

## Maschinelle Autotransfusion kleiner Blutvolumina: Möglichkeiten und Grenzen von ELECTA, CATS und OrthoPAT\*

### Processing small volumes in blood salvage: Characterization of ELECTA, CATS and OrthoPAT

E. Hansen, J. Kling und G. Roth

Klinik für Anästhesiologie, Universitätsklinikum Regensburg (Direktor: Prof. Dr. K. Taeger)

► **Zusammenfassung: Hintergrund:** Neue technische Entwicklungen wie eine kleine Latham-Glocke, ein kontinuierliches Autotransfusionssystem und ein handliches Gerät mit dynamischer Scheibe für eine postoperative Autotransfusion geben Hoffnung, maschinelle Autotransfusion auch bei kleinen Kindern einsetzen zu können. Die geringste Mindestmenge an Blut für eine effektive Retransfusion ist unter klinisch relevanten Bedingungen allerdings noch nicht evaluiert.

**Methodik:** Frisches Spenderblut mit einem Hämatokrit von 10% wurde verwendet, um ELECTA mit einer 55ml-Glocke (Sorin), CATS im Pädiatrie-Programm (Fresenius) und OrthoPAT (Haemonetics) zu testen. Das Blut wurde in Portionen von 20ml Erythrozyten angeboten und unter verschiedenen Bedingungen aufbereitet einschließlich der klinisch relevanten ersten Füllung und Unterbrechungen. Aus den Werten für Hämatokrit, freies Hämoglobin und Gesamteiweiß wurden Erythrozytenausbeute und Plasmaelimination berechnet.

**Ergebnisse:** Als Haupteinschränkung für Ausbeute und Verfügbarkeit erwies sich die erste Füllung. Die Erythrozytenausbeute war dabei deutlich eingeschränkt, während sie im weiteren Verlauf zwischen 86 und 96% lag. Um die ersten 30ml Erythrozyten herzustellen, benötigte ELECTA 42ml, CATS und OrthoPAT 62ml, bedingt durch den Totraum der Separationskammer bzw. des Reservoirs. Nach dieser ersten Füllung lag die Erythrozytenverfügbarkeit in den anschließenden Aufbereitungen deutlich höher und für die drei Geräte vergleichbar. Alle lieferten sie verlässlich hohe Plasmaauswaschraten.

**Schlussfolgerungen:** Ein Säugling muss einen Blutverlust von etwa 40% des geschätzten Blutvolumens ertragen, bevor ihm eine relevante Menge (10% des Blutvolumens) autolog retransfundiert werden kann. Demgegenüber erscheinen Geschwindigkeit, hoher Produkthämatokrit oder kontinuierliche Arbeitsweise von geringer klinischer Bedeutung. Alle drei Systeme sind demnach für die Aufbereitung kleiner Blutvolumina geeignet, wenn auch jedes noch das Potential zu einer weiteren Optimierung hat.

► **Schlüsselwörter:** Maschinelle Autotransfusion – Kinderchirurgie.

► **Summary: Background:** New technical developments such as a small Latham-bowl, a continuous autotransfusion system and a handy device with dynamic disc designed for postoperative autotransfusion raise hopes for a possible application of blood salvage in young children. However, the minimal blood volume for effective processing under clinically relevant conditions has yet to be determined.

**Methods:** Fresh blood from volunteer donations with a haematocrit of 10% was used to test ELECTA (Sorin) equipped with a 55ml bowl, CATS (Fresenius) in the paediatric program mode, and OrthoPAT (Haemonetics). 20 ml portions of RBC were added and processed under various conditions, including clinically relevant first filling and intermittent emptying. RBC recovery and plasma elimination were calculated from the haematocrit and free haemoglobin and total protein.

**Results:** The main impediment to recovery and availability is the first filling. There, RBC recovery was significantly reduced, while it subsequently varied between 86 and 96%. To produce the first 30ml of RBC ELECTA required 42ml, CATS and OrthoPAT 62ml owing to the dead space of the separation chamber or the reservoir, respectively. RBC availability was much higher in the subsequent processes, with only minimal differences between the three devices. They all consistently provided high plasma elimination rates.

**Conclusions:** A loss of 30-40% of the estimated blood volume must be tolerated by a young child or infant before enough autologous blood for a relevant transfusion (10% of its blood volume) can be made available. All three devices are suitable for the processing of small volumes, but all three have the scope for further optimization.

► **Keywords:** Blood Autotransfusion – Paediatric Surgery.

\* Rechte vorbehalten

## ► Einleitung

Eine erwartete lange Lebenszeit, in der sie an eventuellen Transfusionsfolgen zu leiden hätten, und eine erhöhte Anfälligkeit für Einwirkungen und Auswirkungen einer transfusionsbedingten Immunmodulation lassen Alternativen zur Fremdbluttransfusion für kleine Kinder und Säuglinge in besonderem Maße erstrebenswert erscheinen. Wegen der gesteigerten Empfindlichkeit gegenüber Flüssigkeitsverschiebungen und des geringen bluteinsparenden Effektes ist die normovolämische Hämodilution wenig hilfreich. Technische Schwierigkeiten und die geringere Kompensationsfähigkeit gegenüber der Belastung durch lagerungsgeschädigtes Blut schränken die Möglichkeiten für Eigenblutspenden erheblich ein. Daher stellt der Einsatz der maschinellen Autotransfusion (MAT) mit ihrer hohen Effizienz eine besonders attraktive Option dar. Sie wird allerdings begrenzt durch den anteilmäßig höheren Verlust in Tupfer und Tücher und durch die Mindestblutmenge, die apparativ für eine Blutaufarbeitung notwendig ist. Während für lange Zeit 300ml Blut als unterste Grenze für die Anwendung einer MAT galten [1-3], haben jüngere technische Entwicklungen, wie eine Latham-Glocke mit geringerem Fassungsvermögen [4], ein kontinuierlich arbeitendes Zellseparationsystem [5,6] und ein Gerät zur Verarbeitung von postoperativem Drainageblut [6,7], neue Möglichkeiten zur Aufbereitung kleiner Blutvolumina und damit zum Einsatz der maschinellen Autotransfusion auch bei kleineren Kindern eröffnet [8,9].

Die Einschätzungen in Übersichtsarbeiten zu dem Thema reichen von der kritischen Anmerkung, dass häufig bereits ein geringer Blutverlust in Relation zum Blutvolumen die Transfusion von allogenen Blutprodukten erforderlich macht, noch bevor das Wundblut wiederaufbereitet werden kann [8], bis zu der optimistischen Aussage, dass mit den modernen Autotransfusionsgeräten technisch die Aufbereitung von kleinen Wundblutmengen ab ca. 100ml möglich ist [9]. Blut und Wundblut unterscheiden sich gewöhnlich, so dass ohne Angabe eines Hämatokritwertes derartige Aussagen schwer nachvollziehbar sind. Booke und Reich [10] stellen in einem Übersichtsartikel fest, dass CATS u. a. wegen einer höheren Erythrozytenausbeute [11] gegenüber dem Dideco/Sorin-Gerät mit Latham-Glocke überlegen sei und dass mit beiden eine MAT auch bei Kindern unter 20kg Körpergewicht möglich ist [10]. In einem späteren, weitgehend wortgleichen Übersichtsartikel mit anderer Autorenzusammensetzung ist diese Einschätzung ohne neue Datenlage sogar auf weniger als 10kg ausgeweitet [12]. Bei der klinischen Anwen-

dung von MAT bei Säuglingen werden allerdings deutliche Einschränkungen berichtet. So konnte mit CATS bei der Operation von Kraniosynostosen an 120 Kindern mit einem mittleren Körpergewicht von 8 kg Fremdblut in begrenztem Maße (317 vs. 413ml) eingespart, in keinem der Fälle aber vermieden werden [13].

Experimentelle Arbeiten über die Aufbereitung kleiner Blutvolumina könnten demnach zu optimistische Ergebnisse erwarten lassen, wenn sie nur optimale Prozessbedingungen beinhalten. Außerdem erscheint die Verwendung von abgelaufenen Erythrozytenkonzentraten für derartige Untersuchungen [11] problematisch, da alle Parameter der Sedimentationsgleichung, wie Zellgröße, spezifisches Gewicht oder Viskosität gegenüber Patientenblut verändert sind [14]. Bei der Berechnung der Erythrozytenausbeute ist zudem zu beachten, dass sie bei CATS durch Übertritt von Erythrozyten aus dem Trog der Separationskammer falsch hoch ausfallen kann, andererseits bei Systemen mit Latham-Glocke zu niedrig, je nachdem wie die Testblutmenge mit dem Glockenvolumen übereinstimmt. Wichtiger als ein Gerätevergleich erscheint eine genauere Charakterisierung der MAT-Geräte bei der Verarbeitung kleiner Blutvolumina. Vor allem sind dabei klinisch relevante Bedingungen zu berücksichtigen: ein unterschiedlicher, oft niedriger Wundblut-Hämatokrit, der diskontinuierliche Anfall von Wundblut, der Erythrozytenverlust in Toträumen wie Reservoir und Waschsysteem, die Notwendigkeit zur Verarbeitung von Restmengen durch die Toleranz auch einer halbvollen Glocke oder durch zwischenzeitliches Leeren, sowie vor allem die erste Füllung des Systems. Neben dem Zeitbedarf, dem erreichten Produkthämatokrit und der Plasmaauswaschrates sind als wichtige Parameter die Erythrozytenausbeute zu betrachten und die Erythrozytenverfügbarkeit, d.h. das Verhältnis von eingefüllter zu ausgegebener Erythrozytenmenge zu jedem Zeitpunkt. Nur damit sind die für die Anwendung der MAT bei kleinen Kindern wesentlichsten Fragen zu beantworten, nämlich welcher Anteil des Blutverlustes retransfundiert werden kann, und wie viel Blut ein Kind verlieren muss, bevor es die erste relevante, autologe Transfusion erhalten kann.

Wir haben die verfügbaren, am besten geeignet erscheinenden MAT-Geräte, ELECTA von Sorin mit einer 55ml-Glocke, das Continuous Autotransfusion System (CATS) von Fresenius und das OrthoPAT-Gerät mit Dynamic Disc von Haemonetics, mit frischem Spenderblut unter derartigen Bedingungen und bezüglich dieser Parameter untersucht. ►

## ► Methodik

Getestet wurde mit frischem Blut von freiwilligen Spendern. In 6 Versuchen wurden jeweils 5 ABO-blutgruppengleiche Blutspenden vereinigt, mit NaCl-Lösung auf einen Hämatokrit (Hkt) von 10% eingestellt und eine definierte Hämolyse von 5% zugefügt. Mit diesem Testblut wurden die Geräte ELECTA (Sorin, Italien) ausgestattet mit einer 55ml-Glocke (BT55, Sorin, Italien), das CATS (Fresenius, Deutschland) im Pädiatrie-Programm und OrthoPAT (Haemonetics, USA) untersucht. In das mit 200ml NaCl vorbenetzte jeweilige Reservoir wurde Blut entsprechend 30ml Erythrozyten und anschließend Portionen von 20ml Erythrozyten gefüllt und aufbereitet. Nachdem 90ml Erythrozyten zugesetzt waren, wurde ein vollständiges Aufarbeiten bzw. Leeren erzwungen. Im nun laufenden Betrieb wurde danach Blut mit 2x40ml Erythrozyten aufbereitet, bei CATS einmal mit und einmal ohne zwischenzeitliches Leeren des Systems. Schließlich wurde ohne Reservoir Blut direkt den Autotransfusionsgeräten zugeführt und auch Blut mit Hämatokrit 10% oder 5% aufbereitet. Bei OrthoPAT war dazu ein Dummy-Reservoir mit mehr als 200ml Flüssigkeit notwendig, um in den durchtrennten Schlauch zwischen Reservoir und Disk Blut einfüllen zu können. Aus den zugeführten und produzierten Volumina und Hämatokritwerten wurde die Erythrozytenausbeute berechnet, aus dem Vergleich der Konzentrationen von Gesamteiweiß bzw. freiem Hb, der Überstände die Plasmaauswaschrates. Die Zeitdauer bis zum Erscheinen des ersten Produkts und für die verschiedenen Aufbereitungen wurde gemessen.

## Ergebnisse

Die Aufbereitung durch ELECTA mit einer 55ml-Latham-Glocke lieferte ein gewaschenes Erythro-

zytenkonzentrat mit Hkt 50% (Tab. 1). Bei CATS oder OrthoPAT lag der Produkt-Hkt mit 70% bzw. 72% deutlich höher. Bis zum ersten Produkt benötigte ELECTA 15min, CATS nur 6min und OrthoPAT 8min, dann lagen allerdings unterschiedliche Mengen an Erythrozyten vor, nämlich bei ELECTA 30ml, bei CATS die ersten ml und bei OrthoPAT 10ml. Im Verlauf unterschieden sich die benötigten Zeiten, je nachdem, ob die Blutvolumina zur Glockengröße passten oder zusätzliche Resteaufbereitung und Leeren notwendig war (Tab. 1). Durchschnittlich verarbeitet ELECTA ca. 32ml Wundblut pro Minute, CATS 88ml/min und OrthoPAT 20ml/min, und die Geschwindigkeiten verhielten sich etwa wie 1:2:0,7.

Die Plasmaauswaschrates gemessen an Gesamteiweiß lag bei allen drei Geräten unter den verschiedenen Bedingungen reproduzierbar und mit geringer Streubreite immer über 99% (Tab.1). Die Elimination, ermittelt aus den Konzentrationen von freiem Hämoglobin, ergab niedrigere Werte und eine größere Streuung. Die Erythrozytenausbeute war bei den ersten Aufbereitungen eingeschränkt, am deutlichsten bei CATS und OrthoPAT, und verbesserte sich im weiteren Verlauf auf über 90% (Tab.1).

In **Abbildung 1** ist die Erythrozytenverfügbarkeit der Geräte abgebildet. Die Diagonale stellt die ideale Verfügbarkeit dar, bei der jeder Milliliter an Erythrozyten sofort wieder als Produkt verfügbar wäre. Tatsächlich nahm bei der ersten Füllung ELECTA erst 42ml Erythrozyten auf, bevor ein Produkt von 32ml bereitstand, und nach weiteren 31ml Einfuhr die nächste Portion. Das restliche Blut bis zur Gesamtmenge von 90ml Erythrozyten reichte nur zu einer halbvollen Glockenfüllung. OrthoPAT stellte nach 30ml Einfuhr das erste Produkt mit 10ml Erythrozyten bereit und nach jeweils 10ml erneute Portionen. Um ebenfalls insgesamt 90ml Erythrozyten zu verarbeiten, musste nach dem 7. Lauf mit „Verarbeiten bis ►

Tab. 1: Aufbereitung kleiner Blutvolumina mit ELECTA, CATS und OrthoPAT.

		ELECTA	CATS	OrthoPAT
<b>Produkt Hkt</b>		50 ±1 %	70 ±1 %	72 ±1 %
<b>Zeit</b>	bis erstes Produkt	15 min	6 min	8 min
	für etwa 50ml Ery	15 min	9 min	18 min
	für genau 50ml Ery	24 min	10 min	34 min
	für etwa 90ml Ery	26 min	14 min	36 min
	für genau 90ml Ery	34 min	16 min	48 min
<b>Plasmaauswaschrates</b>				
	Protein	99,5 ±0,2 %	99,2 ±0,3 %	99,5 ±0,1 %
	freies Hb	97,9 ±0,9 %	96,9 ±1,0 %	98,3 ±0,4 %
<b>Erythrozytenausbeute</b>				
	erste 90 ml	90,1 ±2,3 %	76,1 ±4,3 %	87,1 ±3,5 %
	im Verlauf	97,3 ±4,1 %	93,9 ±3,5 %	90,5 ±5,7 %

Hkt = Hämatokrit, Ery = Erythrozyten, Hb = Hämoglobin

Die Zeit für genau 50 oder 90ml Ery beinhaltet die vollständige Aufbereitung durch zusätzlich eine halbvolle Glocke bzw. Leeren.

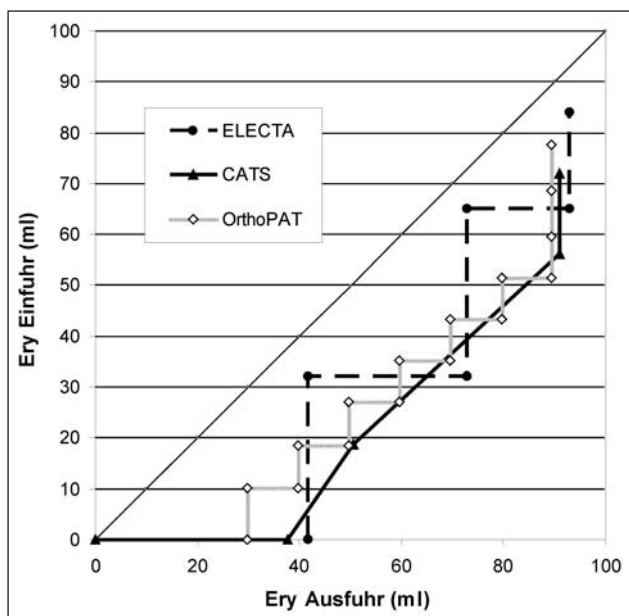


Abb. 1: Erythrozytenverfügbarkeit bei der ersten Füllung. ELECTA, CATS und OrthoPAT wurde Spenderblut mit Hkt 10% angeboten (n=6). Ery = Erythrozytenmenge.

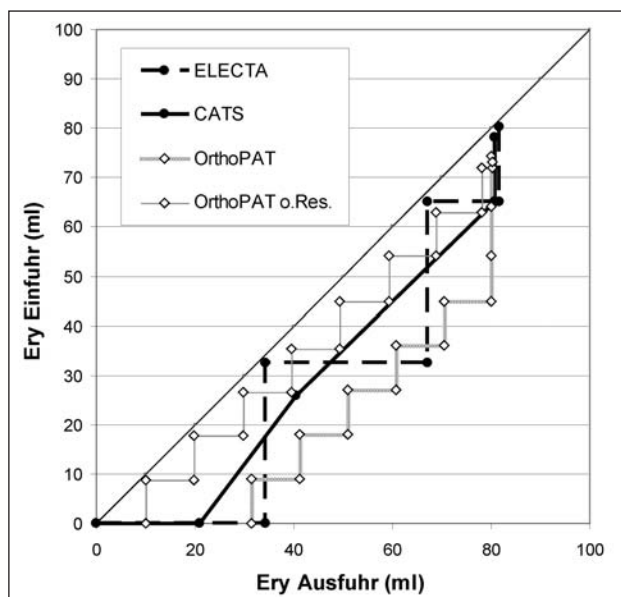


Abb. 2: Erythrozytenverfügbarkeit im laufenden Betrieb. ELECTA, CATS und OrthoPAT wurde Spenderblut mit Hkt 10% angeboten (n=6). OrthoPAT wurde mit Reservoir und Automatikstart betrieben oder mit „Aufbereiten bis Ende“ bzw. ohne Reservoir (o.Res.). Ery = Erythrozytenmenge.

► leer“ der Inhalt des Reservoirs in zwei Läufen vollständig geleert werden. Im Unterschied zu diesen stufenförmigen Aufbereitungsverläufen erschien mit CATS bei der ersten Füllung des Systems nach 38ml das erste Produkt, das dann in der Menge kontinuierlich anstieg. Das gesamte Produkt gab CATS erst nach Leeren des Systems frei.

Im weiteren Betrieb, d.h. mit schon einmal gefülltem System, ergaben sich deutlich günstigere Verläufe der Erythrozytenverfügbarkeit (Abb. 2). Nach jeweils 33ml Erythrozyten lieferte ELECTA Produkt. Um 80ml Erythrozyten aufzubereiten waren zweieinhalb Glockenfüllungen notwendig. CATS benötigte 21ml Erythrozyten zur Füllung des Systems, bevor es kontinuierlich Produkt lieferte, um am Ende mit Leeren diese Füllung wieder freizugeben. OrthoPAT begann erst nach 31ml Erythrozyten im Reservoir den automatischen Arbeitsgang in Schritten von etwa 10ml Erythrozyten (100ml Blut). Erst mit „Verarbeiten bis leer“ wurde auch der Inhalt des Reservoirs in zwei Portionen aufbereitet. Wenn gleich zu Beginn die Funktion „Verarbeiten bis leer“ gewählt wurde oder bei Einfüllen des Blutes ohne Reservoir („OrthoPAT o. Res.“ in Abb. 2), erfolgte die Aufbereitung von Anfang an in Schritten von 100ml Blut. Die Aufbereitung der restlichen ml bis auf 80ml Erythrozyten schließlich und v. a. die Aufbereitung von Testblut mit Hkt 5% führte das Gerät mit sehr unterschiedlicher Zahl und Abfolge von Füll- und Waschschritten aus.

## Diskussion

In mehreren Übersichtsarbeiten wurde die Anwendung der MAT bei Kindern diskutiert [1,3,8,9,10,12,]. Ohne Zweifel ist bei Schulkindern in vielen Fällen eine solche Anwendung sinnvoll und ohne Probleme möglich, etwa bei Skolioseoperationen [15,16]. Erst die Fokussierung auf Kleinkinder und Säuglinge wirft die Frage nach den kleinsten verarbeitbaren Wundblutmengen auf. Die Abschätzung anhand der Volumina der verfügbaren Separationskammern ist dabei nur eingeschränkt hilfreich. Vor allem sind Angaben über verwendbare Wundblutmengen, etwa eine Aussage, dass die intraoperative Aufbereitung von kleinen Wundblutvolumina ab oder sogar unter ca. 100ml mit den modernen Autotransfusionsgeräten möglich sei [9-12] nur im Zusammenhang mit einem bestimmten Hkt sinnvoll [8]. Aus diesem Grund haben wir Angaben in ml Erythrozyten zur Beschreibung der Aufbereitung mit MAT-Geräten verwendet. Aber selbst mit Angabe eines Hkt-Wertes bleiben Berechnungen aus dem Separationskammervolumen missverständlich, etwa Aussagen, dass bei CATS von einem Kammervolumen von 30ml auszugehen sei [9] und daher eine Aufbereitung von 30ml Wundblut [3,9] bzw. 15ml Erythrozyten [8] möglich sei. Daraus sind Berechnungen abgeleitet worden, dass mit CATS 72ml Wundblut aufbereitet und eine effektive MAT ab einem Körpergewicht von 5,7kg durchgeführt werden könne [9], was die klinische ►



► Erfahrung [13] und konkrete Messungen nicht bestätigen. Das angegebene Kammervolumen bezieht sich hier nämlich auf den Trog, der während des Arbeitsvorganges immer mit Erythrozyten gefüllt sein muss, so dass erst ein mehr an Blut zu einem Produkt führen kann. Das gesamte Kammervolumen wird z. T. mit 125ml angegeben [17]. Entsprechend haben wir selbst im Pädiatrieprogramm im laufenden Betrieb tatsächlich erst nach 21ml Erythrozyten den Beginn der ersten ml an Produkt beobachten können (Abb. 2), bei der ersten Füllung sogar erst nach 38ml (Abb. 1).

Experimentelle Arbeiten über die Verarbeitung kleiner Wundblutmengen liegen nur vereinzelt vor [11] und sind geprägt durch Messungen im laufenden Betrieb. Dadurch werden klinisch relevante Bedingungen, z.B. die erste Füllung des Systems, nicht abgebildet, die bei der Versorgung von Erwachsenen und Aufbereitung größerer Blutmengen keine Rolle spielen, beim Warten auf das erste transfundierbare autologe Blut aber sehr bedeutsam sind. Dies kann zu Aussagen führen wie etwa, dass CATS den anderen Geräten schon wegen einer Ausbeute nahe 100% überlegen sei [11]. In Wirklichkeit werden bei der ersten Füllung der MAT-Systeme mit keinem der Geräte derart hohe Rückgewinnungsraten erreicht (Tab. 1).

Die Testung mit frischem Spenderblut und unter verschiedenen Bedingungen erlaubt eine bessere Charakterisierung der einzelnen MAT-Geräte. Die gemessenen Parameter müssen in ihrer Bedeutung aber auch gewichtet werden. Ein Vorteil in einem hohen Produkthämatokrit [11] ist nicht zu erkennen, denn eine Volumenüberladung ist bei einem blutenden Kind eher unwahrscheinlich und ein hoher Hkt erhöht die Viskosität und die Verluste in Transfusionsbesteck und -leitung. Auch die Geschwindigkeit der Blutaufbereitung, in der sich die getesteten MAT-Geräte deutlich unterscheiden (s. Tab.1) und die zum Teil als erheblicher Vorteil von CATS angesehen wird [11], erscheint von geringer klinischer Bedeutung [9]. Der Blutverlust ist beim Kind geringer als beim Erwachsenen, die Operationszeit meist nicht, so dass er sich gewöhnlich auf mehrere Stunden verteilt. Rasche, große Blutverluste sind nicht typisch. Die Aufbereitung mit der 55ml-Glocke kann durch Erhöhung der Füll- und Waschrates und eine Verringerung des Waschvolumens beschleunigt werden. Damit konnte die Dauer eines Laufes von 10,6 auf 8,6min verkürzt werden, jedoch unter Inkaufnahme einer etwas geringeren Ausbeute und Auswaschrates. Dies kann daher nicht grundsätzlich empfohlen werden, bleibt aber als Option, falls wirklich einmal die Zeit der Aufbereitung kritisch erscheinen sollte. Das MAT-Gerät OrthoPAT, das am meisten Zeit für die

Aufbereitung benötigt, würde bei höherem Wundblut-Hkt schneller Produkt liefern, ein Lauf dauerte bei Hkt 20% 5,1min statt 7,7min. Ein Hkt von 10%, wie hier zur Testung verwendet, ist aber klinisch bei der intraoperativen Wundblutsammlung bei kleinen Kindern, insbesondere wenn Tupfer ausgewaschen werden, durchaus realistisch. Die dadurch bedingte Verlängerung der Füllphase wirkt sich klinisch nicht nachteilig aus.

Im Gegenteil, bei einem niedrigen Eingangs-Hkt ist die Plasmaauswaschrates erhöht, weil in der Separationsphase viel mehr Überstand verworfen wird. Bei OrthoPAT erhöht sich bei der geringeren Füllung der Disk mit Erythrozyten zusätzlich das Waschvolumen. So wiesen alle drei Systeme unter den verschiedenen Aufbereitungsbedingungen immer verlässlich eine sehr hohe Plasmaelimination auf (Tab. 1), ob gemessen an der Auswaschrates von Gesamteiweiß oder von freiem Hb. Dies stellt einen wichtigen Parameter dar, der mit der sicheren Reduktion aller bioaktiven Verunreinigungen des Wundblutes eine gute Qualität gewährleistet.

Solange diese Qualität eingehalten ist, kommt bei der Versorgung von kleinen Kindern der Ausbeute der Erythrozyten eine hohe Bedeutung zu, da sie mit darüber bestimmt, in welchem Ausmaß Fremdblut vermieden oder eingespart werden kann. Sie lag im laufenden Betrieb bei allen Geräten über 90%, wird aber bei der ersten Füllung der durch Verluste in Reservoir und System eingeschränkt (Tab. 1). Eine Ausbeute nahe 100%, die für CATS als besonderer Vorteil herausgestellt wurde [9], konnte nicht bestätigt werden. Zwar können bei diesem Gerät einzelne Messungen auch Ausbeuten von 100% und darüber ergeben, wie sie aus den veröffentlichten Daten einer experimentellen Arbeit berechnet werden können [11], weil Erythrozyten aus dem Trog der Separationskammer im Verlauf herausgespült und in einer folgenden Produktportion erscheinen können. Realistisch und korrekt sind solche Werte aber nicht, v. a. wenn die erste Füllung des Systems offensichtlich nicht berücksichtigt wird. Andererseits wird die Ausbeute mit einer Latham-Glocke nicht wahrhaft wiedergegeben, wenn je nach Nichtübereinstimmung von Testblut- und Glockenvolumen ein Teil gar nicht mit aufbereitet wird [11]. Dies ist aber möglich indem man halbvolle Glockenfüllungen zulässt. Dabei wurde zwar eine verminderte Plasmaelimination nachgewiesen [14,18] und Teilfüllungen entsprechend nicht empfohlen. Für eine MAT bei Kindern stellt sich die Situation aber etwas anders dar. Im Gegensatz zu Erwachsenen kann hier die Verarbeitung von Restblut über die Vermeidung einer Fremdblutgabe entscheiden, und die Auswaschrates ist durch den niedrigeren Wundblut-Hkt und die ►

► geringere Füllrate mit der 55ml-Glocke auch bei halbvoller Glocke nur minimal erniedrigt, in der vorliegenden Arbeit von 99,5 auf 99,0%. Daher kann die Verwendung halbvoller Glockenfüllungen bei Kindern als zwar unerwünscht, aber klinisch nicht relevant eingeschätzt [9], oder auch empfohlen werden [17]. Die Funktion „concentrate“, bei der eine teilgefüllte Glocke mit bereits gewaschenen Erythrozyten aufgefüllt wird, führt in diesem Fall kaum zu einer Eliminationsverbesserung, sondern dazu, dass die Ausbeute abnimmt und das Blut erst verzögert für eine Transfusion verfügbar ist.

Den wichtigsten Parameter bei der Versorgung von kleinen Kindern stellt jedoch die Verfügbarkeit des autologen Blutes dar, weil sie darüber entscheidet, wie viel Blutverlust vor einer autologen Transfusion toleriert werden muss oder ob davor schon eine Fremdbluttransfusion notwendig wird. Sie wird bei der Latham-Glocke eingeschränkt durch die diskontinuierliche Glockenfüllung, bei CATS durch die notwendige Trogfüllung und bei OrthoPAT im Automatikbetrieb durch das Reservoir. Entsprechend verläuft sie bei den diskontinuierlich arbeitenden Systemen stufenförmig, bei dem kontinuierlichen System hauptsächlich parallel zur Diagonale mit 100% Verfügbarkeit (Abb. 2). So liegt einmal die eine, einmal die andere Kurve näher an der Ideallinie, und die theoretische Überlegenheit des kontinuierlichen Systems bestätigt sich nicht. Es ist vorgeschlagen worden, die Erythrozytenverfügbarkeit bei CATS durch intermittierendes Leeren wann immer notwendig zu verbessern. In diesem diskontinuierlichen Betrieb ergab sich in der vorliegenden Untersuchung jedoch nur eine sehr vorübergehende Erhöhung der Verfügbarkeit, um anschließend weiter entfernt von der Ideallinie als im kontinuierlichen Betrieb zu liegen, und er ist wegen des einhergehenden erhöhten Verlustes nicht zu empfehlen.

Deutlich eingeschränkt ist die Verfügbarkeit für alle drei Geräte unter den klinisch relevanten Bedingungen der ersten Füllung von Reservoir und System (Abb. 1).

Hier zeigt sich, wie irreführend die Angaben von „Mindestblutmengen“ von 30ml für CATS und 20ml für OrthoPAT [9] sind, wenn unter klinisch relevanten Bedingungen tatsächlich erst nach 38ml bzw. 30ml Erythrozyten das erste Produkt erscheint. Ein Vorteil des kontinuierlichen Systems bei der Verarbeitung kleiner Blutmengen ist aus dem Verlauf der Verfügbarkeit nicht ersichtlich. Der funktionelle Totraum des Erythrozytentrogs bei CATS und des Reservoirs bei OrthoPAT führen so nicht nur zu einem erhöhten Verlust, sondern auch zu einer verzögerten Verfügbarkeit. Der portionsweise Anfall von Wundblut mit Unterbrechungen des Füllvorgangs trägt über eine

dichtere Erythrozytenfüllung in der Separationskammer ebenfalls zu dieser Verzögerung in der Freigabe von Produkt bei, wie sie auch in der klinischen Praxis regelmäßig beobachtbar ist. Dies sind nun aber durchaus die realen Bedingungen und Probleme bei der Anwendung von MAT bei kleinen Kindern, wo dringend das erste autologe Blut für eine Transfusion erwartet wird.

In diesem Zusammenhang sind Aussagen, dass CATS die effiziente Aufbereitung von Wundblut ermöglicht, wenn sogar weniger als 100ml verfügbar sind [10,12], wenig hilfreich, wenn danach vielleicht einmal gerade die ersten Milliliter eines Produktes erscheinen, die dann im Transfusionssystem versickern. Deshalb muss die Frage nach der Verfügbarkeit des ersten „relevanten“ Produktes gestellt werden. Unter der Annahme, dass für eine Transfusion eine Blutmenge von 10% des geschätzten Gesamtblutvolumens als relevant angesehen wird, wie sie für Erwachsene einer Transfusionseinheit entspricht, so errechnet sich für einen 6 oder 12 Monate alten Säugling ungefähr eine Erythrozytenmenge von 24 bzw. 30ml (Tab. 2). Aus Abb. 2 ist zu entnehmen, dass mit den MAT-Geräten ELECTA, CATS oder OrthoPAT dafür eine Einfuhr von 42ml, 58ml oder 50ml, bzw. 42ml, 62ml oder 62ml Erythrozyten notwendig war. Wenn nach allgemeiner Einschätzung in der Kinderchirurgie nur etwa 50% des intraoperativen Blutverlustes in das Reservoir aufgesammelt werden können, errechnet sich, dass dafür ein Blutverlust zwischen 85 und 120ml Erythrozyten in Kauf genommen werden muss, der 30-40%, bei einem halbjährigen Kind 35-50% des geschätzten Gesamtblutvolumens entspricht. Hierdurch wird meistens selbst ein niedrig angesetzter Transfusionstrigger von 70g/l Hb schon erreicht sein. Damit zeichnen sich die derzeitigen Grenzen der Anwendbarkeit von MAT bei kleinen Kindern ab.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass mit allen drei verfügbaren und hier getesteten MAT-Systemen die Aufbereitung kleiner Blutmengen in vergleichbarem Maße möglich ist. Die genauere Charakterisierung zeigt die speziellen Stärken und Schwächen auf und weist zudem in die Richtung, wie jedes einzelne Gerät weiter verbessert werden kann, nachdem keines bisher speziell für die Anwendung bei Kindern optimiert wurde. Für ELECTA mit der 55ml-Glocke könnte sie in einer Ausweitung der sensor- und softwarekontrollierten Verwendung teilgefüllter Glocken liegen, bei CATS in einem verminderten Volumen von Trog oder Separationskammer, nicht aber in einem diskontinuierlichen Betrieb, und für OrthoPAT in der Umgehung einer limitierten Reservoirfüllung im Automatikbetrieb. Letzteres ►

Tab. 2: Vergleich der Blutvolumina von Zirkulation, Transfusion und MAT bei Säuglingen.

Alter	6 Monate		12 Monate	
<b>Gewicht</b>	8 kg		10 kg	
<b>GBV (80ml/kg)</b>	640 ml		800 ml	
<b>GEV (30ml/kg)</b>	240 ml		300 ml	
<b>„relevante Transfusion“ (10% GEV)</b>	24 ml		30 ml	
<b>dafür notwendige Erymenge im Reservoir</b>	ELECTA	42 ml	ELECTA	42 ml
	CATS	58 ml	CATS	62 ml
	OrthoPAT	50 ml	OrthoPAT	62 ml
<b>dafür notwendiger Erythrozytenverlust (50% im Reservoir)</b>	ELECTA	85 ml	ELECTA	85 ml
	CATS	120 ml	CATS	120 ml
	OrthoPAT	100 ml	OrthoPAT	120 ml
<b>Entspr. % GBV</b>	ELECTA	35 %	ELECTA	30 %
	CATS	50 %	CATS	40 %
	OrthoPAT	42 %	OrthoPAT	40 %

GBV = geschätztes Gesamtblutvolumen

GEV = geschätztes Gesamterthrozytenvolumen.

► Gerät weist trotz der geringen Geschwindigkeit und des auf orthopädische Operationen ausgelegten Reservoirs mit einem kurzen und dünnen Schlauchsystem schon günstige Voraussetzungen für eine Adaptation auf. Für eine erfolgreichere Anwendung der MAT bei kleinen Kindern ist aber v. a. eine Erhöhung der Sammelausbeute etwa durch Verwendung von Folientaschen und die Vermeidung unnötiger Verluste an Wundblut nötig. Dies kann erreicht werden durch Minimierung von Tupfen zugunsten von Saugen, Auswaschen von blutigen Tupfern [19,20], durch Kürzen der Saugleitung, die Wahl eines geeigneten Reservoirs z.B. aus der Kinderherzchirurgie, das Nachspülen des Reservoirs und durch ein Transfusionssystem mit vermindertem Volumen. Ebenso sollte erwogen werden, postoperatives Drainageblut mit einzubeziehen [21], wobei die maschinelle Aufbereitung unverzichtbar bleibt. Eine Vermeidung von Fremdblut ist jedoch nur realisierbar, wenn nach modernen Erkenntnissen und Empfehlungen auch für kleine Kinder perioperativ eine Anämie toleriert wird, mit einem Transfusionstrigger, wenn zusätzlich Anämiezeichen vorliegen, bei 80g/l Hb für Säuglinge über 4 Monaten [22] bzw. Hämoglobinwerte von 70g/l bei Säuglingen über 3 Monaten und von 80g/l bei Kleinkindern [23]. Doch selbst wenn eine Fremdbluttransfusion notwendig wird, erscheint der Aufwand einer MAT bei kleinen Kindern als Ergänzung gerechtfertigt, weil es mengenabhängige Transfusionsrisiken gibt und wegen der funktionell unübertroffenen Qualität der gewaschenen, frischen, autologen Erythrozyten aus MAT.

### Danksagung:

Die Untersuchung wurde mit freundlicher Unterstützung der Firmen Fresenius, Bad Homburg, Haemonetics, München, und Sorin, Mirandola/Italien, durchgeführt.

### Literatur

1. De Palma L, Luban LI. Autologous blood transfusion in pediatrics. *Pediatrics* 1990;85:125-128.
2. Michaelis G, Melzer C, Biscopio J, Hempelmann G. Maschinelle Autologe Transfusion (MAT) während orthopädischer Eingriffe bei Kindern. *Anaesthesist* 1995;44:501-507.
3. Mazzarello G, Lampugnani E, Carbone M, Rivabella, Ivani G. Blood saving in children. *Anaesthesia* 1998;53(suppl 2):30-32.
4. Altmeppen J, Kutz N, Ullrich H, Geiger P, Hansen E. Untersuchungen zur Effektivität einer 55 ml fassenden Autotransfusionsglocke. In: Mempel W, Mempel M, Endres W (eds.). *Aktuelles zur Eigenbluttransfusion. Hämatologie Vol.6.* München: Sympomed; 1997:194-199.
5. Florio G, Valbonesi M, Lercari G, Frisoni R, Pollicardo N, Beraudo S. The Fresenius continuous autotransfusion system (CATS): preliminary studies and application. *Int J Artif Organs* 1996;19:431-434.
6. Geiger P, Platow K, Bartl A, Völkl C, Junker K, Mehrkens HH. New developments in autologous transfusion systems. *Anaesthesia* 1998;53(suppl 2):32-35.
7. Clark CR, Spratt KF, Blondin M, Craig S, Fink L. Perioperative autotransfusion in total hip and knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 2006;21:23-35.
8. Kühbacher-Luz G, Innerhofer P. Autologe Transfusion bei Kindern - Fremdblutsparende Verfahren. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 2004;39:687-691.
9. Wirtz SP, von Bormann B, Reich A, Weber TP, Berendes E, Booke M. Intraoperative Aufbereitung von kleinen Wundblutmengen. *Anästhesiol Intensivmed* 2003;44:526-538.
10. Booke M, Reich A. Autotransfusion and blood-sparing techniques in infants and children. *Curr Opin Anaesth* 2000;13:303-306.

- ▶ **11. Booke M, Hagemann O, van Aken H, Erren M, Wüllenweber J, Bone HG.** Intraoperative autotransfusion in small children: An in vitro investigation to study its feasibility. *Anesth Analg* 1999; 88:763-765.
- 12. Weber TP, Große Hartlage MA, Van Aken H, Booke M.** Anaesthetic strategies to reduce perioperative blood loss in paediatric surgery. *Eur J Anaesth* 2003;20:175-181.
- 13. Dahmani S, Orliaguet G, Meyer PG, et al.** Perioperative blood salvage during surgical correction of craniosynostosis in infants. *Br J Anaesth* 2000;85:550-555.
- 14. Hansen E, Bechmann V, Altmeppen J, Wille J, Roth G.** Ergebnisqualität bei der Maschinellen Autotransfusion und Einflussfaktoren. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 2004;39:569-575.
- 15. Hansen E, Pollwein B, Martin E, Heim MU, Horst S, Matzen KA, Peter K.** Autologe Transfusion bei Skolioseoperationen: Präoperative Eigenblutspende und intraoperative maschinelle Autotransfusion. *Z Orthop* 1987;125:262-267.
- 16. Kuklo TR, Owens BD, Polly DW.** Perioperative blood and blood product management for spinal deformity surgery. *Spine J* 2003;3:388-393.
- 17. Velardi F, Di Chirico A, Di Rocco C.** Blood salvage in craniosynostosis surgery. *Child's Nerv Syst* 1999;15:695-710.
- 18. Tremain KD, Stammers AH, Niimi KS, Glogowski KR, Muhle ML, Trowbridge CC, Yang T.** Effect of partial-filling autotransfusion bowls on the quality of reinfused product. *J Extra Corpor Technol* 2001;33:80-85.
- 19. Loeb T, Jean N, Roussi J, van Amerongen G, Nauciel C, Fraise D, et al.** Quality of blood salvaged in orthopedic surgery by washing swabs. *Ann Fr Anesth Reanim* 1998;17:291-295.
- 20. Haynes SL, Bennett JR, Torella F, McCollum CN.** Does washing swabs increase the efficiency of red cell recovery by cell salvage in aortic surgery? *Vox Sang* 2005;88:244-248.
- 21. Orliaguet GA, Bruyere M, Meyer PG, Blanot S, Renier D, Carli PA.** Comparison of perioperative blood salvage and postoperative reinfusion of drained blood during surgical correction of craniosynostosis in infants. *Paediatric Anaesthesia* 2003;13:797-804.
- 22. Roseff SD, Luban NLC, Manno CS.** Guidelines for assessing appropriateness of pediatric transfusion. *Transfusion* 2002;42:1398-1413.
- 23. Adams HA, Baumann G, Cascorbi I, Ebener C, Emmel M, Geiger S, et al.** Besonderheiten im Kindesalter: Empfehlungen zur Diagnostik und Therapie der Schockformen der IAG Schock der DIVI – Teil IV. *Anästhesiol Intensivmed* 2005;46:1-14.

### Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Dr. Ernil Hansen  
 Klinik für Anästhesiologie  
 Universitätsklinikum Regensburg  
 D-93042 Regensburg  
 Tel.: 0941 944 7823  
 Fax: 0941 944 7802  
 E-Mail: [ernil.hansen@klinik.uni-regensburg.de](mailto:ernil.hansen@klinik.uni-regensburg.de) ■