls durchgeführt im Bereich der bariatrischen Chirurgie, zeigte bei einer Fallzahl von 24 Patienten in Bezug auf verbesserte Oxygenierung keine signifikanten Unterschiede (De Baerdemaeker et al. 2008). Die Vergleichbarkeit der Studien ist unter anderem aufgrund der uneinheitlich verwendeten Tidalvolumina pro Kilogramm (kg) Körpergewicht (KG) allerdings eingeschränkt. In der hier durchgeführten Studie wurde ein Beatmungsmodus gewählt, der nur in neueren Narkosemaschinen vorhanden ist. Dieser bietet die Möglichkeit, einen druckkontrollierten und zugleich volumendefinierten Beatmungsmodus zu wählen. Die Nomenklatur dieses Beatmungsmodus lautet beim Aisys[®] „Pressure controlled ventilation - Volume guaranteed“ (PCV-VG) sowie beim Zeus[®] IE[®] „AutoFlow“. Die Narkosemaschine überwacht hierbei während der Inspiration kontinuierlich den zum Erreichen des eingestellten Volumens erforderlichen Beatmungsdruck und justiert diesen fortwährend nach um das gewählte Tidalvolumen zu erreichen. Unter Einsatz dieses Beatmungsmodus konnte Dion in einer prospektiven Studie an 20 Patienten - ebenfalls im Bereich der bariatrischen Chirurgie - positive Effekte in Bezug auf die Oxygenierung und die Reduktion des erforderlichen oberen Spitzendrucks zeigen (Dion et al. 2014).

Im Rahmen dieser Studie erfolgte die Einstellung des Tidalvolumens mit 6 ml pro Kilogramm (kg) Körpergewicht (KG) lungenprotektiv gemäß aktueller Studienlage. Bereits 1998 wurden die positiven Effekte eines geringeren Tidalvolumens in Bezug auf die Morbidität beschrieben (Amato et al. 1998). Allerdings wurden diese Daten bei intensivmedizinischen Patienten erhoben, die bereits an einem *acute respiratory distress syndrome* (ARDS) litten. Als Körpergewicht wurde für diese Untersuchung das ideale Körpergewicht (*ideal body weight*, IBW) zugrunde gelegt. Zur Errechnung des IBW wurde die Formel des ARDS-Networks vom Jahr 2000 zugrunde gelegt (Brower et al. 2000).

$$\text{IBW (kg) Frau} = 45,5 + 0,91 \times (\text{Körpergröße (cm)} - 152,4)$$

$$\text{IBW (kg) Mann} = 50 + 0,91 \times (\text{Körpergröße (cm)} - 152,4)$$

Das Produkt aus Tidalvolumen pro kg KG und IBW ergibt das individuelle Atemzugvolumen. Eine tabellarische Übersicht findet sich im Anhang unter 6.2. Eine Übersichtsarbeit zum Thema „intraoperatives Tidalvolumen“ aus dem Jahr 2009 wertet die vorangegangenen Studien verschiedener Autoren aus und kommt zu dem Ergebnis, dass die Daten auch perioperativ „für die konsequente Anwendung einer lungenprotektiven Beatmungsstrategie mit reduzierten Tidalvolumina unter Berücksichtigung des idealisierten Körpergewichtes“ sprechen (Kuestermann et al. 2009, S. 409).

2.5 Narkoseverfahren

2.5.1 Narkoseinduktion

Die Narkoseinduktion wurde entsprechend der für den Bereich Allgemeinchirurgie gültigen *standard operating procedure* (SOP) durchgeführt. Abhängig von der Art des Eingriffs wurde initial ggf. ein Periduralkatheter etabliert. Vor der Narkoseinduktion erfolgte für einen Zeitraum von drei Minuten die Präoxygenierung über eine dicht abschließende Gesichtsmaske mit 100% Sauerstoff. Als Opiate wurden entweder Sufentanil (Sufenta[®], Janssen-Cilag GmbH, Neuss, Deutschland) oder Remifentanil (Ultiva[®], GlaxoSmithKline GmbH & Co. KG, München, Deutschland), als Hypnotikum Propofol (Propofol-Lipuro[®], B. Braun AG, Melsungen, Deutschland) sowie als Muskelrelaxans Rocuronium (Esmeron[®], MSD Sharp & Dohme GmbH, München, Deutschland) verwendet. Als Anästhesiearbeitsplatz wird in den Einleitungsräumen ein fest installierter Fabius[®] Tiro (Drägerwerke AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland) genutzt, daher waren die Gasverbräuche während dieser Zeit nicht Gegenstand dieser Studie. Während nachfolgender Maßnahmen, wie z. B. einer arteriellen Punktion oder der Anlage eines zentralen Venenkatheters (ZVK) wurde für die Aufrechterhaltung der Narkose weiterhin Propofol als Hypnotikum genutzt. Den ersten Kontakt mit volatilen Anästhetika zur Aufrechterhaltung der Narkose hatten die Patienten bei der Konnektion an die Narkosemaschine im Operationssaal. Abhängig von der Aufenthaltsdauer im Einleitungsraum wurde die inspiratorische Sauerstoffkonzentration nach Einleitung reduziert, jedoch analog dem Ablauf zur Präoxygenierung vor

Einfahrt in den Operationssaal für mindestens acht Atemzüge erneut auf eine F_iO_2 von 1,0 angehoben. Wurden Patienten präoperativ schon sediert und beatmet von einer Intensivstation übernommen, wurde das laufende Sedierungsregime bis zur Konnektion an das Narkosegerät nicht verändert. Vor der Lagerung auf den OP-Tisch wurde jedoch die F_iO_2 für mindestens acht Atemzüge ebenfalls auf 1,0 angehoben.

2.5.2 Narkoseführung

Nach Konnektion des Patienten wurden die Einstellungen des Respirators, wie unter Punkt 2.4.2 beschrieben, vorgenommen. Am Aisys[®] wurde eine F_eO_2 von 0,35 gewählt, am Zeus[®] IE[®] wurde eine F_iO_2 von 0,40 eingestellt. Die kontinuierliche Gabe von Propofol durch den Einleitungsperfusor wurde mit Beginn der Sevoflurangabe beendet. Die Atemfrequenz wurde während der Narkosedauer angepasst, um als endtidales CO_2 ($etCO_2$) normokapnische Bedingungen von 35-40 mmHg zu erreichen. Die Analgesie wurde bei vorhandenem Periduralkatheter gemäß SOP mit einer Mischung aus Ropivacain 0,375% (Naropin[®], AstraZeneca GmbH, Wedel, Deutschland) und Sufentanil 1 μ g/ml durchgeführt oder intravenös über eine repetitive Gabe von Sufentanil bzw. eine kontinuierliche Gabe von Remifentanil gesteuert. Falls erforderlich, wurde eine Aufrechterhaltung der neuromuskulären Blockade durch repetitive Gaben von Rocuronium sichergestellt. Die neuromuskuläre Blockade wurde durch das Gerät TOF-Watch[®] überwacht (Organon Ireland Ltd, a part of Schering-Plough Corporation, Dublin, Ireland). Die Volumentherapie bestand aus dem Kristalloid Sterofundin[®] 1/1E (Sterofundin[®] iso Ecoflac, B. BraunAG, Melsungen, Deutschland) sowie bei Bedarf dem Kolloid Gelafundin[®] 4% (Gelafundin[®] Ecoflac plus, B. Braun AG, Melsungen, Deutschland). Als Vasokonstriktor bei auftretenden Hypotensionen wurde Noradrenalin eingesetzt (Arterenol[®], Sanofi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt, Deutschland).

Das Prozedere bei Patienten, die bereits intubiert und beatmet von einer Intensivstation übernommen wurden, war bezogen auf die Narkoseführung identisch. Das laufende Sedierungsregime wurde mit dem Start der automatischen Narkosegassteuerung beendet.

2.5.3 Narkoseausleitung

In Abhängigkeit von der Komplexität des Eingriffs, der OP-Dauer sowie weiteren Faktoren, wie z. B. der Körpertemperatur und der aktuell erforderlichen Dosis von vasoaktiven Substanzen, wurde die Extubation des Patienten im OP-Saal angestrebt. Bei der Notwendigkeit der weiteren Versorgung auf einer Intensivstation wurde dagegen eine intubierte Verlegung durchgeführt. Im Fall einer geplanten Extubation wurden die TCA zu Beginn der Narkoseausleitung beendet. In Beobachtungen vor Studienbeginn hatte sich gezeigt, dass beide Geräte auf stark geänderte Konzentrationen von Sauerstoff oder Sevofluran mit zum Teil erheblichen Frischgasflüssen reagieren, um die gewünschte Konzentrationsänderung schnellstmöglich zu erreichen. Eine isolierte Steigerung der gewünschten Sauerstoffkonzentration führt neben dem höheren Sauerstofffluss zusätzlich zu einem erhöhten Verbrauch von Sevofluran, da die isolierte Einspülung von Sauerstoff sonst eine Verringerung der Sevoflurankonzentration bedingen würde. In einer Phase der gewünschten langsamen Reduktion des Narkosegases bei zeitgleich nur noch geringem chirurgischen Stimulus wie z. B. der Hautnaht ist dieses Verhalten als unwirtschaftlich anzusehen. Bei geplanter intubierter Verlegung auf die Intensivstation wurde drei Minuten vor Diskonnektion des Patienten von der Narkosemaschine eine erhöhte Sauerstoffkonzentration von 90% endtidal angestrebt. Aufgrund des hierdurch erhöhten Sauerstoffangebotes wird die Sicherheit beim Umlagern des Patienten vom OP-Tisch in das Patientenbett erhöht. Vor Transportbeginn auf die Intensivstation erfolgte die Konnektion des Patienten an ein Transportbeatmungsgerät.

2.6 Verbrauchsmessungen

Die hier verwendeten Narkosemaschinen haben die Option, dass der Anwender die kumulativen Verbräuche von Sauerstoff, medizinischer Druckluft sowie volatilem Anästhetikum während einer laufenden Narkose auf dem Gerätedisplay abrufen kann. Die Narkosemaschine Aisys® berücksichtigt bei dieser Anzeige jedoch nicht den Anteil an medizinischer Druckluft, der zum Antrieb erforderlich ist. Die Ermittlung der realen Verbräuche erfolgte daher messtechnisch.

2.6.1 Ermittlung des tatsächlichen Verbrauches von Sevofluran

Vor der Konnektion des Patienten sowie nach Diskonnektion wurden das Gewicht des Sevofluranverdampfers mit einer Präzisionswaage vom Typ Sartorius (Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) ermittelt. Während der Dauer der Narkose ist der Verdampfer ein Teil des Gaskreislaufes, was eine Gewichtsbestimmung auf einer Waage in diesem Zeitraum aus Gründen der Patientensicherheit unmöglich macht. Zur Berechnung des tatsächlichen Verbrauches in ml Narkosegas wurde das spezifische Gewicht von Sevofluran mit 1,53 g/ml gemäß Fachinformation berücksichtigt.

2.6.2 Ermittlung der tatsächlichen Verbräuche der übrigen Gase

Die Bestimmung der Verbräuche von Sauerstoff sowie medizinischer Druckluft erfolgte durch Verwendung von Druckgasflaschen (Linde Gas Therapeutics, Unterschleißheim, Deutschland). Über einen T-Adapter (HTD, Frankenberg, Deutschland) an der Druckgasflasche wurde an einem Schenkel ein Druckminderer vom Typ Silverline (Drägerwerke AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland) zur Konnektion der Narkosemaschine angeschlossen. Am anderen Schenkel wurde ein digitales Präzisionsmanometer des Typs Keller LEO1 (Keller AG, Winterthur, Schweiz) installiert (Abbildung 6). Die Druckminderer zeichnen sich durch eine Genauigkeit kleiner $\pm 0,1\%$ bei einer Auflösung von 100 mbar aus. Somit konnten die Flaschendrucke der verwendeten Druckgasflaschen jederzeit erfasst werden.



Abbildung 6: Druckminderer LEO1 mit unten angebrachtem T-Adapter (Quelle: Eigene Aufnahme)

2.6.3 Ablauf der Verbrauchsmessungen

Wie bereits erörtert, waren die Gasverbräuche während der Narkoseinduktion im Einleitungsraum nicht Gegenstand dieser Studie. Vor Konnektion des Patienten an die Narkosemaschine im Operationssaal wurde das Gewicht des Narkosegasverdampfers sowie die aktuellen Drücke der Gasflaschen erfasst. Während der laufenden Narkose wurden im Abstand von 30 Minuten die nachfolgenden Parameter durch Ablesen am Monitor des Anästhesiearbeitsplatzes erfasst. Der kumulative Verbrauch von Sauerstoff, medizinischer Druckluft und Sevofluran, das aktuelle Atemminutenvolumen (AMV), die inspiratorische und expiratorische O₂- und CO₂-Konzentration sowie die endtidale Sevoflurankonzentration. An den Manometern der Gasflaschen wurden die zu diesem Zeitpunkt aktuellen Drücke der Druckgasflaschen abgelesen. Die beschriebenen Messungen wurden zusätzlich vor dem Beginn der Narkoseausleitung wiederholt. Nach finaler Diskonnektion des Patienten vom Anästhesiearbeitsplatz wurden die oben angegebenen Parameter wiederum erfasst und nun auch der Narkosegasverdampfer gewogen. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht über den Studienaufbau mit der Narkosemaschine Aisys[®] während einer laufenden Narkose. Rechts im Bild ist die 50-l-Druckgasflasche, links davon ist die kleinere 10-l-Druckgasflasche sichtbar. Zentral auf der Abbildung sind die Präzisionswaage sowie das Studienprotokoll zu erkennen.



Abbildung 7: Narkosemaschine Aisys[®] mit 50-l- bzw. 10-l-Druckgasflasche (Quelle: Eigene Aufnahme)

2.7 Kostenermittlung

2.7.1 Kostenermittlung Sevofluran

Das in dieser Studie verwendete Narkosegas Sevofluran kostet 129,06 Euro pro 250 ml. Der Preis wurde einer internen Kostenaufstellung für Medikamente entnommen (Quelle: Webseite Klinik für Anästhesiologie, abgerufen am 09.10.2018). Der offizielle Listenpreis liegt bei 1141,28 Euro für 6 Flaschen mit jeweils 250 ml. Umgerechnet ergibt dies einen deutlich höheren Flaschenpreis von 190,21 Euro (Quelle: Webseite www.rote-liste.de, abgerufen am 09.10.2018).

2.7.2 Kostenermittlung Sauerstoff

Sauerstoff wird in der Universitätsmedizin Göttingen aus einem zentralen Speicher über ein Rohrleitungssystem in die einzelnen Bereiche verteilt. Die Anlieferung erfolgt im flüssigen Aggregatzustand (Abbildung 8). Neben den Kosten von 230 Euro (netto) für 1000 m³ Sauerstoff sind zusätzlich Aufwendungen für den Betrieb der Tankanlage zu berücksichtigen. Da die Tankanlage Eigentum des Sauerstofflieferanten Air Liquide (Air Liquide Deutschland GmbH, Düsseldorf, Deutschland) ist, sind die Kosten für Wartung und Service pauschal in der Tankmiete inkludiert (Quelle: Abteilung Einkaufsoperating). Hierfür ergibt sich ein Betrag von 3600 Euro (netto) pro Jahr. Der Sauerstoffverbrauch im Jahr 2014 betrug 332844 m³ (Tabelle 4). Unter Berücksichtigung der Tankmiete resultiert ein Betrag von brutto 0,29 Euro pro m³ (Tabelle 5).

Tabelle 4: Ausgangswerte der Preisberechnung pro m³ Sauerstoff

Preis pro 1000 m ³ Sauerstoff (netto)	230 Euro
Sauerstoffverbrauch im Jahr 2014 in m ³	332.844 Euro
Aufwendungen für Miete der Tankanlage (netto)	3600 Euro / Jahr

Tabelle 5: Berechnung der Sauerstoffkosten pro m³ Sauerstoff

332.844 m ³ x 0,23 Euro zzgl. 19% MwSt.	91.099 Euro
Verbrauch im Jahr 2014 x Preis pro m ³ x 1,19% MwSt.	Preis Gesamtverbrauch (brutto)
91.099,40 Euro + (3600 Euro zzgl. 19% MwSt.)	95.394 Euro
Preis Gesamtverbrauch (brutto) + Miete (brutto)	Gesamtkosten Sauerstoff (brutto)
95.394,40 Euro / 332.844 m ³	0,29 Euro
Gesamtkosten Sauerstoffbeschaffung / Verbrauch 2014	Kosten pro m ³ Sauerstoff 2014 (brutto)



Abbildung 8: Anlieferung Sauerstoff durch Firma Air Liquide
(Quelle: Eigene Aufnahme)

2.7.3 Kostenermittlung medizinische Druckluft

Die in der Universitätsmedizin Göttingen verwendete medizinische Druckluft wird analog zum Sauerstoff über ein Rohrleitungssystem in die einzelnen Bereiche verteilt. Im Unterschied zu Sauerstoff wird medizinische Druckluft jedoch nicht angeliefert, sondern durch einen eigenen Kompressor generiert und in Druckbehältern gespeichert. Es ist technisch nicht möglich, den Gesamtausstoß der Anlage an medizinischer Druckluft zu ermitteln. Entsprechend konnte folglich auch kein Preis pro m³ Druckluft errechnet

werden. Es wird daher - wie in bereits durchgeführten Studien - der Preis für Sauerstoff zu Grunde gelegt (Hinz et al. 2012). Für diese Studie beträgt der Preis für medizinische Druckluft somit 0,29 Euro pro m³.

2.7.4 Kostenermittlung elektrischer Strom

Die Belieferung mit elektrischer Energie erfolgt in den Einrichtungen der Universität Göttingen durch die Universitätsenergie Göttingen GmbH. Für den Bereich Universitätsmedizin wird die elektrische Energie in einem eigenen Blockheizkraftwerk erzeugt. Der Strompreis für das Jahr 2014 ist mit 0,18 Euro brutto pro Kilowattstunde (kWh) zu veranschlagen (Quelle: Universitätsenergie Göttingen GmbH).

2.7.5 Kostenermittlung Anschaffung der Geräte und Wartung

Die Anschaffungskosten für die verwendeten Anästhesiearbeitsplätze konnten leider nicht berücksichtigt werden. Es existiert zwar für beide Geräte ein firmeninterner weltweiter Listenverkaufspreis, dieser spiegelt aber nach Auskunft der zuständigen Firmenvertreter nicht den Anschaffungspreis in Deutschland wider. Die Preisgestaltung wird aufgrund diverser Faktoren individuell verhandelt. Keine der beiden Firmen war jedoch aus Gründen der Diskretion zu offiziellen Preisankündigungen bereit. Narkosemaschinen vom Typ Aisys[®] wurden zwar seitens der UMG angeschafft, auch hier konnte aber mit Rücksicht auf verhandelte Konditionen kein Preis mitgeteilt werden. Narkosemaschinen vom Typ Zeus[®] IE[®] wurden nicht von der UMG angeschafft - lediglich die Vorgängerversion. Dadurch konnte auch hier kein valider Anschaffungspreis ermittelt werden.

Im Bereich der Wartungskosten existieren bei beiden Herstellern sehr unterschiedliche Modelle an Wartungsverträgen. Die Spannweite reicht von der vom Hersteller geforderten Mindestwartung, der sogenannten sicherheitstechnischen Kontrolle (STK), bis hin zur vollständigen Übernahme aller Wartungs- und Servicemaßnahmen (Abbildung 9). Bis zu 35 verschiedene Wartungsverträge mit unterschiedlichem Umfang sind für den Zeus[®] IE[®] erhältlich. Ein ähnliches Portfolio wurde durch die Mitarbeiter von GE Healthcare vorgestellt. Eine weitere Sonderform in Bezug auf die Wartungsvereinbarung bietet GE Healthcare mit dem Konzept „One Self“ an.

Nach entsprechender Schulung des eigenen technischen Personals durch GE Healthcare werden sämtliche Wartungs- und Servicearbeiten auf das hausinterne Personal übertragen. Eine Onlineplattform, die neben technischen Dokumenten auch eine Chat- und Videounterstützung bietet, gibt im Bedarfsfall eine zusätzliche Unterstützung.

Die Preise für die verschiedenen Wartungsverträge sind neben der genuinen Serviceleistung abhängig von weiteren Faktoren, wie z. B. der lokalen Infrastruktur. Auch hier wird analog zu den Geräteanschaffungskosten individuell verhandelt. Beispiele für diese Faktoren sind unter anderem die Verfügbarkeit eines kostenfreien PKW-Parkplatzes für den Firmenmitarbeiter oder ob Assistenz durch hauseigenes Personal zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund dieser differierenden Konzepte war es nicht möglich, vergleichbare Wartungskosten für beide Narkosemaschinen zu ermitteln.

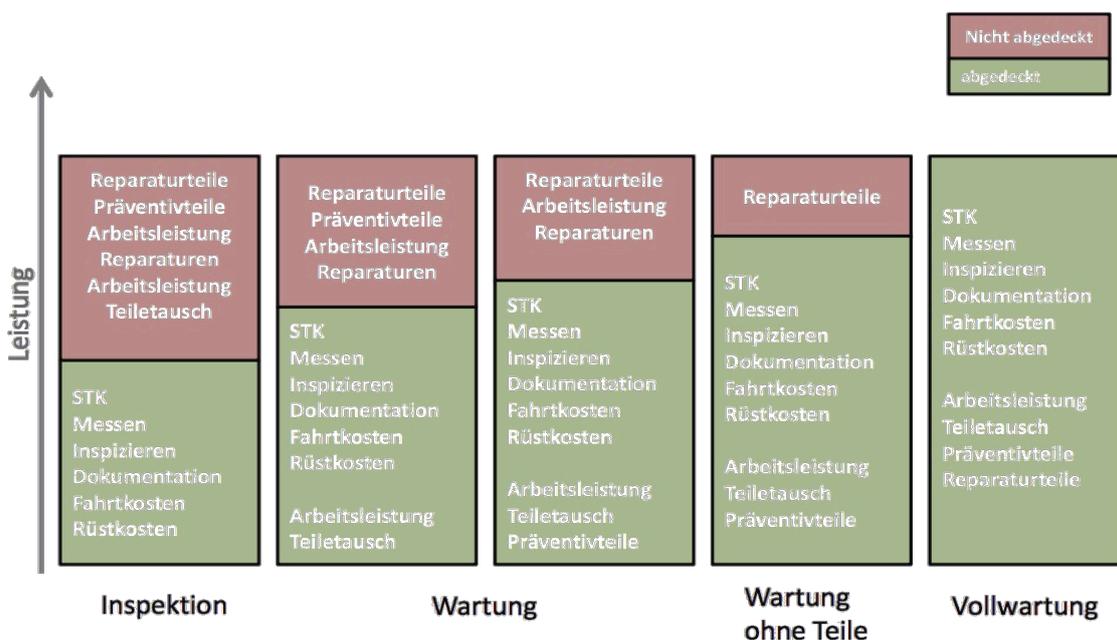


Abbildung 9: Übersicht über verschiedene Wartungsmodelle (mit freundlicher Genehmigung von J. Hinz)

2.8 Statistische Auswertung

Die statistische Testung wurde mit der Software STATISTICA für Windows (StatSoft Inc., Tulsa, Oklahoma, USA) Version 12.7 durchgeführt. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt als Mittelwert ± Standardabweichung

bzw. als Median und Interquartilsabstand. Ein p-Wert $< 0,05$ wurde als statistisch signifikant betrachtet. Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung getestet. Normalverteilte Daten wurden mittels Student's-t-Test untersucht. Lag keine Normalverteilung vor, wurden verbundene Daten mit einem Wilcoxon-matched-pair-Test getestet, unverbundene mit dem Mann-Whitney-U-Test. Kategoriale Daten wurden mit dem Chi-Quadrat-Test verglichen.

3 Ergebnisse

3.1 Patienten

3.1.1 Vergleich der biometrischen Daten

In Bezug auf Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Körpergröße und Body Mass Index (BMI) zeigten sich die biometrischen Daten vergleichbar und nicht signifikant unterschiedlich (Tabelle 6). In der Zeusgruppe befanden sich 32 männliche und 20 weibliche TeilnehmerInnen. Die Aisysgruppe beinhaltete 29 männliche sowie 23 weibliche TeilnehmerInnen. Somit bestand bei einem p-Wert von 0,55 keine Signifikanz. Die Patienten der Zeusgruppe waren 58 Jahre alt (Mittelwert), die Standardabweichung betrug 16 Jahre. Die Aisysgruppe zeigte in Bezug auf das Alter einen Mittelwert von 60 Jahren sowie eine Standardabweichung von 15 Jahren. Beim Vergleich der Patientenalter wurde mit einem p-Wert von 0,428 keine Signifikanz gefunden. Auch bei der Körpergröße fanden sich mit einem p-Wert von 0,315 keine signifikanten Unterschiede. Die Körpergröße der Patienten der Zeusgruppe ergab einen Mittelwert von 173 cm mit einer Standardabweichung von 10 cm. Innerhalb der Aisysgruppe zeigten sich annähernd ähnliche Werte, die Körpergröße wies einen Mittelwert von 171 cm und eine Standardabweichung von 10 cm auf. In der Zeusgruppe fand sich ein Gewicht von 86 kg (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von 22 kg. Das Gewicht der Patienten der Aisysgruppe betrug 81 kg (Mittelwert), bei einer Standardabweichung von 27 kg. Die hohe Standardabweichung lässt sich durch die im Bereich der Allgemeinchirurgie u. a. durchgeführten bariatrischen Eingriffe erklären. Im Vergleich der Gruppen fanden sich beim Körpergewicht bei einem p-Wert von 0,301 keine signifikanten Unterschiede. Hieraus resultiert innerhalb der Zeusgruppe ein BMI von $28,72 \text{ kg/m}^2$ (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von $7,63 \text{ kg/m}^2$, in der Aisysgruppe zeigte sich ein BMI von $27,47 \text{ kg/m}^2$ (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von $8,25 \text{ kg/m}^2$. Der p-Wert von 0,19 zeigte auch hier keine Signifikanz.

3.1.2 Vergleich der ASA-Klassifikationen

In Bezug auf die Verteilung der ASA-Klassifikationen zeigte sich bei einem p-Wert von 0,495 kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Gruppen (Tabelle 6). Die Aufteilung innerhalb der Zeusgruppe zeigte 4 Patienten (7,69%) in der Kategorie ASA I, 26 Patienten (50%) in der Kategorie ASA II sowie 22 Patienten in der Kategorie ASA III (42,31%). In der Aisysgruppe verteilten sich die Patienten folgendermaßen: 3 Patienten (5,77%) waren der Kategorie ASA I, 32 Patienten (61,54%) der Kategorie ASA II und 17 Patienten (32,69%) der Kategorie ASA III zugeordnet worden (Abbildung 10).

Tabelle 6: Vergleich der biometrischen Daten. Darstellung der Werte als Mittelwert und Standardabweichung (MW±SD) oder als Anzahl der Patienten

	Zeus (n=52)	Aisys (n=52)	p-Wert
Geschlecht (m/w)	32 / 20	29 / 23	0,55
Alter (Jahre)	58 ± 16	60 ± 15	0,428
Körpergröße (cm)	173 ± 10	171 ± 10	0,316
Körpergewicht (kg)	86 ± 22	81 ± 27	0,301
BMI (kg/m ²)	28,72 ± 7,63	27,47 ± 8,25	0,19
ASA I (n)	3	4	0,495
ASA II (n)	32	26	0,495
ASA III (n)	17	22	0,495

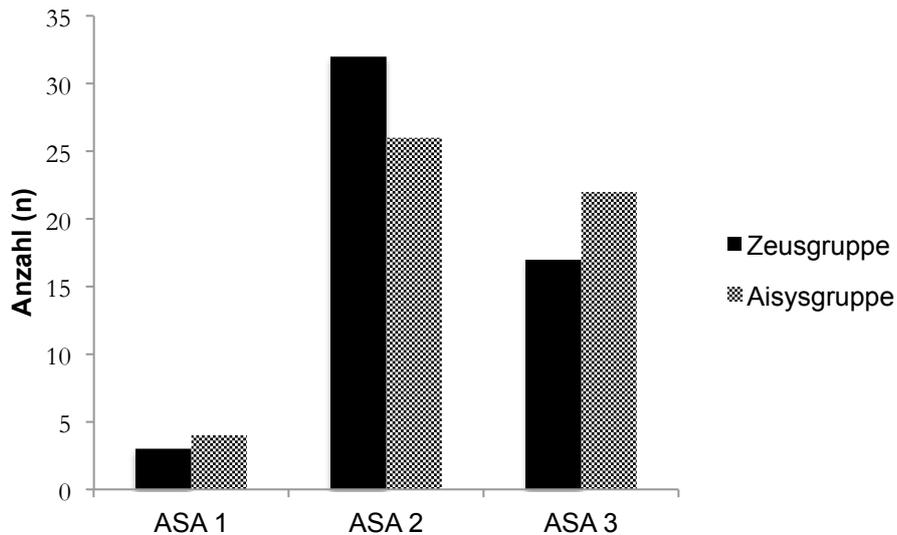


Abbildung 10: Aufteilung der Patienten in ASA-Klassen

3.2 Vergleich der Zeitintervalle

Die Gesamtkonnektionszeit des Patienten an die Narkosemaschine wurde in verschiedene Zeitintervalle eingeteilt und ausgewertet (Abbildung 11). Dies war erforderlich, da ein Teil der Patienten noch intubiert auf die Intensivstation verlegt wurde. Daher wurden folgende Zeiträume definiert: Zum einen die Dauer der Konnektion des Patienten an die Narkosemaschine bis zum Beginn der Narkoseausleitung (T1), der Beginn der Narkoseausleitung bis zur Diskonnektion des Patienten von der Narkosemaschine (T2) sowie die Summe beider Intervalle, was der Gesamtkonnektionszeit des Patienten an die Narkosemaschine entspricht (T3). Innerhalb der Zeusgruppe betrug die Konnektionszeit bis zum Beginn der Narkoseausleitung im Median 117 Minuten bei einem Interquartilsabstand von 91 Minuten. In der Aisysgruppe betrug diese Zeitspanne 143 Minuten (Median) bei einem Interquartilsabstand von 127 Minuten (p -Wert 0,257). Die zur Narkoseausleitung erforderliche Zeit lag in der Zeusgruppe bei 14 Minuten (Median) mit einem Interquartilsabstand von 13 Minuten. In der Aisysgruppe dauerte diese Phase 11 Minuten (Median), der Interquartilsabstand lag hier bei 9 Minuten. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied mit einem p -Wert von 0,022. Aus den oben genannten Daten ergibt sich eine Gesamtkonnektionszeit der Patienten in der Zeusgruppe von 129 Minuten (Median) mit einem Interquartilsabstand von 102 Minuten. In der

Aisysgruppe zeigte sich ein Median von 157 Minuten bei einem Interquartilsabstand von 125 Minuten (p-Wert 0,37). Somit ergab sich nur für den Zeitraum T2 ein signifikanter Unterschied (Tabelle 7).

Tabelle 7: Vergleich der Zeitintervalle in Minuten, Darstellung als Median / Interquartilsabstand

Zeitintervalle in Minuten	Zeusgruppe	Aisysgruppe	p-Wert
T1 Konnektion bis Beginn Ausleitung	117 / 91	143 / 127	0,257
T2 Beginn Ausleitung bis Diskonnektion	14 / 13	11 / 9	0,022
T3 Konnektion bis Diskonnektion	129 / 102	157 / 125	0,37

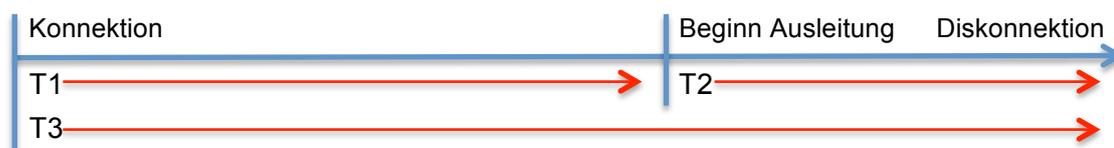


Abbildung 11: Übersicht der Zeitintervalle

3.3 Vergleich der Verbräuche der medizinischen Gase

Bei einem p-Wert von 0,038 zeigt sich im Sevofluranverbrauch ein signifikanter Unterschied zugunsten der Zeusgruppe. Da der Narkosegasverdampfer Teil des Narkosesystems ist, war es nicht möglich diesen während einer laufenden Narkose zu entnehmen, um das Gewicht zu bestimmen. Die Angabe des Narkosegasverbrauches bezieht sich daher nur auf die Gesamtkonnektionszeit (T3). Die Angabe erfolgt als Verbrauch in Milliliter pro Minute. In der Zeusgruppe betrug der Verbrauch im Mittel 0,114 ml/min, die Standardabweichung betrug 0,027 ml/min. Der Verbrauch in der Aisysgruppe lag bei 0,119 ml/min (Mittelwert), die Standardabweichung bei 0,023 ml/min. Eine Übersicht über alle Verbräuche an Gasen findet sich in Tabelle 8.

Die Verbrauchswerte von Sauerstoff sind in Liter pro Minute (l/min) angegeben. Sie wurden über die am Präzisionsmanometer angezeigten Drücke ermittelt. Im Zeitintervall T1 ergab sich in der Zeusgruppe ein Verbrauch von 0,263 l/min (Mittelwert). Die Standardabweichung lag bei 0,093 l/min. Der Verbrauch in der Aisysgruppe betrug hier 0,32 l/min (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von 0,075 l/min. Mit einem p-Wert von $<0,001$ zeigte sich ein hochsignifikanter Unterschied bezogen auf den Sauerstoffverbrauch im Zeitintervall T1 zugunsten der Zeusgruppe. Während des Intervalls T2 lag der Verbrauch in der Zeusgruppe bei 2,347 l/min (Mittelwert), die Standardabweichung bei 1,35 l/min. In dieser Phase lag der Verbrauch in der Aisysgruppe bei 2,69 l/min (Mittelwert), bei einer Standardabweichung von 1,133 l/min. Eine Signifikanz ist bei einem p-Wert von 0,164 nicht gegeben. Ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ergaben sich bei der Analyse der Gesamtkonnektionszeit (p-Wert 0,221). Im Mittel betrug der Bedarf an Sauerstoff in der Zeusgruppe 0,478 l/min, die Standardabweichung 0,19 l/min. In der Aisysgruppe lag der Verbrauch bei 0,519 l/min (Mittelwert), die Standardabweichung bei 0,163 l/min.

Der Verbrauch von medizinischer Druckluft wird auch in Liter pro Minute angegeben und wurde ebenfalls über die am Präzisionsmanometer angezeigten Drücke ermittelt. Ein signifikanter Unterschied ergab sich in allen betrachteten Zeitintervallen (p-Wert $<0,001$). Während sich in der Zeusgruppe im Zeitintervall T1 ein Bedarf von 0,095 l/min im Mittel ergab (Standardabweichung 0,078 l/min) betrug der Verbrauch in der Aisysgruppe 12,608 l/min (Mittelwert), die Standardabweichung lag bei 2,511 l/min. Im Zeitintervall T2 lag der Verbrauch in der Zeusgruppe bei 0,092 l/min (Standardabweichung 0,146 l/min). In diesem Zeitraum waren in der Aisysgruppe 8,356 l/min (Standardabweichung 3,481 l/min) zum Betrieb erforderlich. Betrachtet man die Gesamtkonnektionszeit T3 lag der Verbrauch in der Zeusgruppe im Mittel bei 0,090 l/min, die Standardabweichung lag bei 0,067 l/min. Die Narkosemaschine Aisys[®] zeigt in diesem Zeitintervall einen Verbrauch von im Mittel 12,148 l/min (Standardabweichung 2,393 l/min). Somit ergibt sich im Vergleich des Verbrauches an medizinischer Druckluft in jedem untersuchten Zeitintervall ein hochsignifikanter Unterschied zugunsten der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®].

Tabelle 8: Übersicht des Gasverbrauchs (messtechnisch ermittelt), Darstellung als Mittelwert \pm Standardabweichung in l/min

	Zeus (n=52)	Aisys (n=52)	p-Wert
Sauerstoff (l/min)			
T1 Konnektion bis Beginn Ausleitung	0,263 \pm 0,093	0,32 \pm 0,075	<0,001
Sauerstoff (l/min)			
T2 Beginn Ausleitung bis Diskonnektion	2,347 \pm 1,35	2,69 \pm 1,133	0,164
Sauerstoff (l/min)			
T3 Konnektion bis Diskonnektion	0,478 \pm 0,19	0,519 \pm 0,163	0,221
Med. Druckluft (l/min)			
T1 Konnektion bis Beginn Ausleitung	0,095 \pm 0,078	12,608 \pm 2,511	<0,001
Med. Druckluft (l/min)			
T2 Beginn Ausleitung bis Diskonnektion	0,092 \pm 0,146	8,356 \pm 3,481	<0,001
Med. Druckluft (l/min)			
T3 Konnektion bis Diskonnektion	0,090 \pm 0,067	12,148 \pm 2,393	<0,001
Sevofluran (ml/min)			
T3 Konnektion bis Diskonnektion	0,114 \pm 0,027	0,119 \pm 0,023	0,038

3.4 Verbrauch von elektrischem Strom

Der Verbrauch von elektrischem Strom wurde im Rahmen einer simulierten Narkose an einer Testlunge über einen Zeitraum von einer Stunde bestimmt und in Kilowatt pro Stunde (kw/h) angegeben. Die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] benötigte in dieser Zeit zum Betrieb 0,347 kw/h, die Narkosemaschine Aisys[®] zeigte einen geringeren Verbrauch von 0,198 kw/h.

3.5 Übersicht der Betriebskosten

Für die Berechnung der Betriebskosten wurde die mögliche Betriebszeit des Narkosegerätes im Bereich der Allgemeinchirurgie ermittelt. Der Rechnung zugrunde gelegt wurden 254 Arbeitstage in Niedersachsen im

Jahr 2016. Gemäß der Allokation der OP-Saal-Kapazitäten in der UMG (abgerufen von der Webseite der Klinik für Anästhesiologie am 16.07.2016) stehen der Klinik für Allgemeinchirurgie von Montag bis Freitag mindestens 3 OP-Säle in der Zeit von 7:30 bis 16:30 Uhr zur Verfügung, hiervon konnte bei Bedarf ein Saal bis 18:45 Uhr genutzt werden. Für die weitere Berechnung wird von einem 540 Minuten langen Arbeitstag ausgegangen, hiervon werden vier Überleitungen zwischen einzelnen Operationspunkten mit jeweils 20 Minuten abgezogen. Es verbleiben 460 Minuten Betriebszeit des Narkosegerätes pro Arbeitstag. Aus den ermittelten Verbrauchswerten und Kosten ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Betriebskosten während eines angenommenen Abschreibungszeitraumes von zehn Jahren.

Tabelle 9: Übersicht der Betriebskosten in 10 Jahren

	Aisys	Zeus
Sevofluran	71.777,80 €	68.761,93 €
Sauerstoff	175,86 €	161,96 €
Med. Druckluft	4.027,40 €	22,70 €
Strom	694,03 €	1216,30 €
<u>Summe der Betriebskosten in 10 Jahren</u>	<u>76.675,09 €</u>	<u>70.162,90 €</u>

In der Berechnung der Kosten bezogen auf die Gerätelaufzeit zeigt sich, dass die Differenz zwischen den beiden Narkosemaschinen mit steigender Laufzeit zunimmt. Nach zehn Jahren Betriebszeit ergibt sich eine Ersparnis von 6512,19 Euro im Betrieb der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] verglichen mit der Narkosemaschine Aisys[®]. In Abbildung 12 sind die laufenden Betriebskosten bzw. die Differenz zwischen den Narkosemaschinen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer dargestellt. Hierbei zeigt sich ein linearer Zusammenhang.

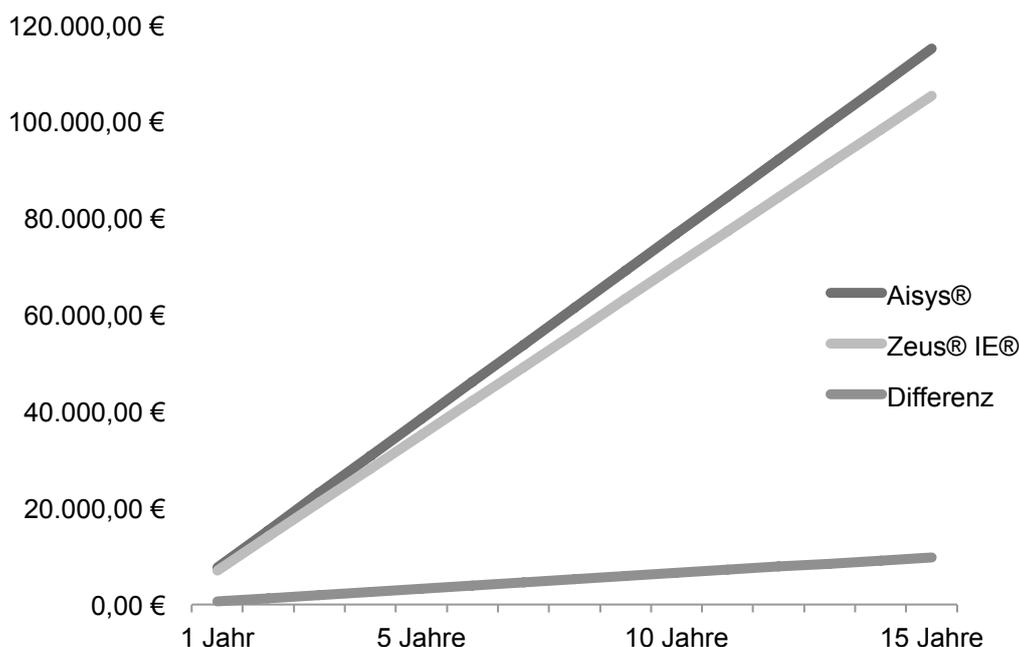


Abbildung 12: Laufende Betriebskosten der Narkosemaschinen sowie Differenz in Abhängigkeit von den Nutzungsjahren

3.6 Vergleich zwischen gemessenen und durch die Narkosemaschine angezeigten Verbrauch

Die beiden in dieser Studie verwendeten Narkosemaschinen bieten die Möglichkeit, dass sich der Anwender eine Übersicht über den aktuellen und kumulativen Verbrauch von Sevofluran, Sauerstoff und medizinischer Druckluft anzeigen lassen kann. Für die oben beschriebenen Ergebnisse wurden die mittels Waage oder Manometer real gemessenen Verbräuche verwendet. Diese werden im Folgenden mit den am Gerätedisplay abgelesenen Angaben verglichen. Beide Geräte zeigen die Verbrauchsdaten in ganzen Zahlen ohne Nachkommastelle an. Durch Division mit den beschriebenen Zeitintervallen ergibt sich ein Verbrauch in ml/min (Sevofluran) bzw. l/min (Sauerstoff, medizinische Druckluft).

3.6.1 Abweichungen im angezeigten Sevofluranverbrauch

In der Zeusgruppe zeigte sich ein angezeigter Verbrauch im Mittel von 0,1 ml/min bei einer Standardabweichung von 0,024 ml/min. Demgegenüber steht der ermittelte Verbrauch von 0,114 ml/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,027 ml/min. In der Aisysgruppe betrug der angezeigte Verbrauch 0,115 ml/min (Mittelwert), die Standardabweichung lag

bei 0,022 ml/min. Demgegenüber steht der ermittelte Verbrauch von 0,119 ml/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,023 ml/min (Abbildung 13). Beide Narkosemaschinen zeigen im Display einen falsch niedrigen Verbrauch an. Der Unterschied zwischen messtechnisch ermitteltem und angezeigtem Verbrauch ist zum Vergleich zusätzlich auch prozentual angegeben (Tabelle 10). Der Zeus[®] IE[®] zeigt den Sevofluranverbrauch displayseitig 12,28%, der Aisys[®] 3,36% niedriger an.

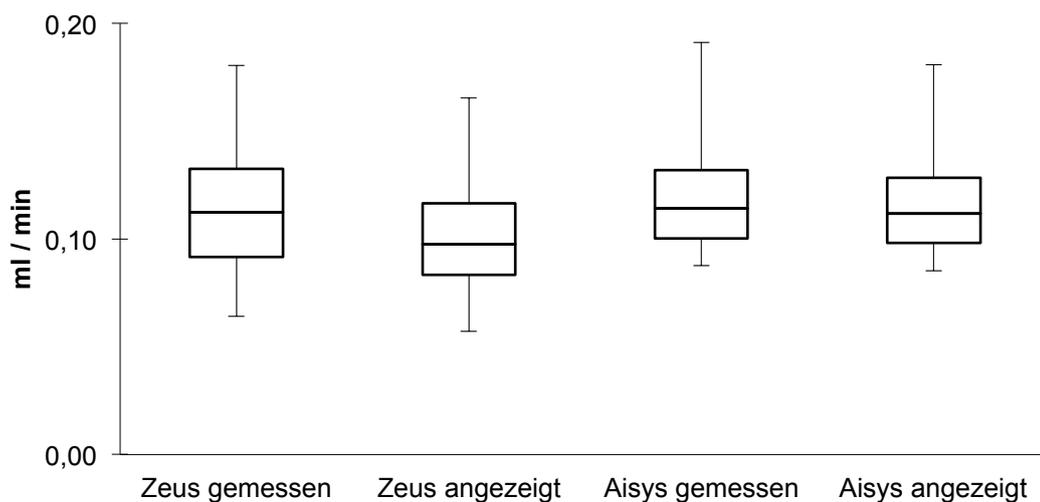


Abbildung 13: Boxplot Sevofluranverbrauch

Tabelle 10: Vergleich zwischen errechneten und angezeigten Sevofluranverbrauch (ml/min). Darstellung als Mittelwert \pm Standardabweichung sowie prozentuale Abweichung des Mittelwertes

	Gemessen	Angezeigt	Abweichung in %
Zeusgruppe	0,114 / 0,027	0,1 / 0,024	-12,28
Aisysgruppe	0,119 / 0,023	0,115 / 0,022	-3,36

3.6.2 Abweichungen im angezeigten Sauerstoffverbrauch

Im Zeitintervall T1 ergab sich in der Zeusgruppe ein angezeigter Verbrauch von 0,234 /min im Mittel, die Standardabweichung lag bei 0,071 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,263 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,093 l/min. Betrachtet man die Aisysgruppe in diesem Zeitintervall, ergab sich ein Verbrauch von

0,361 l/min (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von 0,048 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,32 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,075 l/min. Während des Intervalls T2 lag der angezeigte Verbrauch in der Zeusgruppe bei 2,218 l/min (Mittelwert), die Standardabweichung bei 1,211 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 2,347 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 1,35 l/min. In dieser Phase lagen die Verbräuche in der Aisysgruppe bei 2,59 l/min (Mittelwert), bei einer Standardabweichung von 1,037 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 2,69 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 1,133 l/min. In der Betrachtung der Gesamtkonnektionszeit (T3) ergab sich ein angezeigter Sauerstoffbedarf in der Zeusgruppe von 0,434 l/min, die Standardabweichung lag bei 0,174 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,478 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,19 l/min. In der Aisysgruppe lag der angezeigte Verbrauch bei 0,548 l/min im Mittel, die Standardabweichung lag bei 0,159 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,519 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,163 l/min (Abbildung 14 und Abbildung 15). Wie in Tabelle 11 dargestellt ist in allen Zeitintervallen eine Abweichung zum gemessenen Verbrauch zu erkennen. Exemplarisch wird nachfolgend das Zeitintervall T3 betrachtet. Verglichen mit dem messtechnisch ermittelten Verbrauch zeigt die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] einen um 9,21% zu geringen Verbrauch, die Narkosemaschine Aisys[®] hingegen einen um 5,59% zu hohen Verbrauch an.

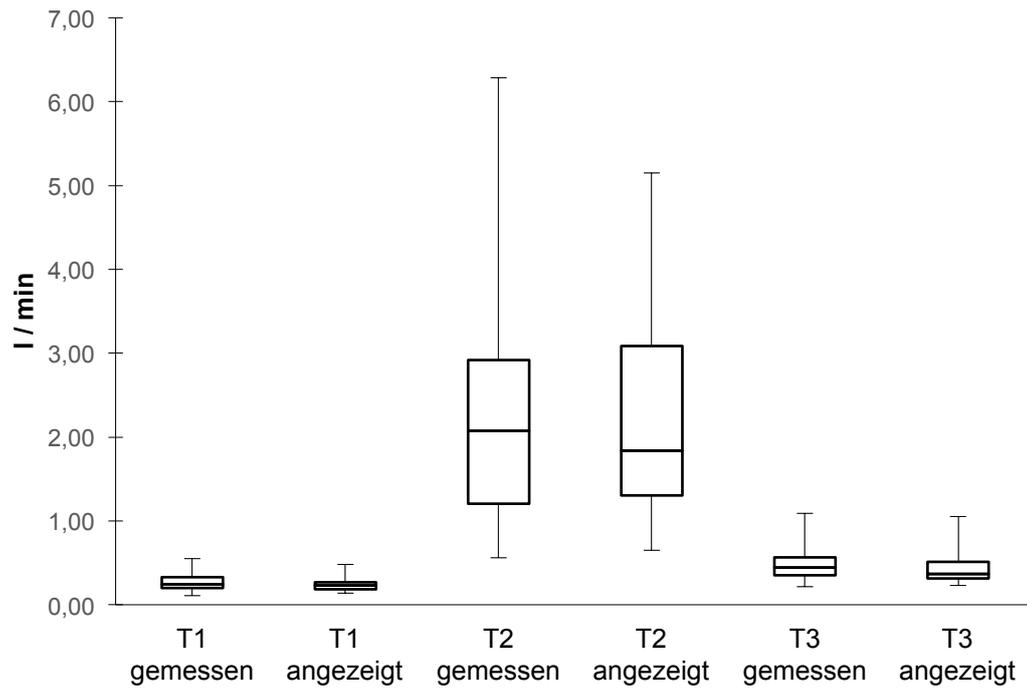


Abbildung 14: Boxplot Sauerstoffverbrauch in der Zeusgruppe

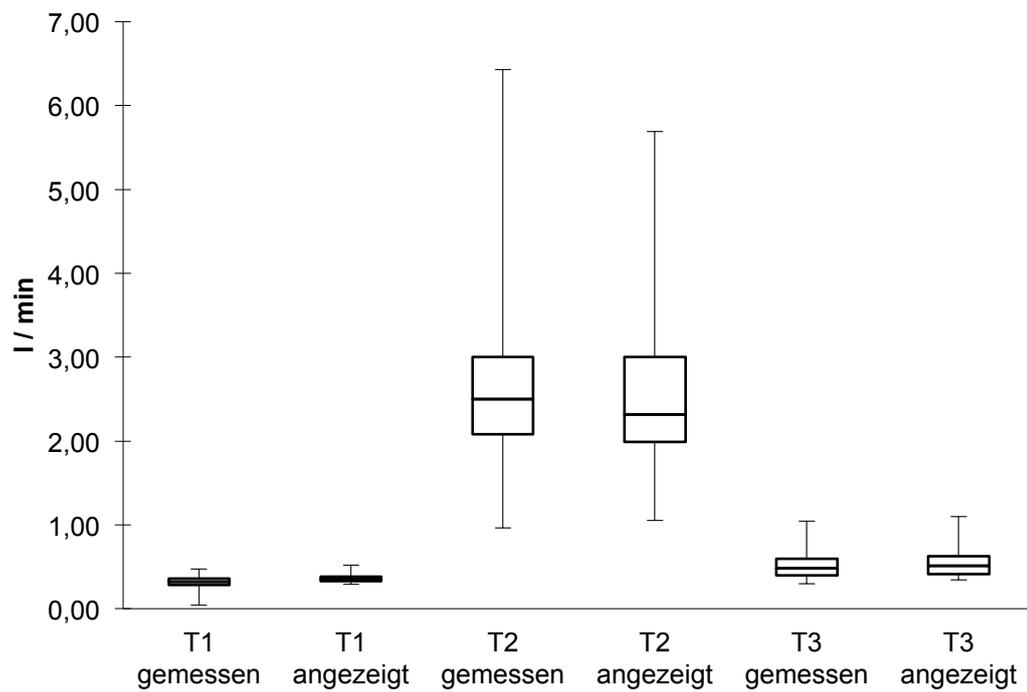


Abbildung 15: Boxplot Sauerstoffverbrauch in der Aisysgruppe

Tabelle 11: Abweichungen im Sauerstoffverbrauch (l/min). Darstellung als Mittelwert \pm Standardabweichung sowie Abweichung zum gemessenen Verbrauch in Prozent

	Zeitintervall	Gemessen (l/min)	Angezeigt (l/min)	Abweichung in %
Zeus- gruppe	T1	0,263 / 0,093	0,234 / 0,071	-11,03
	T2	2,347 / 1,35	2,218 / 1,211	-5,5
	T3	0,478 / 0,19	0,434 / 0,174	-9,21
Aisys- gruppe	T1	0,32 / 0,075	0,361 / 0,048	12,81
	T2	2,69 / 1,133	2,59 / 1,037	-3,72
	T3	0,519 / 0,163	0,548 / 0,159	5,59

3.6.3 Abweichungen im angezeigten Verbrauch von medizinischer Druckluft

Im Zeitintervall T1 ergab sich in der Zeusgruppe ein angezeigter Verbrauch von 0,067 l/min im Mittel, die Standardabweichung lag ebenfalls bei 0,067 l/min. Demgegenüber steht ein messtechnisch ermittelter Verbrauch von 0,095 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,078 l/min. Betrachtet man die Aisysgruppe in diesem Zeitintervall, ergab sich ein angezeigter Verbrauch von 0,239 l/min (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von 0,052 l/min. Messtechnisch wurde ein Verbrauch von 12,608 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 2,511 l/min ermittelt. Während des Intervalls T2 lag der angezeigte Verbrauch in der Zeusgruppe bei 0,022 l/min (Mittelwert), die Standardabweichung bei 0,083 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,092 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,146 l/min. In dieser Phase lagen die angezeigten Verbräuche in der Aisysgruppe bei 0,029 l/min (Mittelwert), bei einer Standardabweichung von 0,058 l/min. Messtechnisch wurde ein Verbrauch von 8,356 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 3,481 l/min ermittelt. In der Betrachtung der Gesamtkonnektionszeit (T3) ergab sich ein angezeigter Verbrauch von medizinischer Druckluft in der Zeusgruppe von 0,060 l/min, die

Standardabweichung lag bei 0,057 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 0,090 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 0,067 l/min. In der Aisysgruppe lag der angezeigte Verbrauch bei 0,218 l/min im Mittel, die Standardabweichung lag bei 0,045 l/min. Demgegenüber steht ein gemessener Verbrauch von 12,148 l/min (Mittelwert) mit einer Standardabweichung von 2,393 l/min (Abbildung 16 und Abbildung 17). Der Unterschied zwischen messtechnisch ermitteltem und angezeigtem Verbrauch ist zum Vergleich auch prozentual angegeben (Tabelle 12). Es ist zu erkennen, dass die Narkosemaschine Zeus® IE® in allen untersuchten Zeitintervallen einen niedrigeren Verbrauch von medizinischer Druckluft aufweist als die Narkosemaschine Aisys®. Exemplarisch wird nachfolgend das Zeitintervall T3 betrachtet. Verglichen mit dem messtechnisch ermittelten Verbrauch zeigt die Narkosemaschine Zeus® IE® einen um 33,33% zu geringen Verbrauch, die Narkosemaschine Aisys® hingegen einen um 98,21% zu geringen Verbrauch an. Auffällig ist zudem die hohe Diskrepanz zwischen angezeigtem und messtechnisch ermitteltem Verbrauch von medizinischer Druckluft der Narkosemaschine Aisys® in allen Zeitintervallen.

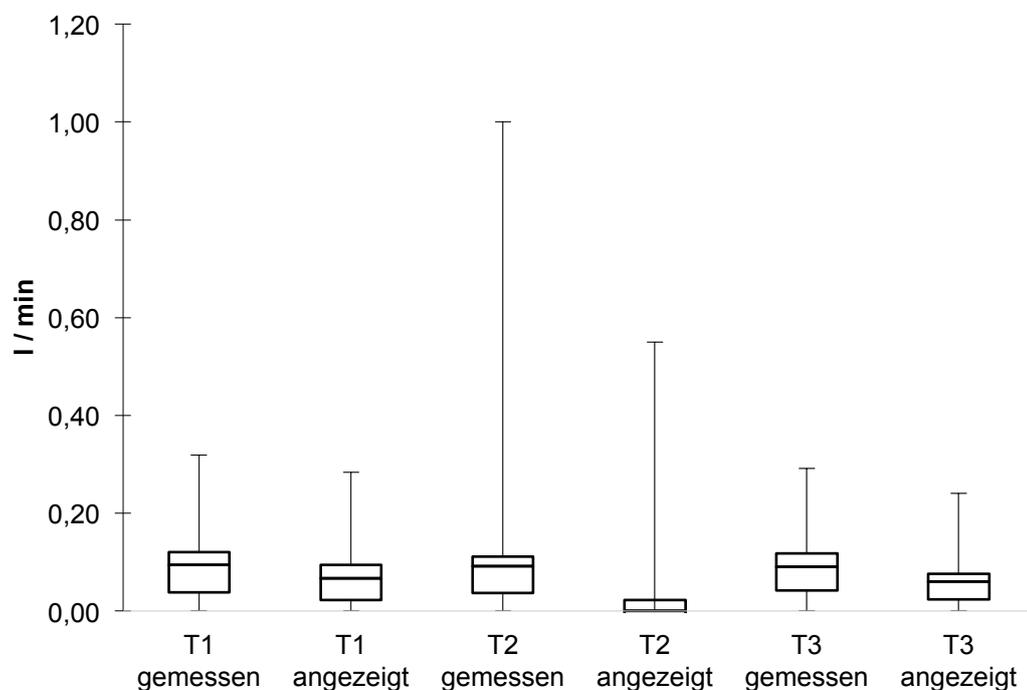


Abbildung 16: Boxplot Verbrauch von medizinischer Druckluft in der Zeusgruppe

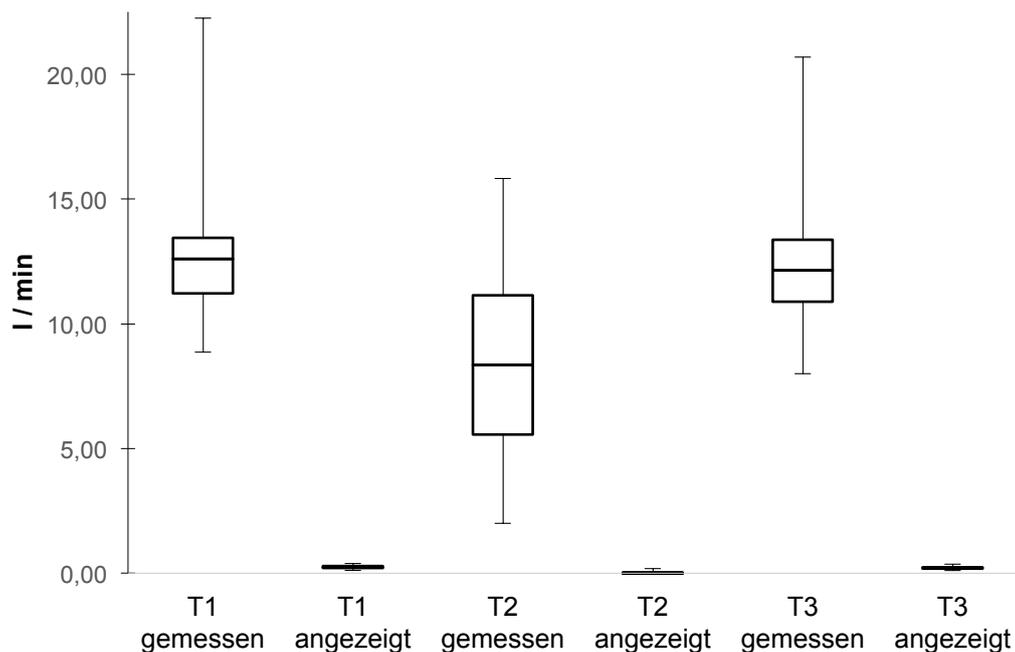


Abbildung 17: Boxplot Verbrauch von medizinischer Druckluft in der Aisysgruppe

Tabelle 12: Abweichungen im Verbrauch von medizinischer Druckluft (l/min). Darstellung als Mittelwert \pm Standardabweichung sowie Abweichung zum gemessenen Verbrauch in Prozent

	Zeitintervall	Gemessen (l/min)	Angezeigt (l/min)	Abweichung in %
Zeus- gruppe	T1	0,095 \pm 0,078	0,067 \pm 0,067	-29,47
	T2	0,092 \pm 0,146	0,022 \pm 0,083	-76,09
	T3	0,090 \pm 0,067	0,060 \pm 0,057	-33,33
Aisys- gruppe	T1	12,608 \pm 2,511	0,239 \pm 0,052	-98,01
	T2	8,356 \pm 3,481	0,029 \pm 0,058	-99,65
	T3	12,148 \pm 2,393	0,218 \pm 0,045	-98,21

4 Diskussion

Im Rahmen der durchgeführten Studie konnte ermittelt werden, dass sich beide Narkosemaschinen im Verbrauch der verwendeten medizinischen Gase sowie des Stromverbrauchs deutlich unterscheiden. Da die individuellen Anschaffungs- und Wartungskosten aus Gründen der Diskretion seitens der Hersteller nicht genannt wurden, war es nicht möglich, diesen Kostenaspekt einfließen zu lassen.

4.1 Gesamtbetriebskosten

Eine Ermittlung und damit ein Vergleich der exakten Gesamtbetriebskosten der Narkosemaschinen Aisys[®] und Zeus[®] IE[®] war aus firmenspezifischen Gründen nicht möglich. Trotz intensiver Gespräche mit den Produktmanagern und Vertretern beider Hersteller der Narkosemaschinen gelang es nicht, einen für diese Arbeit verwendbaren Anschaffungspreis in Erfahrung zu bringen. Beide Firmen wollten aus Gründen der Diskretion weder diesen, noch den Preis für einen Wartungsvertrag nennen. Es existiert zwar ein weltweit gültiger Listenpreis für die Narkosemaschinen, dieser wird jedoch zum einen in Abhängigkeit vom Verkaufsland und zusätzlich individuell auf den Geschäftspartner angepasst. Neben der bestellten Stückzahl fließt hier auch der zeitgleich abgeschlossene Wartungsvertrag in die Berechnung mit ein. Die Preisfindung im Bereich der Wartungsverträge gestaltet sich noch komplexer. Beide Firmen bieten zwischen der kompletten Übertragung der Wartungsarbeiten auf hauseigene Kräfte der medizintechnischen Abteilung bis zu einem Vollwartungspaket mit Ersatzteilpauschale diverse Zwischenlösungen an. Eine bestmögliche Vergleichbarkeit wäre bei einem Angebot für einen Vollwartungsvertrag inklusive der erforderlichen Ersatzteile und Arbeitsleistung gegeben. Ein Angebotspreis für eine Narkosemaschine und den zugehörigen Wartungsvertrag wollten die Firmenvertreter jedoch nur bei realem Kaufinteresse abgeben.

Übertragbar auf andere Standorte ist diese Studie zudem nur, wenn man die errechneten Verbräuche an die lokalen Gegebenheiten und Kostenstrukturen anpasst. Der Umfang des Wartungsvertrages muss dabei in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit einer eigenen medizintechnischen Abteilung ausgewählt und berücksichtigt werden. Zusammen mit den hier erhobenen Verbräuchen im laufenden Betrieb kann somit aber durchaus eine lokale Berechnung der laufenden Betriebs- und Verbrauchskosten als Teil der Gesamtbetriebskosten erstellt werden.

4.2 Interpretation der Betriebskosten

Die laufenden Betriebskosten beider Geräte wurden durch eine prospektive Studie an 104 Patienten erhoben. Hierzu wurden über einen Zeitraum von insgesamt 299 Stunden die Verbräuche der sogenannten medizinischen Gase Sauerstoff und medizinische Luft sowie des volatilen Anästhetikums Sevofluran während Narkosen im Bereich der Allgemeinchirurgie ermittelt. Betrachtet man die gesamte Konnektionszeit des Patienten an der Narkosemaschine, zeigten sich im Verbrauch der medizinischen Gase beider Geräte deutliche Unterschiede. In Bezug auf den Verbrauch von Sevofluran zeigte die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] einen im Mittelwert um 0,005 ml/min geringeren Verbrauch. Bei einem p-Wert von 0,038 ist dies statistisch signifikant. Auch in Bezug auf den Sauerstoffverbrauch zeigte die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] einen geringeren Verbrauch von im Mittel 0,041 l/min. Hier zeigt sich jedoch keine statistische Signifikanz. Betrachtet man den Verbrauch von medizinischer Druckluft, so agierte der Zeus[®] IE[®] deutlich sparsamer als der Aisys[®] mit einem geringeren Verbrauch von 12,327 l/min im Mittelwert. Dies ist mit einem p-Wert von <0,001 statistisch hochsignifikant.

Da ein Teil der Patienten postoperativ intubiert auf die Intensivstation verlegt wurde, war es erforderlich die Ausleitungsphase gesondert zu betrachten. Deshalb wurden mehrere Zeitintervalle während der Narkoseführung erfasst. Die Zeit von Konnektion bis zum Beginn der Narkoseausleitung (T1), die Zeit von Beginn Narkoseausleitung bis zur Diskonnektion des Patienten von der Narkosemaschine (T2) sowie die Gesamtkonnektionszeit (T3). Eine Bestimmung des Sevofluranverbrauches

war aus technischen Gründen nur für den Zeitraum T3 möglich. Dies ist kongruent zu vorausgegangenen Studien, bei denen ebenfalls ausschließlich die Gesamtkonnektionszeit T3 zur Berechnung des Verbrauches der volatilen Anästhetika herangezogen wurde (Hinz et al. 2012). Für eine differenziertere Berechnung während der Ausleitungsphase wäre es in nachfolgenden Studien sinnvoll nur Patienten einzuschließen, die am Operationsende extubiert werden. Die Datenerhebung im Bereich der Allgemeinchirurgie müsste dann aber kritisch hinterfragt werden. Aufgrund der großen Anzahl von komplexeren Eingriffen ist bei vielen Patienten die intubierte Verlegung auf eine Intensivstation im Vorfeld bereits geplant. Hierbei spielen auch Sicherheitsaspekte eine Rolle. Da sich die allgemein chirurgische Intensivstation in der UMG auf einer anderen Ebene als der Zentral-OP befindet, ist neben einer längeren Strecke auch ein Fahrstuhltransport des Patienten postoperativ erforderlich.

Wie beschrieben, zeigte sich bezogen auf den Sevofluranverbrauch zwischen beiden Narkosemaschinen ein signifikanter Unterschied. Betrachtet man den mittleren Verbrauch benötigt der Zeus[®] IE[®] lediglich 0,005 ml/min Sevofluran weniger als die Narkosemaschine Aisys[®]. Berücksichtigt man den Preis von 0,52 Euro pro ml Sevofluran ergibt sich über die geplante Abschreibungsdauer von 10 Jahren somit eine Ersparnis von 3015,87 Euro durch die Nutzung des Zeus[®] IE[®] im Vergleich zum Aisys[®]. In einer 2013 auf dem „Symposium on automated low flow anaesthesia and visual drug display systems“ (NAVAt) in Belgien vorgestellten Studie konnte Hendrickx aufzeigen, dass es aus technischen Gründen eine untere Verbrauchsgrenze für Sevofluran gibt. Um 1 MAC im AutoDosierung-Modus des Zeus[®] IE[®] zu erreichen, liegt diese bei einem Verbrauch von 7,5 ml Sevofluran pro Stunde (Hendrickx 2013). Für die Narkosemaschine Aisys[®] wurden 11,2 ml Sevofluran pro Stunde beschrieben. Hochgerechnet auf eine Stunde Nutzung lag in der vorliegenden Studie der Verbrauch bei durchschnittlich 6,84 ml Sevofluran für den Zeus[®] IE[®]. Der Aisys[®] zeigte in den Messungen jedoch nur einen Verbrauch von 7,14 ml Sevofluran pro Stunde, also erheblich weniger als in den von Hendrickx durchgeführten Berechnungen. Hendrickx erklärte den erhöhten Verbrauch des Aisys[®] im Vergleich zum Zeus[®] IE[®] mit der in der Gerätesoftware vorgegebenen Zeit, um die gewünschte

Sauerstoffkonzentration zu erreichen. Nach initialer Präoxygenierung wurde im dortigen Studiendesign die gewünschte inspiratorische Sauerstoffkonzentration beim Zeus[®] IE[®] auf 50% reduziert. Dieses Ziel wurde nach circa 15 Minuten erreicht. Beim Aisys[®] wurde ein Wert von 45% expiratorisch eingestellt. Dieser wurde nach circa 4 Minuten erreicht. Parallel wurde der gesamte Gasfluss der Narkosemaschinen gemessen, dieser lag beim Zeus[®] IE[®] erheblich niedriger, zum Teil bei lediglich ca. 0,1 l/min bereits 3 Minuten nach Konzentrationsänderung. Zur gleichen Zeit benötigte der Aisys[®] einen Gasfluss von 1,75 l/min. Die Software des Aisys[®] legt also eine höhere Priorität darauf, die gewünschte Sauerstoffkonzentration zeitnah zu erreichen. Dies geht aufgrund des erhöhten Frischgasflusses konsekutiv mit einem erhöhten Verbrauch von Sevofluran einher, während der Zeus[®] IE[®] überwiegend den Metabolismus des Patienten zur Reduktion der Sauerstoffkonzentration nutzt. Da Hendrickx in seinem Vortrag lediglich Grafiken statt Tabellen verwendet, sind die Daten nicht exakt darstellbar. Da in diesem Studiendesign die Narkoseeinleitung an einem Narkosegerät im Einleitungsraum durchgeführt wurde, die Verbrauchsmessungen aber erst an der Narkosemaschine im Operationssaal begonnen wurden, kann dies eine mögliche Erklärung für den Unterschied zwischen den Daten dieser Studie und denen von Hendrickx sein. Leider findet sich zudem kein Hinweis in der Hendrickx-Studie, welche Softwareversion auf dem Aisys[®] zum Einsatz kam. Folglich ist es daher nicht möglich zu sagen, ob die Software durch den Hersteller zwischenzeitlich zu Gunsten ökonomischer Gesichtspunkte modifiziert wurde.

Das Wiegen des Narkosegasverdampfers vor und am Ende der Messungen dient der Ermittlung des Gasverbrauches und wird nach wie vor als Goldstandard betrachtet (Biro et al. 2015). Dehouwer et al. wiesen jedoch in einer Studie nach, dass es während dieses Vorgangs zu einem durchschnittlichen Verlust von 0,21 ml (Zeus[®] IE[®]) bzw. 1,78 ml Sevofluran (Aisys[®]) kommt (Dehouwer et al. 2016). Ursächlich hierfür ist die Entnahme bzw. das Einsetzen des unter Druck stehenden Narkosegasverdampfers. Nach eigenen Beobachtungen geht dies tatsächlich bei beiden verwendeten Narkosegasverdampfern mit einem kurzen zischenden Geräusch einher. Die Verbrauchsdifferenz von Sevofluran zwischen Literaturangabe und eigenen

Daten könnte sich hierdurch erklären lassen. Dehouwer beschreibt allerdings auch, dass die Verluste an Sevofluran bei den einzelnen Messungen sehr unterschiedlich waren. Kritisch anzumerken ist, dass Dehouwer insgesamt nur fünf Messungen pro Narkosegasverdampfer durchgeführt hat. Möglich ist ebenfalls, dass diese Verluste je nach Kombination von Narkosegasverdampfer und Narkosemaschine variieren. Dies kann durch unterschiedliche Abnutzungen an den beteiligten Dichtungen und auch durch den Füllungszustand des Narkosegasverdampfers bedingt sein. Auch die Geschwindigkeit, mit der man den Narkosegasverdampfer in die Narkosemaschine einführt, dürfte hier eine Rolle spielen.

Bezogen auf den angezeigten und gemessenen Verbrauch von Sevofluran zeigten beide Narkosemaschinen Abweichungen. Betrachtet wird nachfolgend das Zeitintervall T3. Die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] zeigte im Display im Mittelwert 12,28% weniger Verbrauch als real gemessen an. Die Narkosemaschine Aisys[®] zeigte im Mittelwert 3,36% weniger Verbrauch an. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen messtechnisch bedingten Verluste wäre jedoch noch eine höhere Genauigkeit der Anzeige zu erwarten. In der Arbeit von Dehouwer wird der Verlust durch das Einsetzen des Verdampfers schon rechnerisch berücksichtigt. Aus der graphischen Darstellung von Dehouwer ist zu entnehmen, dass die Abweichung bei der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] ebenfalls bei ca. 10% liegt, während der Aisys[®] eine Abweichung von ca. 2,5% aufweist (Dehouwer et al. 2016). Die Publikation beinhaltet leider keine tabellarische Übersicht. Dennoch sind die der Literatur vorbeschriebenen Daten mit den hier erhobenen Ergebnissen in der Größenordnung vergleichbar. Für nachfolgende Studienprotokolle sollte der messtechnisch bedingte Verlust von Sevofluran genauer quantifiziert und einberechnet werden.

Betrachtet man den gemessenen Sauerstoffverbrauch beider Geräte im Vergleich der einzelnen Zeiträume ergibt sich nur im Zeitraum T1 ein statistisch signifikanter Unterschied zugunsten des Zeus[®] IE[®]. Während des Zeitraumes T2 und der Gesamtkonnektionszeit T3 ist der Verbrauch zwar ebenfalls geringer, jedoch ohne statistische Signifikanz. Ursächlich scheint hierfür der erhöhte Sauerstoffverbrauch in der Ausleitungsphase (T2) zu sein. Dieser entsteht durch die aus Sicherheitsaspekten erneut erhöhte

Sauerstoffkonzentration in der Inspirationsluft vor der Extubation oder Patientenumlagerung. Wie bereits beschrieben reagieren beide Narkosemaschinen auf Änderung der Sauerstoffkonzentration mit hohen Gasflüssen, um die gewünschte Konzentrationsänderung zeitnah zu erreichen. Dabei ist der Gasfluss umso höher, je weiter die aktuell bestehende Sauerstoffkonzentration von der neu eingestellten differiert. Berechnet auf eine Betriebszeit von 10 Jahren zeigt sich zudem, dass durch den Einsatz des Zeus[®] IE[®] lediglich eine Ersparnis von 13,89 Euro durch den geringeren Sauerstoffverbrauch erzielt werden kann.

In Bezug auf Abweichungen zwischen angezeigtem und errechnetem Verbrauch wird nachfolgend ebenfalls das Zeitintervall T3 betrachtet. Der angezeigte Verbrauch der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] liegt 9,21% unter dem gemessenen Verbrauch. In der von Hinz et al. durchgeführten Studie, bei der ausschließlich die auf dem Display angezeigten Verbräuche für die Berechnungen berücksichtigt wurden, zeigte der Zeus[®] der 1. Generation noch erheblich höhere Verbrauchswerte von im Mittel 1,119 Liter Sauerstoff pro Minute (Hinz et al. 2012). Wie bereits erwähnt, befand sich auf dem damals verwendeten Studiengerät eine frühe Softwareversion, die im Verlauf modifiziert wurde. In einem Vortrag auf dem Symposium NAVAt zeigte Hendrickx bereits 2013, dass es nach einem Softwareupdate zu einer deutlichen Reduktion des erforderlichen Frischgasfluss beim Zeus[®] kam (Hendrickx 2013). Der Aisys[®] zeigt in diesem Zeitraum einen Verbrauch von 5,59% über dem gemessenen Verbrauch an, errechnete also einen zu hohen Verbrauch. Die Differenz zwischen real gemessenen und angezeigten Verbräuchen könnte dadurch erklärt werden, dass der angezeigte Gasverbrauch der Narkosemaschinen über einen Algorithmus berechnet wird und nicht durch eine physikalische Gasflussmessung erfolgt.

Aufgrund der verschiedenen Antriebstechniken ergeben sich in Bezug auf den Verbrauch von medizinischer Druckluft statistisch signifikante Unterschiede. Dabei ist der Verbrauch von medizinischer Druckluft deutlich höher bei der Narkosemaschine Aisys[®]. Hieraus ergeben sich erhebliche Kostendifferenzen innerhalb des Abschreibungszeitraumes von 10 Jahren. Während die Narkosemaschine Aisys[®] medizinische Druckluft in Höhe von 4.027,40 Euro benötigt, verursacht der Zeus[®] IE[®] antriebsbedingt nur Kosten von

22,70 Euro. Somit beträgt die Differenz 4.004,70 Euro. In Bezug auf Abweichungen zwischen angezeigtem und errechnetem Verbrauch ist erkennbar, dass die Narkosemaschine Aisys[®] im Zeitraum T3 bezogen auf den Mittelwert nur 1,79% des tatsächlichen Verbrauches anzeigt. Der Zeus[®] IE[®] zeigte in diesem Zeitraum auch nur 66,67% des messtechnischen Verbrauches an. Anzumerken ist hierbei, dass der Verbrauch des Zeus[®] IE[®] im Mittelwert bei 0,09 l/min errechnet und 0,06 l/min angezeigt liegt und die Differenz somit lediglich 0,03 l/min beträgt. Verglichen mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 0,444 l/min medizinischer Druckluft beim Zeus[®] aus der Studie von Hinz et al. besteht auch hier ein deutlich reduzierter Verbrauch, welcher durch die Verwendung der neueren Softwareversion erklärt werden könnte (Hinz et al. 2012). Die hohen Abweichungen der Narkosemaschine Aisys[®] ergeben sich vermutlich daraus, dass die zum Antrieb benötigte medizinische Druckluft nicht in der displayseitigen Verbrauchsrechnung berücksichtigt wird.

Lediglich in der Betrachtung der Kosten für elektrischen Strom ergibt sich ein Kostenvorteil für die Narkosemaschine Aisys[®]. In 10 Jahren entstehen hier Aufwendungen für elektrische Energie in Höhe von 694,03 Euro, während der Zeus[®] IE[®] Kosten von 1.216,30 Euro verursacht. Die Differenz beträgt somit 522,27 Euro. Aufgrund der verwendeten Antriebstechnik mittels einer Turbine (Blower) zeigte der Zeus[®] IE[®] einen erheblich geringeren Verbrauch von medizinischer Druckluft, allerdings verbunden mit einem höheren Stromverbrauch. Die ca. 3 cm große Turbine wird in Abbildung 5 dargestellt. Es ist nicht anzunehmen, dass sich alleine durch diese Turbine der erhöhte Stromverbrauch erklärt. Weitere mögliche Gründe für den erhöhten Stromverbrauch werden nachfolgend diskutiert. Das Touchdisplay des Zeus[®] IE[®] lässt sich z. B. weitgehend frei konfigurieren, zum Lieferumfang der Narkosemaschine gehörte auch ein Hämodynamikmodul, welches Energie benötigt, von uns jedoch nicht verwendet wurde. Durch Einstellungen an der Helligkeit des Displays oder sogar eines schwarzen Hintergrundes wäre noch weiteres Stromsparpotential vorhanden gewesen. Das Display des Aisys[®] weist hingegen einen schwarzen Hintergrund auf und verfügt nicht über eine Touchfunktion. Da der Zeus[®] IE[®] auch von anderen Kollegen in der täglichen Routine und während des Bereitschaftsdienstes

betrieben wurde, wurde jedoch bewusst die Standarddarstellung belassen. Im Lieferumfang des von der Firma Dräger[®] zur Verfügung gestellten Leihgerätes Zeus[®] IE[®] befand sich neben dem DIVA-Modul für das Narkosegas Sevofluran auch ein weiteres DIVA-Modul für Desfluran. Während der Studie wurden beide Verdampfer im Zeus[®] IE[®] belassen. Aufgrund des Siedepunktes für Desfluran von 22,8° Celsius sind für dieses Narkosegas jedoch spezielle, elektrisch beheizte Verdampfer erforderlich (Striebel 2010). Beide Verdampfer können aus dem Gerätemenü heraus aktiviert werden, da zwei vollwertige Einsteckschächte verbaut sind. Die Konstruktion der Narkosemaschine Aisys[®] folgt einem anderen Konzept und weist nur einen aktiven Einsteckschacht auf. Zwei weitere sind zwar vorhanden, diese sind jedoch energetisch nicht versorgt und dienen nur der sicheren Lagerung der Narkosegasverdampfer. Je nach gewünschtem Narkosegas muss also ein manueller Wechsel des Verdampfers erfolgen. Der Anteil an Energie, der auf die Heizung des nicht verwendeten Desfluranverdampfers bei der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] entfällt, lässt sich retrospektiv nicht beziffern. Zur genaueren Vergleichbarkeit sollte dies bei zukünftigen Studien berücksichtigt werden und der zweite Verdampfer, sowie das nicht benötigte Hämodynamikmodul, während der Messungen entfernt werden.

4.3 Methodendiskussion

Aufgrund der Tatsache, dass die verwendeten Narkosemaschinen technisch nicht verändert wurden, war seitens der Ethikkommission keine gesonderte Aufklärung der an dieser Studie beteiligten Patienten gefordert. Durch vorgegebene Prozessabläufe und logistische Überlegungen wurde der Einsatz der Narkosemaschinen tageweise randomisiert. In der täglichen Routine im Operationssaal wird eine Wechselzeit zwischen zwei Operationen von maximal 20 Minuten angestrebt. Falls erforderlich, werden zum Sicherstellen dieses Ziels an der UMG überlappende Einleitungen eingesetzt (Waeschle et al. 2016). Durch diese straffe Organisation war es leider nicht möglich die Narkosemaschinen abwechselnd zu nutzen. Diese Randomisierung führte zu keinem statistischen Unterschied in Bezug auf die biometrischen Daten der Probanden. Die Ermittlung der Verbräuche an

verwendeten Gasen erforderte einen hohen logistischen Aufwand, da die entsprechenden Druckgasflaschen zu jeder Zeit ausreichend zur Verfügung stehen mussten. Insbesondere die 50-Liter-Druckgasflaschen für medizinische Druckluft waren aufgrund von Größe und des Gewichts von über 65 kg schwierig zu transportieren.

Bezogen auf die Verbräuche aus den Druckgasflaschen würde eine Messeinrichtung mit der Möglichkeit zur Gasflussmessung sowie simultaner Aufzeichnung der Daten Vorteile bieten. Durch Integration dieser Daten mit den zeitgleich an der Narkosemaschine eingestellten Parametern hätten noch detailliertere Ergebnisse erhoben werden können. Idealerweise würde man diese Messeinrichtung analog zu einem häuslichen Wasserzähler direkt zwischen Druckgaswandanschluss und Narkosemaschine anbringen. Hierdurch würde der Einsatz von Druckgasflaschen entfallen. Zum Zeitpunkt der Studienvorbereitung standen auf dem europäischen Markt keinerlei vergleichbare Geräte mit einer Zulassung im medizinischen Bereich zur Verfügung. Die Narkosemaschine Aisys[®] zeigte aufgrund der Bag-in-Bottle-Technik einen erheblich höheren Verbrauch an medizinischer Druckluft, da diese als Antriebsgas genutzt wird. Bei einem dauerhaften Einsatz an Druckgasflaschen muss dies in der Berechnung der erforderlichen Druckgasmenge unbedingt berücksichtigt werden. Nach ersten Probemessungen im Vorfeld musste deshalb der Flaschentyp von 10 Liter auf 50 Liter für medizinische Druckluft umgestellt werden. Ein Flaschenwechsel wäre sonst regelhaft intraoperativ erforderlich gewesen. Ohne medizinische Druckluft arbeitet der Antrieb der Narkosemaschine Aisys[®] jedoch nicht, daher würde in der Wechselzeit keine Beatmung des Patienten erfolgen. Weiterhin fiel auf, dass in regelmäßigen Abständen von circa 5 Minuten eine interne Kalibrierung der Gasmessbank durchgeführt wird. Diese Messbank ist für die Bestimmung der in- und expiratorischen Gaskonzentrationen erforderlich. Da sie beim Aisys[®] nicht redundant vorhanden ist, kann während des ca. 20 Sekunden dauernden Kalibrierungsvorganges keinerlei Gaskonzentration am Aisys[®] abgelesen werden.

Bezüglich der Kostenermittlung von Sevofluran konnte auf vorhandene Übersichten zurückgegriffen werden. Die Kosten für pro m³ Sauerstoff wurden aus Betriebskosten für die Lagertanks und angelieferter Menge

Sauerstoff im Jahr 2014 ermittelt. Für eine exakte Bestimmung des Jahresverbrauches müssten noch die Füllstände zu Beginn und Ende des Jahres berücksichtigt werden. Diese Daten lagen allerdings nicht vor, da der Füllungszustand der Tankanlagen ohnehin nur approximativ bestimmt werden kann. Er dient in der täglichen Routine lediglich dazu, eine neue Lieferung auszulösen. Es muss also für die Berechnung angenommen werden, dass der Jahresverbrauch der angelieferten Menge Sauerstoff entspricht. Für die Bereitstellung von medizinischer Druckluft verfügt die UMG über eine eigene Kompressoranlage. Da es technisch unmöglich ist, den Gesamtausstoß an medizinischer Druckluft zu ermitteln, konnte folglich auch kein Preis pro m^3 errechnet werden. Es wird daher, analog zu den bereits durchgeführten Studien, der Preis pro m^3 Sauerstoff verwendet (Hinz et al. 2012). Da die UMG mit elektrischer Energie durch die Universitätsenergie Göttingen GmbH beliefert wird, konnte telefonisch in Erfahrung gebracht werden, dass der Strompreis für das Jahr 2014 mit 0,18 Euro pro Kilowattstunde (kWh) zu veranschlagen ist. Dieser im Vergleich zu einem privaten Haushalt günstige Preis entsteht durch den Betrieb eines eigenen Blockheizkraftwerkes. Daher ist dieser Preis nur intern von Aussagekraft und muss an lokale Gegebenheiten angepasst werden.

4.4 Limitationen

Wie bereits beschrieben, konnte das Ziel, die Gesamtbetriebskosten der verwendeten Narkosemaschinen zu vergleichen, nicht erreicht werden. Innerhalb der Verbräuche der einzelnen Gase sowie des Stromverbrauchs zeigten sich in der hier durchgeführten Studie jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Narkosemaschinen. Diese ergeben innerhalb eines Zeitraumes von 10 Betriebsjahren eine Kostenersparnis von 6512,19 Euro beim Betrieb des Zeus[®] IE[®]. Nicht berücksichtigt wurde in dieser Studie eine Betriebszeit der Narkosemaschinen außerhalb der Regelarbeitszeit. Je nach Umfang der Inanspruchnahme in den Bereitschaftsdienstzeiten erhöht sich das Sparpotential entsprechend. Da bei realem Kaufinteresse die Anschaffungs- und Wartungskosten genannt und somit berücksichtigt werden können, sind die in dieser Studie ermittelten Betriebskosten von ökonomischer Relevanz für die Investitionsplanungen.

4.5 Schlussfolgerung

Eine direkte Übertragung der Ergebnisse dieser Studie auf eine andere Klinik ist trotz der signifikant unterschiedlichen Verbräuche nicht möglich. Abhängig von den verhandelten Preisen für medizinische Gase und die elektrische Versorgung muss eine Berechnung für den individuellen Standort erfolgen. In der Betrachtung der Gesamtbetriebskosten ist es im Rahmen der Angebotserstellung bei geplanten Neubeschaffungen selbstverständlich möglich, die Beschaffungspreise sowie die Kosten für den gewünschten Wartungsumfang zu berücksichtigen. Diese hängen stark von der Verfügbarkeit und der Leistungsfähigkeit einer hausinternen medizintechnischen Abteilung ab. Hierbei sollte auch berücksichtigt werden, ob bei Ausfall einer Narkosemaschine im Haus Reservegeräte vorhanden sind, um den Betrieb im OP aufrechterhalten zu können. Aufgrund der unterschiedlichen Antriebstechnik der Narkosemaschinen hat diese Untersuchung aufgezeigt, dass die Verwendung des Bag-in-Bottle-Antriebes der Narkosemaschine Aisys[®] nur bei flaschenunabhängiger Versorgung mit medizinischer Druckluft sinnvoll ist. Ein Einsatz dieser Narkosemaschine ohne zentrale Gasversorgung, z. B. im ambulanten Sektor oder in einem dezentralen OP-Bereich ohne Zentralgasversorgung, kommt somit schon aus Logistikgründen nicht in Frage. Ebenfalls muss die Möglichkeit zur Narkosegasabsaugung vorhanden sein. Betrachtet man isoliert eigene Kostenstellen in einem Krankenhaus, ist hierbei auch von Interesse, wie die Kosten für den Betrieb der Kompressoranlage für medizinische Druckluft hausintern verteilt werden. Im Vergleich zur manuellen Steuerung des Frischgasflusses und des Narkosegases kommt es erst mit zunehmender Dauer der Narkose zu einem Sparpotential. De Wolf und Hendrickx haben in einer Untersuchung 2016 gezeigt, dass die Reduktion des Frischgasflusses selber das größte Einsparpotential aufweist, unabhängig vom verwendeten volatilen Narkosegas (De Wolf und Hendrickx 2016). Es muss also ebenfalls das vorhandene operative Spektrum berücksichtigt werden. Für überwiegend kurzdauernde Eingriffe unter 60 Minuten werden beide untersuchten Narkosemaschinen trotz der Vorteile der automatischen Gasdosierung keine wirtschaftliche Überlegenheit zeigen.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Ermittlung und dem Vergleich der Gesamtbetriebskosten der Narkosemaschinen Aisys[®] und Zeus[®] IE[®], um bei zukünftigen Investitionen eine wirtschaftlich begründbare Kaufentscheidung zu treffen. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweisen der beiden Geräte wurde eine prospektive Studie an 104 Patienten während allgemeinchirurgischer Eingriffe durchgeführt. Es erfolgte eine Randomisierung in zwei gleich große Gruppen. Über einen Zeitraum von 299 Stunden wurden hierfür die Gasverbräuche von Sauerstoff, medizinischer Druckluft sowie des volatilen Anästhetikums Sevofluran während Narkosen im Bereich der Allgemein Chirurgie gemessen. Es wurde der Modus der zielgesteuerten Anästhesie verwendet, in dem die Narkosemaschinen die vom Anwender gewünschten Konzentrationen von Sauerstoff und Sevofluran in der Inspirationsluft selber steuerten. Zudem wurde der Stromverbrauch der Narkosemaschinen bestimmt. In vorhergehenden Studien konnte nachgewiesen werden, dass durch diesen Modus im Vergleich zur manuellen Steuerung der Verbrauch an volatilen Anästhetika gesenkt werden konnte.

Die Preise für die medizinischen Gase Sauerstoff, medizinische Druckluft, das volatile Anästhetikum Sevofluran sowie die elektrische Energie wurden von den zuständigen Stellen ermittelt oder aus Kostentabellen entnommen. Um Anschaffungs- sowie Wartungskosten für beide Maschinen zu ermitteln, wurden Gespräche mit den Herstellern und dem medizintechnischen Service der Universitätsmedizin Göttingen geführt. Aus Diskretionsgründen war leider kein Hersteller bereit, einen Geräteanschaffungspreis oder Kosten für Wartungsverträge zum Vergleich zur Verfügung zu stellen.

Beide Geräte geben im Display den Verbrauch aller medizinischen Gase an. Verglichen mit dem real gemessenen Verbrauch zeigten sich hierbei jedoch Differenzen von bis zu 10% weniger angezeigtem Verbrauch von Sevofluran. Besonders deutlich ist der Unterschied des Verbrauchs von medizinischer Druckluft bei der Narkosemaschine Aisys[®] - diese zeigt nur circa 2% des realen Verbrauchs an. Eine Betriebskostenberechnung nur auf

der Basis der am Display abgelesenen Werte sollte im Rahmen einer Anschaffungsplanung ggf. entsprechend korrigiert werden.

In Bezug auf die Verbräuche der medizinischen Gase zeigte die Narkosemaschine Zeus[®] IE[®] einen signifikant geringeren Verbrauch an Sevofluran, an Sauerstoff sowie an medizinischer Druckluft. Dafür war der Verbrauch an elektrischer Energie bei der Narkosemaschine Aisys[®] geringer. Innerhalb eines Abschreibungszeitraumes von 10 Jahren verursachte der Zeus[®] IE[®] hierbei Kosten in Höhe von 70.162 Euro, beim Aisys[®] wurden 76.675 Euro ermittelt. Die Differenz beträgt somit 6.512 Euro zugunsten der Narkosemaschine Zeus[®] IE[®].

Im Rahmen einer anstehenden Investitionsplanung muss die oben angegebene Berechnung aber an standortabhängige Faktoren angepasst werden. Zur Ermittlung der Gesamtkosten spielt neben dem Anschaffungspreis insbesondere der gewünschte Wartungsvertrag eine Rolle. In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit einer eigenen medizintechnischen Abteilung muss hier individuell mit den Herstellern verhandelt werden. Bei fehlender Redundanz an Narkosemaschinen sollten auch der Erlösausfall bei Wartungen und ungeplanten Geräteausfällen berücksichtigt werden.

Zuletzt sei angemerkt, dass die Vorteile einer zielgesteuerten Anästhesie, insbesondere im ökonomischen Bereich erst mit zunehmender Narkosedauer zunehmen. Durch den hohen Verbrauch von medizinischer Druckluft ist ein Betrieb der Narkosemaschine Aisys[®] unabhängig von einer zentralen Gasversorgung, z. B. im Rahmen von ambulanten Anästhesien, schon aus logistischen Gründen nicht sinnvoll.

6 Anhang

6.1 Messprotokoll

Studienprotokoll Aisys / ZEUS IE Datum: . . .

Initialen:	Pat-ID:	Geschlecht: F <input type="checkbox"/> / M <input type="checkbox"/>
Größe (cm)	Gewicht (kg)	Alter: ASA
Eingriff:	VM:	
Sevo nach Tabelle:	Ideales AZV:	

Feld für Anmerkungen:	Propofol Ind. mg		Propofol (intraop.) mg	
	Sufentanil Ind. µg		Sufentanil (intraop.) µg	
	Rocuronium Ind. mg		Rocuronium (intraop.) mg	
	Dexa	4 mg <input type="checkbox"/>	Medi:	
	Medi:			
	Medi:		Zusatzblatt? <input type="checkbox"/>	

etCO ² am Filter ?	<input type="checkbox"/>	Atemkalk i.O. ?	<input type="checkbox"/>	Arterie <input type="checkbox"/> / ZVK <input type="checkbox"/> / PDK <input type="checkbox"/>
Druck o2 (bar) prä		Druck m air (bar) prä		Gewicht Vapor prä (g)
Druck o2 (bar) post		Druck m air (bar) post		Gewicht Vapor post (g)
Anzeige Verbr o2 (l)		Anzeige Verbr m Air (l)		Anzeige Sevo (ml)

Konnekction:	:	F o2 eingestellt		
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	
AMV (l)		Sevo erreicht t	:	
etCO ² (mmHg)		Insp. CO ² (mmHg)		
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		

t + 30 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real: :

t + 60 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real: :

t + 90 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real: :

t + 120 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real: :

Besonderheiten mit Uhrzeit:

t + 150 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
t + 180 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
t + 210 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
t + 240 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
t + 270 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
t + 300 min:	:	F o2 eingestellt		Druck o2 (bar)	
AF / min		F (i/e) tatsächlich	i: e:	Druck m. air (bar)	
AZV (ml)		Sevo exp. einges	%	Verbrauch o2 (l)	
AMV (l)		Sevo exp. tatsäch	%	Verbrauch m. air (l)	
etCO ²		Insp. CO ² (mmHg)		Verbrauch Sevo (ml)	
Beatmungsform:		PEEP / Ppeak		Zeit real:	:
Start Ausleitung:	:	F o2 / Flow ?	/	Druck o2 (bar)	
		System ?	geschlossen / offen	Druck m. air (bar)	
				Verbrauch o2 (l)	
				Verbrauch m. air (l)	
				Verbrauch Sevo (ml)	
				Zeit real:	:
Diskonnektion	:			Druck o2 (bar)	
ISIV / AWR ?				Druck m. air (bar)	
Intub / Spontan ?				Verbrauch o2 (l)	
				Verbrauch m. air (l)	
				Verbrauch Sevo (ml)	
		Sevo post (g)		Zeit real:	:

6.2 Tabelle Sevoflurankonzentration und Atemzugvolumen

Alter	Vol% Sevo für 1 MAC	Konzentration Sevo gerundet
14	2,41	2,4
16	2,38	2,4
18	2,35	2,3
20	2,32	2,3
22	2,29	2,3
24	2,26	2,3
26	2,24	2,2
28	2,21	2,2
30	2,18	2,2
32	2,15	2,2
34	2,13	2,1
36	2,10	2,1
38	2,08	2,1
40	2,05	2,1
42	2,02	2,0
44	2,00	2,0
46	1,98	2,0
48	1,95	2,0
50	1,93	1,9
52	1,90	1,9
54	1,88	1,9
56	1,86	1,9
58	1,83	1,8
60	1,81	1,8
62	1,79	1,8
64	1,77	1,8
66	1,75	1,7
68	1,72	1,7
70	1,70	1,7
72	1,68	1,7
74	1,66	1,7
76	1,64	1,6
78	1,62	1,6
80	1,60	1,6
82	1,58	1,6
84	1,56	1,6
86	1,54	1,5
90	1,50	1,5
92	1,49	1,5
94	1,47	1,5
96	1,45	1,4
98	1,43	1,4
100	1,41	1,4

Größe cm	IBW Frau kg	AZV Frau ml	IBW Mann kg	AZV Mann ml
120	16,0	96	20,5	123
122	17,8	107	22,3	134
124	19,7	118	24,2	145
126	21,5	129	26,0	156
128	23,3	140	27,8	167
130	25,1	151	29,6	178
132	26,9	162	31,4	189
134	28,8	173	33,3	200
136	30,6	183	35,1	210
138	32,4	194	36,9	221
140	34,2	205	38,7	232
142	36,0	216	40,5	243
144	37,9	227	42,4	254
146	39,7	238	44,2	265
148	41,5	249	46,0	276
150	43,3	260	47,8	287
152	45,1	271	49,6	298
154	47,0	282	51,5	309
156	48,8	293	53,3	320
158	50,6	304	55,1	331
160	52,4	314	56,9	341
162	54,2	325	58,7	352
164	56,1	336	60,6	363
166	57,9	347	62,4	374
168	59,7	358	64,2	385
170	61,5	369	66,0	396
172	63,3	380	67,8	407
174	65,2	391	69,7	418
176	67,0	402	71,5	429
178	68,8	413	73,3	440
180	70,6	424	75,1	451
182	72,4	435	76,9	462
184	74,3	446	78,8	473
186	76,1	456	80,6	483
188	77,9	467	82,4	494
190	79,7	478	84,2	505
192	81,5	489	86,0	516
194	83,4	500	87,9	527
196	85,2	511	89,7	538
198	87,0	522	91,5	549
200	88,8	533	93,3	560
202	90,6	544	95,1	571
204	92,5	555	97,0	582
206	94,3	566	98,8	593
208	96,1	577	100,6	604

7 Literaturverzeichnis

Albrecht M, Kroemer HK, Strehl R (2013): Finanzierung der Universitätsmedizin: An der Grenze der Belastbarkeit. *Dtsch Arztebl Int* 110, A 65-68

Amato MBP, Barbas CSV, Medeiros DM, Magaldi RB, Schettino GP, Lorenzi-Filho G, Kairalla RA, Deheinzelin D, Munoz C, Oliveira R, et al. (1998): Effect of a Protective-Ventilation Strategy on Mortality in the Acute Respiratory Distress Syndrome. *N Engl J Med* 338, 347–354

Apfel CC, Läärä E, Koivuranta M, Greim CA, Roewer N (1999): A simplified risk score for predicting postoperative nausea and vomiting: conclusions from cross-validations between two centers. *Anesthesiology* 91, 693–700

Bach A, Böhrer H, Schmidt H, Motsch J, Martin E (1997): Ökonomische Aspekte beim Einsatz moderner Inhalationsanästhetika am Beispiel des Sevofluran. *Anaesthesist* 46, 21–28
Bauer M: Vortrag: Automatisierte Narkosegasapplikation – Eine effektive Unterstützung des Anästhesisten? 27. Norddeutsche Anästhesie Tage (NAT), Hamburg, 11.12.2014.

Bauer M, Bach A (1999): Gesetzliche Regelungen zur Krankenhausfinanzierung: Entwicklung und Auswirkungen. *Anaesthesist* 48, 417–427

Bauer M, Weber W, Bach A (1999): Controlling im Krankenhaus Eine Einführung in das Kosten- und Leistungsmanagement. *Anaesthesist* 48, 910–916

Bauer M, Hanss R, Römer T, Rösler L, Linnemann K, Hedderich J, Scholz J (2007): Intraoperative Prozesszeiten im prospektiven multizentrischen Vergleich. *Dtsch Arztebl Int* 104, A 3252-3258

Behne M, Wilke HJ, Harder S (1999): Clinical pharmacokinetics of sevoflurane. *Clin Pharmacokinet* 36, 13–26

Bigelow HJ (1846): Insensibility during Surgical Operations Produced by Inhalation. *Boston Med Surg J* 35, 309–317

Biro P, Kneschke O, Theusinger OM (2015): Accuracy of calculated volatile agent consumption from fresh gas content. *Acta Anaesthesiol Scand* 59, 619–624

Bito H, Ikeuchi Y, Ikeda K (1997): Effects of low-flow sevoflurane anesthesia on renal function: comparison with high-flow sevoflurane anesthesia and low-flow isoflurane anesthesia. *Anesthesiology* 86, 1231–1237

Brower RG, Matthay MA, Morris A, Schoenfeld D, Thompson BT, Wheeler A (2000): Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. The Acute Respiratory Distress Syndrome Network. *N Engl J Med* 342, 1301–1308

Burns WB, Eger EI (2011): Ross C. Terrell, PhD, an Anesthetic Pioneer: *Anesth Analg* 113, 387–389

Cadi P, Guenoun T, Journois D, Chevallier J-M, Diehl J-L, Safran D (2008): Pressure-controlled ventilation improves oxygenation during laparoscopic obesity surgery compared with volume-controlled ventilation. *Br J Anaesth* 100, 709–716

Conzen P, Hobbhahn J: *Sevofluran-Kompodium: Inhalationsanästhetikum*. Neuauflage; Abbott, Wiesbaden 2008

De Baerdemaeker LEC, Van der Hertten C, Gillardin JM, Pattyn P, Mortier EP, Szegedi LL (2008): Comparison of Volume-controlled and Pressure-controlled Ventilation during Laparoscopic Gastric Banding in Morbidly Obese Patients. *Obes Surg* 18, 680–685

De Cooman S, Hendrickx JF, Peyton P, Demeere J-L, De Wolf AM (2014): Agent consumption with the Zeus® in the automated closed circuit anesthesia mode with O₂/air mixtures. *BMC Res Notes* 7, 469

De Hert SG, Turani F, Mathur S, Stowe DF (2005): Cardioprotection with volatile anesthetics: mechanisms and clinical implications. *Anesth Analg* 100, 1584–1593

De Wolf AM, Hendrickx JFA (2016): Let's reduce fresh gas flow (seriously!). *Minerva Anesthesiol* 82, 149–150

Dehouwer A, Carette R, De Ridder S, De Wolf AM, Hendrickx JFA (2016): Accuracy of inhaled agent usage displays of automated target control anesthesia machines. *J Clin Monit Comput* 30, 539–543

Dion JM, McKee C, Tobias JD, Sohner P, Herz D, Teich S, Rice J, Barry N diris, Michalsky M (2014): Ventilation during laparoscopic-assisted bariatric surgery: volume-controlled, pressure-controlled or volume-guaranteed pressure-regulated modes. *Int J Clin Exp Med* 7, 2242–2247

Doi M, Ikeda K (1993): Airway irritation produced by volatile anaesthetics during brief inhalation: comparison of halothane, enflurane, isoflurane and sevoflurane. *Can J Anaesth* 40, 122-126

Eger EI, Saidman LJ, Brandstater B (1965): Minimum alveolar anesthetic concentration: a standard of anesthetic potency. *Anesthesiology* 26, 756-763

Eger EI, Koblin DD, Bowland T, Ionescu P, Laster MJ, Fang Z, Gong D, Sonner J, Weiskopf RB (1997): Nephrotoxicity of sevoflurane versus desflurane anesthesia in volunteers. *Anesth Analg* 84, 160-168

Foldes FF, Ceravolo AJ, Carpenter SL (1952): The administration of nitrous oxide-oxygen anesthesia in closed systems. *Ann Surg* 136, 978-981

Gadani H, Vyas A (2011): Anesthetic gases and global warming: Potentials, prevention and future of anesthesia. *Anesth Essays Res* 5, 5-10

Glahn KPE, Ellis FR, Halsall PJ, Muller CR, Snoeck MMJ, Urwyler A, Wappler F (2010): Recognizing and managing a malignant hyperthermia crisis: guidelines from the European Malignant Hyperthermia Group. *Br J Anaesth* 105, 417-420

Hendrickx JFA: Adding it up: maschine+agent+absorbent=? NAVAt - International Symposium on Automated Low Flow & Visual Drug Display Systems, Aalst, Belgien, 20.09.2013.

Hinz J, Rieske N, Schwien B, Popov AF, Mohite PN, Radke O, Bartsch A, Quintel M, Züchner K (2012): Cost analysis of two anaesthetic machines: „Primus®“ and „Zeus®“. *BMC Res Notes* 5, 3

Hönemann C, Hagemann O, Doll D (2013): Inhalational anaesthesia with low fresh gas flow. *Indian J Anaesth* 57, 345-350

Katoh T, Ikeda K (1987): The minimum alveolar concentration (MAC) of sevoflurane in humans. *Anesthesiology* 66, 301-303

Kharasch ED, Thorning D, Garton K, Hankins DC, Kilty CG (1997): Role of renal cysteine conjugate beta-lyase in the mechanism of compound A nephrotoxicity in rats. *Anesthesiology* 86, 160-171

Kleemann PP (1994): Humidity of anaesthetic gases with respect to low flow anaesthesia. *Anaesth Intensive Care* 22, 396-408

Kuestermann J, Kranke P, Brederlau J, Roewer N, Muellenbach R (2009): Intraoperative Beatmung – Welches Tidalvolumen sollte bei lungengesunden Patienten angewandt werden? Eine qualitativ-systematische Übersichtsarbeit. *AINS - Anästhesiol · Intensivmed · Notfallmedizin · Schmerzther* 44, 404-411

Langbein T, Sonntag H, Trapp D, Hoffmann A, Malms W, Röth EP, Mörs V, Zellner R (1999): Volatile anaesthetics and the atmosphere: atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. *Br J Anaesth* 82, 66–73

Lortat-Jacob B, Billard V, Buschke W, Servin F (2009): Assessing the clinical or pharmaco-economical benefit of target controlled desflurane delivery in surgical patients using the Zeus anaesthesia machine. *Anaesthesia* 64, 1229–1235

Mapleson WW (1996): Effect of age on MAC in humans: a meta-analysis. *Br J Anaesth* 76, 179–185

Morio M, Fujii K, Satoh N, Imai M, Kawakami U, Mizuno T, Kawai Y, Ogasawara Y, Tamura T, Negishi A (1992): Reaction of sevoflurane and its degradation products with soda lime. Toxicity of the byproducts. *Anesthesiology* 77, 1155–1164

Moyers J (1953): A nomenclature for methods of inhalation anesthesia. *Anesthesiology* 14, 609–611

Ryan SM, Nielsen CJ (2010): Global Warming Potential of Inhaled Anesthetics: Application to Clinical Use: *Anesth Analg* 111, 92–98

Schmidt CE, Möller J, Hesslau U, Bauer M, Gabbert T, Kremer B (2005): Universitätskliniken im Spannungsfeld des Krankenhausmarktes. *Anaesthesist* 54, 694–702

Statistisches Bundesamt. Kostennachweis der Krankenhäuser. Fachserie 12 Reihe 6.3. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden 2018

Striebel HW: Die Anästhesie: Grundlagen, Formen der Allgemeinanästhesie, Lokal- und Regionalanästhesie, Besonderheiten, Narkoseprobleme, Nebenerkrankungen. 2., vollst. überarb. und erw. Auflage; Schattauer, Stuttgart 2010

Van Allen NR, Krafft PR, Leitzke AS, Applegate RL, Tang J, Zhang JH (2012): The role of Volatile Anesthetics in Cardioprotection: a systematic review. *Med Gas Res* 2, 22

Virtue RW (1974): Minimal-flow nitrous oxide anesthesia. *Anesthesiology* 40, 196–198

Waeschle RM, Sliwa B, Jipp M, Pütz H, Hinz J, Bauer M (2016): Leistungsentwicklung eines universitären OP-Bereichs nach Implementierung eines zentralen OP-Managements. *Anaesthesist* 65, 615–628

Wallin RF, Regan BM, Napoli MD, Stern IJ (1975): Sevoflurane: a new inhalational anesthetic agent. *Anesth Analg* 54, 758–766

Wild M, Herges S (2000): Total Cost of Ownership (TCO) – Ein Überblick, in: *Arbeitspapiere WI*, Nr. 1/2000, Hrsg.: Lehrstuhl für Allg. BWL und Wirtschaftsinformatik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz 2000

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. José Maria Hinz für die sehr gute Betreuung und Möglichkeit, diese klinisch-praktische Dissertationsarbeit unter seiner Supervision durchführen zu können.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Kinderchirurgie, Herrn Wollner und Herrn Züchner vom medizintechnischen Service, sowie allen weiteren Personen, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben, recht herzlich bedanken.