

4. DISKUSSION

4.1. KÄSTCHENMODELL

Das Material der für die Untersuchungen an den Kästchenmodellen verwendeten Adapter (Glas und Kunststoff) hatte keinen Einfluss auf die Messkurve der AR. Für die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse spielt die Ankopplung des Nasenadapters eine erhebliche Rolle (Lenders *et al.* 1992, Kase *et al.* 1994b, Fisher *et al.* 1995b). Der speziell angefertigte Glasadapter mit einer 1 cm² großen quadratischen Querschnittsfläche an der Modellseite eignete sich für die Untersuchungen besonders durch seine Passgenauigkeit.

In der AR-Messkurve stellen sich alle Kästchenmodelle zu klein dar. Dieser Fehler einer zu kleinen Darstellung nahm mit zunehmender Querschnittsfläche der Modell zu. In diesen Versuchen wurden Modelle mit Querschnittsflächen bis zu 5 cm² vermessen. In der menschlichen Nase finden sich aber nur Querschnittsflächen bis 2 cm². Deshalb ist dort kein großer Fehler zu erwarten.

Außerdem ist die AR auf Schallbedingungen eines mit Schleimhaut ausgekleideten Raumes kalibriert. Kästchen und Nasenmodelle sind aus schallharten Materialien. Bei Messungen am Menschen reduziert sich daher der Fehler weiter.

Terheyden (1993) hat bereits darauf hingewiesen, dass die Abbildung von plötzlichen Querschnittsflächenänderungen auf Grund der Dämpfung des Messsystems zu einem trägen Anstieg der Messkurve führt. Der Übergang des Adapters zum Modell ist eine solche plötzliche Querschnittsflächenänderung. Bei der Berechnung der mittleren Querschnittsflächen führt dies zu einer relativ zu kleinen Darstellung des Modellquerschnitts.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Veränderung der Querschnittsflächen bzw. des Volumens der nicht vermessenen Modellgegensite in einem zweikammerigen Kästchenmodell keinen Einfluss auf den Messkurvenverlauf in der vermessenen Modellkammer hat. Wir erklären uns dieses Ergebnis folgendermaßen: Die AR bildet als Messergebnis eine Flächen-Distanz-Kurve ab. Eine Abbildung der Querschnittsflächen der Modellgegensite kann also erst erfolgen, wenn der Schallimpuls die Untersuchungsseite bereits passiert hat. Auf Grund der dadurch verlängerten Laufzeit werden die Querschnittsflächen der Gegenseite erst wesentlich distaler als die der Untersuchungsseite abgebildet (Abbildung 37). Eine Querschnittsflächenänderung in der Modellgegensite hat aus gleichem Grunde nur einen Einfluss auf die Messkurve distal der zu vermessenden Seite (Abbildung 37). Diese Modelluntersuchungen lassen den Rückschluss zu, dass bei der AR-Messung der menschlichen Nase die Gegenseite keinen Einfluss auf das Messergebnis hat.

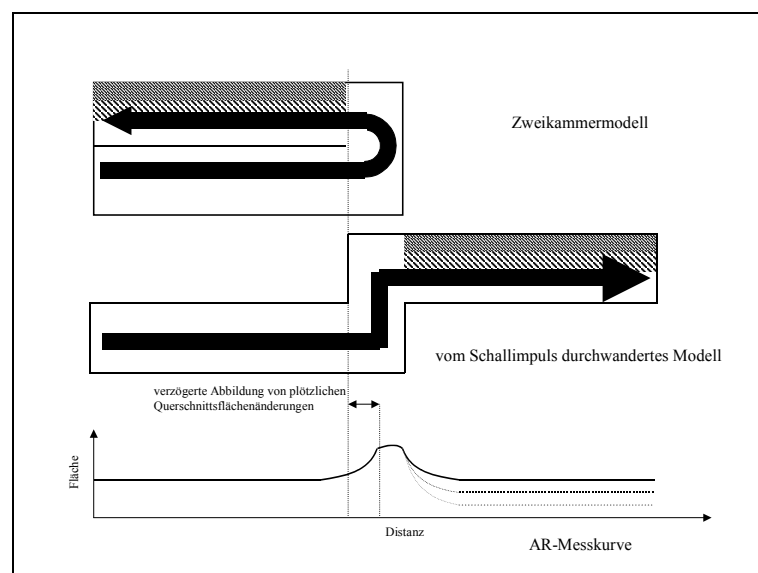


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Schallimpulsweges (Pfeil) und die dazugehörige Querschnittsflächenabbildung durch die idealisierte AR-Kurve bei verschiedenen Querschnittsflächen (Schraffur) der Gegenseite

Die Anbringung einer Nebenhöhle an das Kästchenmodell, die Veränderung des Volumens der Nebenhöhle sowie die Änderung des Durchmessers und der Länge

des Anschlusskanals der Nebenhöhle haben einen Einfluss auf die Messkurve. Die Vergrößerung des Nebenhöhlenvolumens, die Vergrößerung des Anschlusskanaldurchmessers sowie die Verkleinerung der Anschlusskanallänge vergrößern die gemessene Querschnittsfläche im posterioren Kästchenabschnitt, an der Position des Anschlusskanals beginnend. Es kommt zu einem allmählichen Anstieg des Flächenzuwachses bis zu einem maximalen Punkt, danach fällt der Flächenzuwachs wieder ab (siehe Abbildungen 8, 10 und 12). Das ist mit einer Schallreflexion an der Modellrückwand (entspricht der „Epipharynxhinterwand“) zu erklären. Zwischen den im Kästchen veränderten Parametern (Volumen, Durchmesser und Länge des Anschlusskanals sowie der „Muschel“) besteht eine sehr gute Korrelation zum maximalen Flächenzuwachs.

Auch hierbei muss der Schallimpulsweg berücksichtigt werden. Es kommt zu einer Verzweigung der Messkammern am Anschluss der Nebenhöhle. Im weiteren Kurvenverlauf wird also die Summe aus der Nebenhöhlenquerschnittsfläche und dem Modellquerschnitt abgebildet. Da es hinter extremen Stenosen zu einer Schallabschwächung des Messimpulses kommt (Hilberg *et al.* 1989, Terheyden 1993), ist keine vollständige Abbildung der Nebenhöhlen zu erwarten. Die Grenzwerte, ab denen mit kritischen Genauigkeitseinbußen der AR hinter Einengungen zu rechnen ist, liegen nach Experimenten von Hilberg und Terheyden unterhalb von 0,7 bis 0,8 cm² (Hilberg *et al.* 1989, Terheyden 1993). Dies entspricht zirkulären Querschnitten von 6,6 bis 7 mm Durchmesser. Die Nebenhöhle liegt hinter einer solchen Engstelle. Als Konsequenz sind der genauen Abbildung der Nebenhöhle in der Messkurve, deren Querschnittsflächen ja hinter der Stenose des Anschlusskanals liegen, physikalische Grenzen gesetzt.

Verständlich wird damit auch, dass nach Einbringen einer „Muschel“ vor die Öffnung des Anschlusskanals kaum noch eine Volumenänderung der Nebenhöhle in der AR Messkurve abgebildet wird. Ein „Muschel“-Abstand von beispielsweise 2 mm zur lateralen Kästchenwand (bei Kästchenquerschnitt von 1 cm^2) senkt den Querschnitt des Anschlusskanals bereits auf $0,2 \text{ cm}^2$ ab. Infolgedessen kann von einer derart hohen Schallabschwächung ausgegangen werden, sodass sich der Flächenzuwachs im posterioren Kästchenanteil stark der Varianz des Messverfahrens nähert.

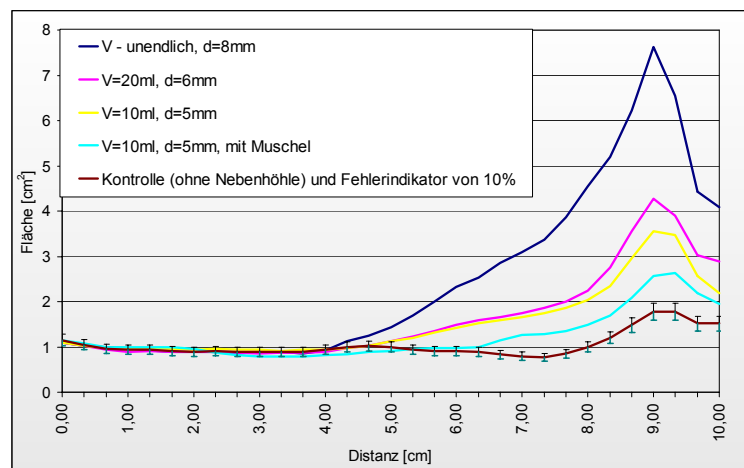


Abbildung 38: Vergleich der AR-Messkurven bei komplexer werdender Modellgestaltung (Länge des Anschlusskanals jeweils 5 mm)

In Abbildung 38 ist der Einfluss der Engstelle im Anschluss an die Nebenhöhle auf das AR-Messergebnis dargestellt. Bei allen Messungen wurde die Länge des Anschlusskanals mit 5 mm konstant gehalten. Die größte Abweichung findet sich bei unendlichem Nebenhöhlenvolumen und einem Anschlusskanaldurchmesser von 8 mm (dunkelblaue Kurve). Die Reduktion des Volumens auf 20 ml und die gleichzeitige Verringerung des Durchmessers auf 6 mm bewirkt einen deutlich kleineren Flächenzuwachs (orangerote Kurve). Eine weitere Verkleinerung des Volumens (10 ml) und des Durchmessers (5 mm) bedingt eine Reduktion der gemessenen Flächen im hinteren Kurvenverlauf (gelbe Kurve). Bei gleichem Volumen

(10 ml) und Durchmesser (5 mm) führt das Einbringen einer „Muschel“ im Abstand von 2 mm vor dem Anschlusskanal nur noch zu einem minimalen Flächenzuwachs (hellblaue Kurve). Des Weiteren beginnt die Kurvenänderung im letztgenannten Fall distaler und flacher, nämlich bei 5 cm, statt wie bisher bei 4 cm und steilem Anstieg. Dieses Ergebnis lässt erwarten, dass die Nasennebenhöhlen in der menschlichen Nase auf das Messergebnis der AR nur einen minimalen Einfluss haben.

4.2. NASENMODELLE

Die Abweichung der Messergebnisse aller Kontrollmessungen variierte für das Nasenmodell I zwischen 1,2% und 11,1% über den Gesamtverlauf der AR-Kurve. Diese Ergebnisse liegen weit unter den von Tomkinson und Eccles (1996a) bestimmten Werten von 20% als minimale Anforderung an die Reproduzierbarkeit von Messungen am Patienten. Die Werte entsprechen denen anderer Studien, welche vergleichbare Methoden an Modellen nutzten (Brooks *et al.* 1989 und Fisher *et al.* 1995b). Allerdings können die Daten nach Vermessung von Modellen, anatomischen Präparaten und Patienten nicht uneingeschränkt verglichen werden, da Faktoren wie Gaumenbewegung, Atemwegsgeräusche, Mukosaveränderungen und Patientenkooperation (Fisher *et al.* 1995b) das Messergebnis beeinflussen und damit die Reproduzierbarkeit am Patienten weitaus mehr begrenzen als am starren Nasenmodell.

Im Modell I wurden die zweite Nasenseite und die Mundhöhle hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die AR-Messkurve untersucht. Ähnlich wie im Kästchenmodell findet sich keine Veränderung des Kurvenverlaufs im posterioren Nasenabschnitt und Epipharynx. Als Ursache hierfür können die gleichen Betrachtungen wie im Diskussionsteil der Kästchenmodelle (Abschnitt 4.1., Absatz 3) angenommen werden. Eine Abbildung der Querschnittsflächen dieser Nebenhöhlen würde sich erst im weiteren Kurvenverlauf einer AR-Messkurve außerhalb der vom Messcomputer begrenzten Darstellung präsentieren.

Die Veränderungen an der Nebenhöhle im Nasenmodell zeigen ähnliche Effekte wie im Kästchenmodell. Die Verkürzung der Anschlusskanallänge, die Vergrößerung des Anschlusskanaldurchmessers und des Nebenhöhlenvolumens führen auch im

Nasenmodell zu einer Vergrößerung der gemessenen posterioren Querschnittsflächen. Im Gegensatz zum Kästchenmodell beginnt die Flächenänderung in den Nasenmodellen immer posterior der Septumhinterkante. Eine Ausnahme bildet das Kästchenmodell mit eingebrachter „Muschel“, welche den Nebenhöhlenanschluss kompliziert und den Flächenzuwachs dadurch ähnlich wie im Nasenmodell verzögert.

Für die Länge und den Durchmesser des Anschlusskanals ergeben sich gute Korrelationen zwischen dem maximalen Flächenzuwachs und den veränderten Parametern. Die Änderung des Flächenzuwachses in Abhängigkeit von der Kanallänge liegt bei 6,9 bis 14,3% und damit im Bereich der Fehlerbreite des Messverfahrens.

Die Veränderung des Nebenhöhlenvolumens führt in beiden Nasenmodellen zu einem Anstieg der Querschnittsfläche im posterioren Kurvenabschnitt. Eine direkte Volumenabhängigkeit der Querschnittsflächen kann nicht gefunden werden. Bei beiden Modellen findet sich ein ähnlicher mittlerer Querschnittsanstieg um 30% unabhängig vom Nebenhöhlenvolumen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Abbildung der Querschnittsfläche der Nebenhöhle auf der Messkurve sein. In den Experimenten an den Nasenmodellen wurden Einwegspritzen als „Nasennebenhöhle“ verwendet. Durch Bewegung des Stempels innerhalb der Spritze veränderte sich zwar das Gesamtvolumen der Nebenhöhle, nicht aber deren Querschnitt (Abbildung 39).

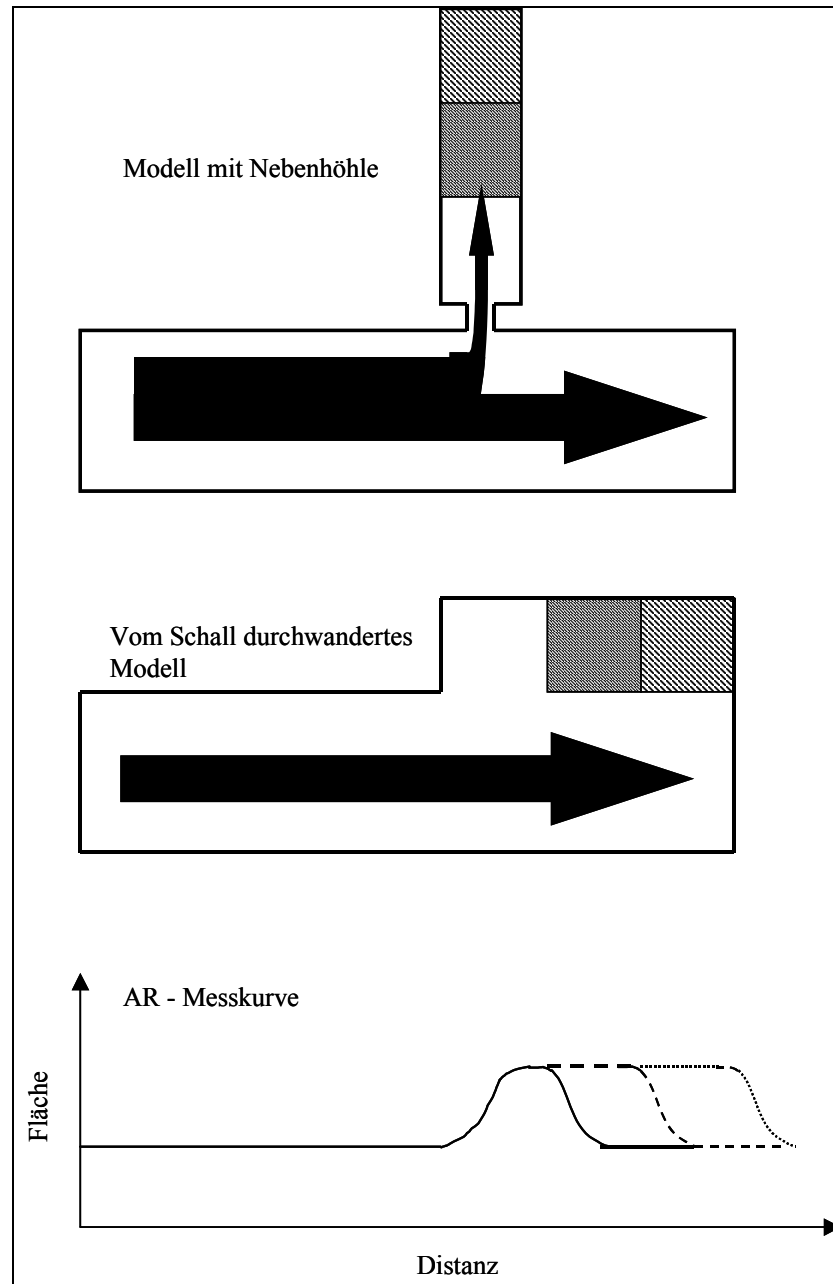


Abbildung 39: Schematische Darstellung des Schallimpulsweges (Pfeil) und die dazugehörige Querschnittsflächenabbildung in der AR-Kurve bei verschiedenen Nebenhöhlenvolumina (Schraffur)

Die Querschnittsflächen der Nebenhöhle addieren sich somit zur Querschnittsfläche des Naseninnenraumes des Modells. Die Vergrößerung des Nebenhöhlenvolumens durch Bewegung des Spritzenstempels kann deshalb auch nicht zu einem weiteren Anstieg der Querschnittsflächen führen. Unterstrichen wird diese Annahme dadurch, dass der Kurvenverlauf bei vorhandenem Nebenhöhlenvolumen fast parallel zur Kontrollkurve ohne Nebenhöhlenvolumen verläuft (vgl. Abbildungen 24 und 26).

Hierbei wird von der idealisierten Vorstellung ausgegangen, dass es unmittelbar am Anschlusskanals zu einer Richtungsänderung des Schallimpulses und somit zur Darstellung der Querschnittsflächen senkrecht zur Volumenschwerpunktachse kommt. Ein Teil des Kurvenverlaufs ergibt sich aber aus der längsgerichteten Abbildung der Nebenhöhlenquerschnittsfläche, welche sich sehr wohl durch Bewegung des Stempels ändert. Dies würde Abweichungen von der oben beschriebenen Darstellung erklären.

4.3. ANATOMISCHES PRÄPARAT

Die Untersuchungen am anatomischen Präparat bestätigen die an den Modellen gewonnenen Erkenntnisse. Eine Änderung des Epipharynxvolumens stellt sich im Kurvenverlauf der untersuchten Nasenseite nicht dar. Auch die Messergebnisse bei Veränderungen am Sinus maxillaris am anatomischen Präparat legen den Schluss nahe, dass die Dimensionen der osteomeatalen Einheit der entscheidende Faktor für die Darstellung der Nasennebenhöhlen in der AR-Kurve ist (Abbildung 40).

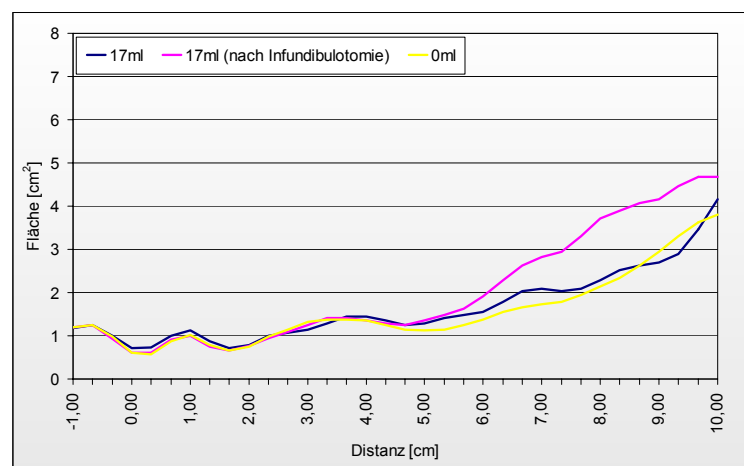


Abbildung 40: Messkurven am *anatomischen Präparat* mit maximalem Kieferhöhlenvolumen (17 ml) im Vergleich mit der Messkurve ohne Kieferhöhle

Während am Präparat mit unveränderter osteomeataler Einheit die Messkurven mit und ohne Sinus maxillaris nur in geringem Maße unterschiedliche

Querschnittsflächen abbilden, werden nach Infundibulotomie mit freigelegtem Sinus maxillaris deutlich größere Querschnittsflächen dargestellt. Die Engstelle „Infundibulum“ ist durch die Infundibulotomie beseitigt und damit eine Schallausbreitung in die Nebenhöhle vereinfacht. Ein paralleler Kurvenverlauf zur Kontrollkurve ist hier auf Grund der nicht rein zylindrischen Form des Sinus maxillaris unwahrscheinlich.

4.4. VERSUCHSPERSONEN

Die Untersuchungen an Versuchspersonen haben gezeigt, dass Veränderungen am Volumen der Nasennebenhöhlen im Wesentlichen nur zu scheinbaren Querschnittsflächenänderungen im Epipharynx führen. Ein Einfluss auf den Kurvenverlauf im Naseninnenraum konnte nur bei einer der sieben Personen nachgewiesen werden. Eine vom Volumen abhängige Querschnittsflächenänderung war nicht nachweisbar. Diese Ergebnisse bestätigen die Schlussfolgerungen aus den Modellversuchen, dass bei normaler Anatomie der Nase - wie bei den untersuchten Probanden der Fall - die Ungenauigkeit im posterioren Nasenabschnitt durch einen Einfluss der Nasennebenhöhlen nicht ausreichend erklärbar ist. Bei den meisten Individuen ist die akustische Impedanz des Nasennebenhöhlenanschlusses aufgrund von Muschel, Länge und Weite so groß, dass der Einfluss auf das AR-Ergebnis minimal ist. In einigen Fällen ist offenbar die akustische Impedanz so klein, dass es zu einem Flächenzuwachs in der posterioren Darstellung kommen kann. Der Flächenzuwachs von 30% innerhalb der Nase wie im Beispiel der Versuchsperson 1 ist nicht so erheblich. Für den großen Fehler bis 100% (Terheyden 1993, Terheyden *et al.* 2000) im hinteren Kurvenabschnitt müssen andere Ursachen diskutiert werden.

Da die Ostien der Nasennebenhöhlen erst 5 cm distal des Nasenlochs liegen, sind die Messungen der AR in jedem Falle bis 5 cm genau und verwertbar. Bei Berechnungen des Volumens der Nase mit der AR, z.B. im Allergentest (Lenders & Pirsig 1990b), sollte diese nur zwischen Isthmus und ca. 5 cm verwendet werden. Gerade bei Schwellungsänderung kann sich die akustische Impedanz an der osteomeatalen Einheit ändern. Dies könnte einen Schwelleffekt fälschlich zu klein und einen Abschwelleffekt fälschlich zu groß simulieren.

Um den Einfluss der osteomeatalen Einheit als limitierenden Faktor für die Abbildung der Nasennebenhöhlen im Kurvenverlauf der AR auch am Patienten besser zu verstehen, könnten für die Zukunft Untersuchungen an Patienten mit Zustand nach stattgehabter Nasennebenhöhlenoperation von Bedeutung sein.

THESEN

1. Im Bereich von 0 bis 5 cm konnten keine störenden Einflüsse auf die AR-Messkurve gefunden werden.
2. Die AR-Messkurve im posterioren Nasenabschnitt und im Epipharynx entspricht nicht den tatsächlich in der Nase vorkommenden Querschnittsflächen.
3. Die tendenziell zu groß dargestellten Querschnittsflächen im posterioren Nasenabschnitt und im Epipharynx sind teilweise auf eine Abbildung der Nasennebenhöhlen (NNH) zurückzuführen.
4. Die AR-Kurve posterior von der Einmündung der NNH ist ein Summationseffekt von Nebenhöhlenquerschnittsfläche und Querschnittsfläche des Naseninnenraumes.
5. Die Abbildung der NNH ist abhängig vom Volumen der Nebenhöhle und von der Länge und dem Durchmesser des Anschlusskanals.
6. Der limitierende Faktor für eine entsprechende Darstellung der Nebenhöhlen in der AR-Kurve ist die akustische Impedanz an der Engstelle mittlerer Nasengang und osteomeatale Einheit.
7. Vergrößerung des effektiven Lumens des mittleren Nasenganges sowie Verkürzung und Erweiterung des Zuganges zu den Nasennebenhöhlen erhöhen die Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen Abbildung der NNH im Bereich der Querschnittsflächen des posterioren Nasenabschnitts und des Epipharynx.
8. Bei normalen anatomischen Verhältnissen ist dieser Einfluss gering, aber vorhanden.

9. AR-Kurven mit großen posterioren Querschnittsflächen geben Hinweise auf ein großes Lumen der osteomeatalen Einheit oder stattgehabte NNH-Operationen.
10. Ein Einfluss der Mundhöhle und der Gegenseite der Nase auf die AR-Messkurven besteht nicht.