

## 6 Ergebnisse

### 6.1 AKUSTISCHE RASTERMIKROSKOPIE MIT DEM KSI SAM 100

#### 6.1.1 Untersuchungen am Hammer

##### 6.1.1.1 Qualitative Analyse

Es wurde von 17 Hämmern die Maximalwert- und Impedanzwertverteilung bei einer Ultraschallfrequenz von 25 MHz ermittelt. Abbildung 11 veranschaulicht die typische Verteilung der Maximalwerte des reflektierten Schalls in einem Hammerschnitt. Bereiche mit einer starken Reflexion der Ultraschallwellen sind hell und Abschnitte mit einer geringeren Reflexion dunkel dargestellt. Der Hintergrundgrauton ist ein Maß für die akustische Reflexion des Einbettungsmediums PMMA. Abbildung 12 zeigt die aus den Maximalwerten berechnete Verteilung der akustischen Impedanzwerte. Bereiche höherer akustischer Impedanz, z.B. im Bereich des Hammerkopfes, sind im roten Farbton dargestellt. Im Bereich des Hammergriffes sind Abschnitte mit niedriger akustischer Impedanz sichtbar (hellblauer Farbton).

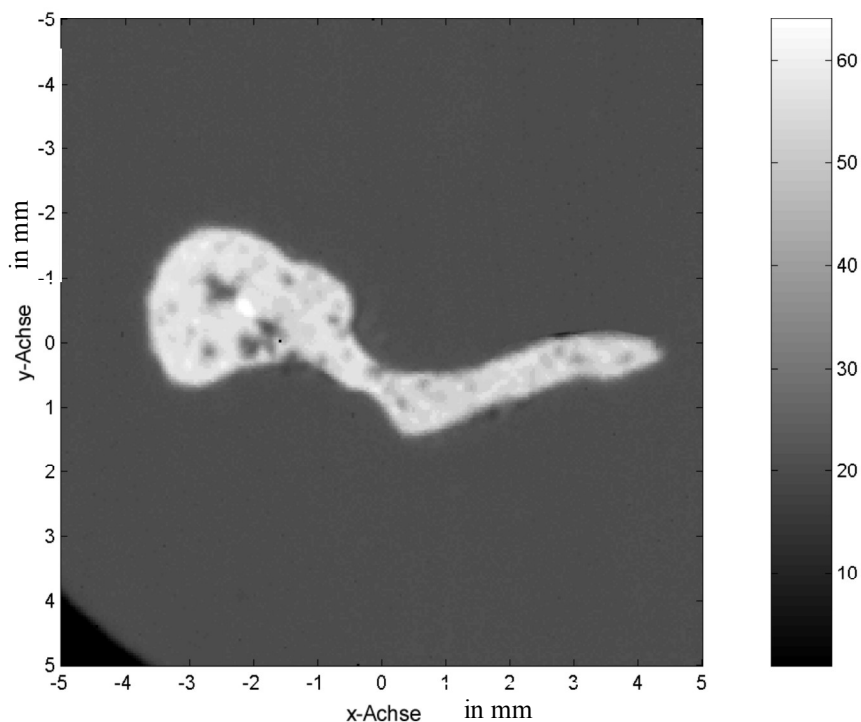


Abbildung 11: *Maximalwertverteilung in einem Hammerschnitt in Grauwerten (willkürliche Skala)*

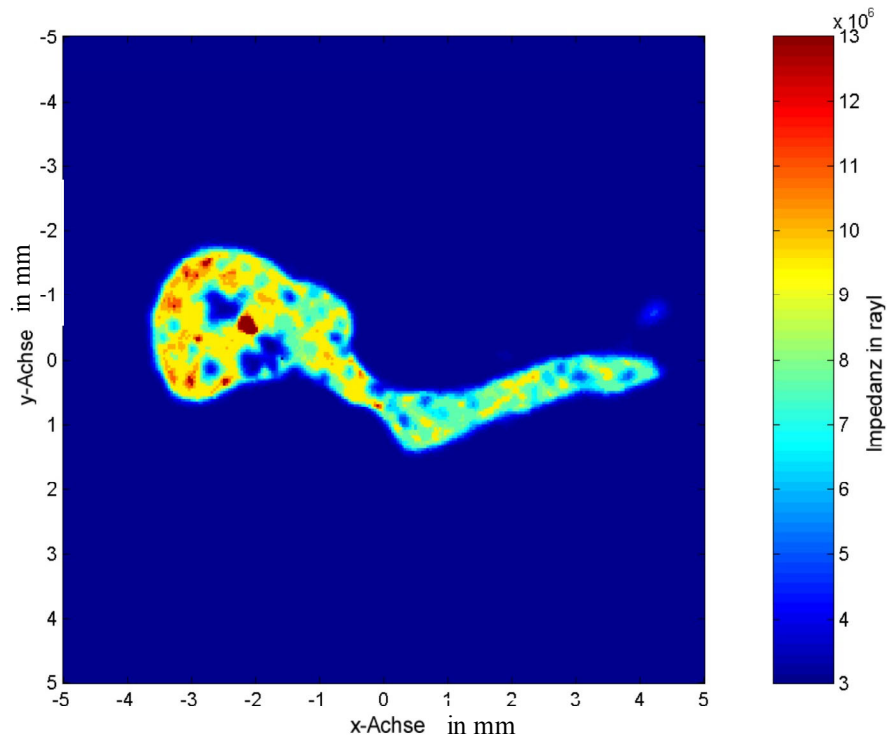


Abbildung 12: Impedanzwertverteilung in einem Hammerschnitt

### 6.1.1.2 Quantitative Analyse

Mit Hilfe der vom IMPB entwickelten Software wurden die Impedanzmittelwerte für die Schnittflächen durch den gesamten Hammeranschnitt, Region 1 (Caput) und Region 2 (Collum, Processus lateralis, Processus anterior, Manubrium) ermittelt. In Diagramm 1 ist die Verteilung der Messwerte für die einzelnen Regionen dargestellt.

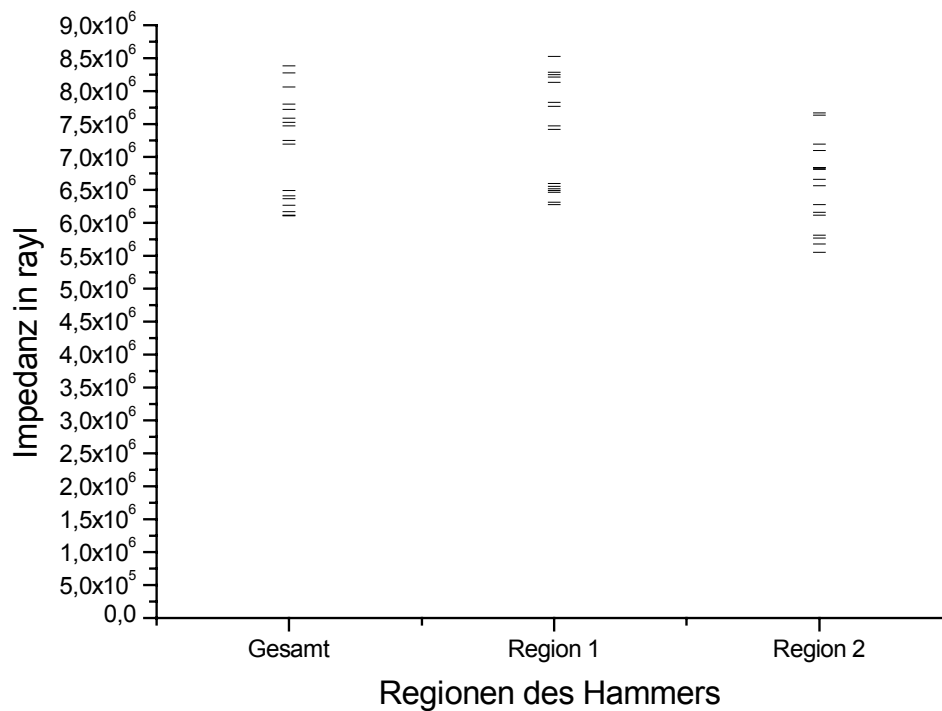


Diagramm 1: Punktdiagramm der Hammermesswerte

Die mittlere akustische Impedanz der gesamten Hammerschnittfläche betrug  $(7,13 \pm 0,80)$  Mrayl. Für Region 1 wurde eine mittlere akustische Impedanz von  $(7,42 \pm 0,91)$  Mrayl und für Region 2 eine mittlere akustische Impedanz von  $(6,5 \pm 0,65)$  Mrayl ermittelt. Der Unterschied der Impedanzmittelwerte für Region 1 und 2 war statistisch signifikant (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p=0,003$ ). In Diagramm 2 sind die Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für den gesamten Hammeranschnitt und die verschiedenen Regionen des Hammers dargestellt.

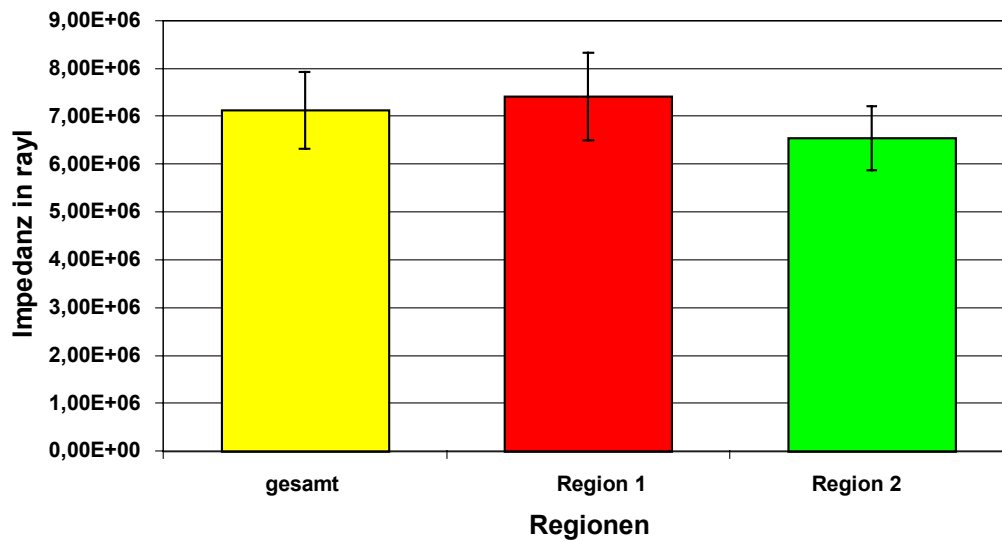


Diagramm 2: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Hammers ( $n=17$ )

Zur Untersuchung einer Altersabhängigkeit der akustischen Impedanz erfolgte die Einteilung in drei Altersklassen.

Klasse I:	< 60 Jahre	7 Messungen
Klasse II:	60-70 Jahre	6 Messungen
Klasse III:	>70 Jahre	3 Messungen

Ein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte zwischen den Altersklassen war nicht feststellbar (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p>0,1$ ).

## 6.1.2 Untersuchungen am Amboss

### 6.1.2.1 Qualitative Analyse

Es wurde von 19 Ambossen die Verteilung der Maximal- und Impedanzwerte bei einer Ultraschallfrequenz von 25 MHz ermittelt. Abbildung 13 verdeutlicht die Maximalwertverteilung des reflektierten Schalls in einem typischen Ambosslängsschnitt. Bereiche mit einer starken Reflektion der Ultraschallwellen sind hell und Abschnitte mit einer geringeren Reflektion dunkel dargestellt, wie sie z. B. im Bereich des Crus breve und Corpus zu sehen sind. Der Hintergrundgrauon wird durch das Einbettungsmedium PMMA

hervorgehoben. Abbildung 14 zeigt das aus dem Maximalwertbild ermittelte Impedanzverteilungsbild. Bereiche höherer Impedanz (roter Farbton, akustische Impedanz ca. 12 Mrayl) finden sich z. B. im Bereich des Crus breve.

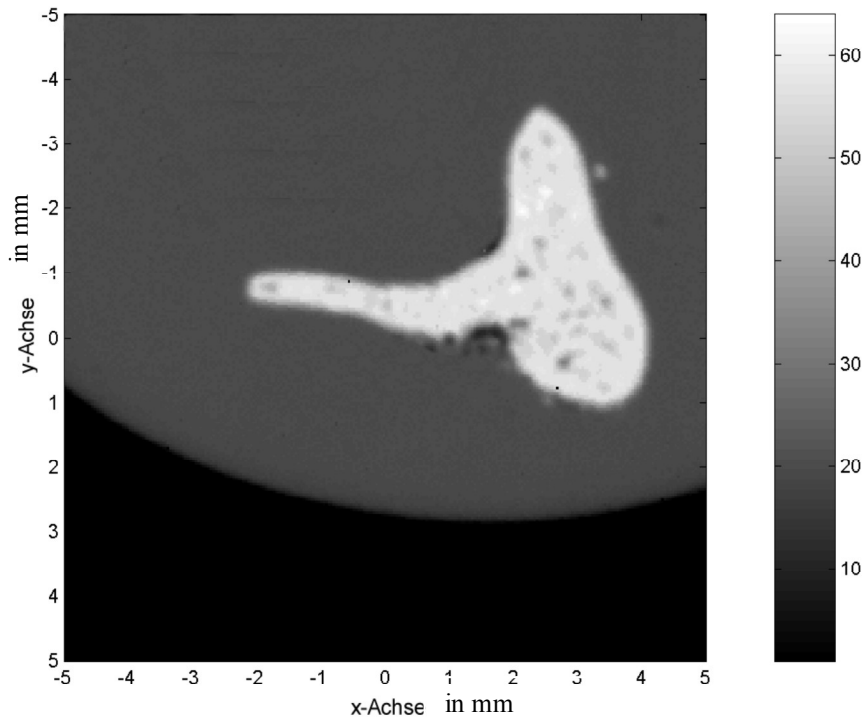


Abbildung 13: *Maximalwertverteilung in einem Ambosschnitt in Grauwerten (willkürliche Skala)*

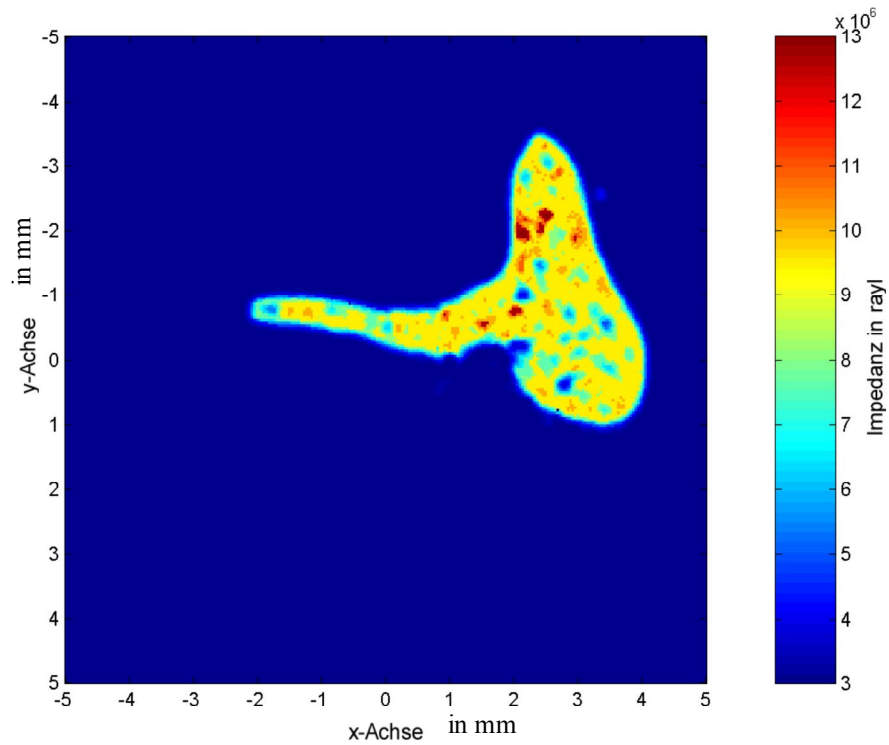


Abbildung 14: Impedanzverteilung in einem Ambossschnitt

### 6.1.2.2 Quantitative Analyse

Es wurden von 19 Ambossen die Impedanzmittelwerte bei einer Ultraschallfrequenz von 25 MHz ermittelt. In Diagramm 3 ist für die einzelnen Präparate die akustische Impedanz in rayl als Punktdiagramm dargestellt.

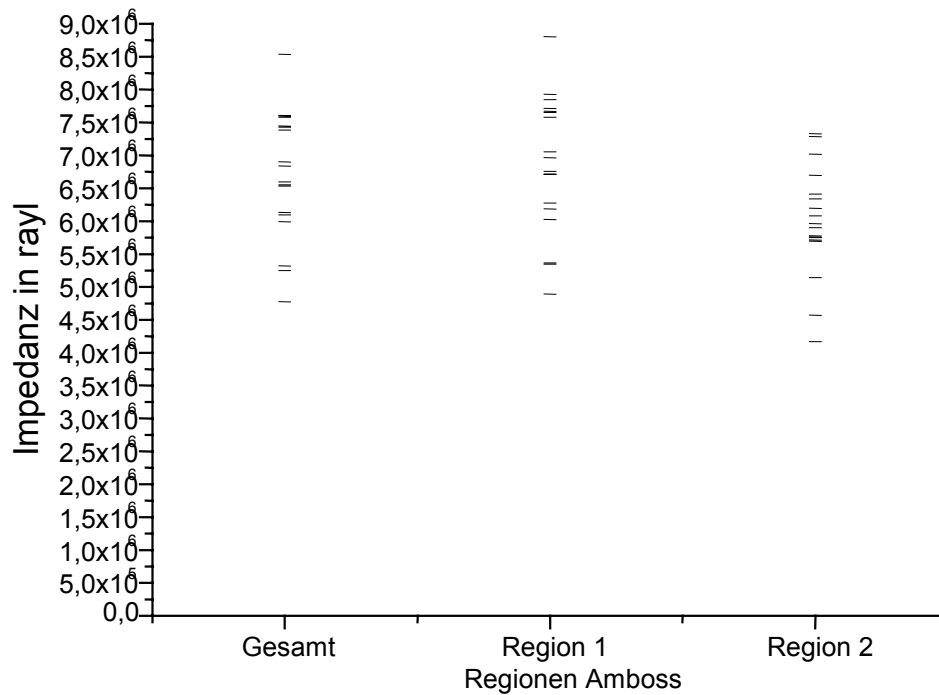


Diagramm 3: Punktdiagramm der Ambossmesswerte

Die Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung von 19 Ambossen zeigt Diagramm 4. Dabei betrug der Mittelwert der akustischen Impedanz der gesamten Ambossschnittfläche ( $6,74 \pm 0,97$ ) Mrayl, für Region 1 (Corpus, Crus breve) ( $6,90 \pm 1,03$ ) Mrayl und für Region 2 (Crus longum, Processus lenticularis) ( $6,04 \pm 0,84$ ) Mrayl. Der Unterschied der Impedanzmittelwerte von Region 1 und Region 2 war statistisch signifikant (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p=0,008$ ).

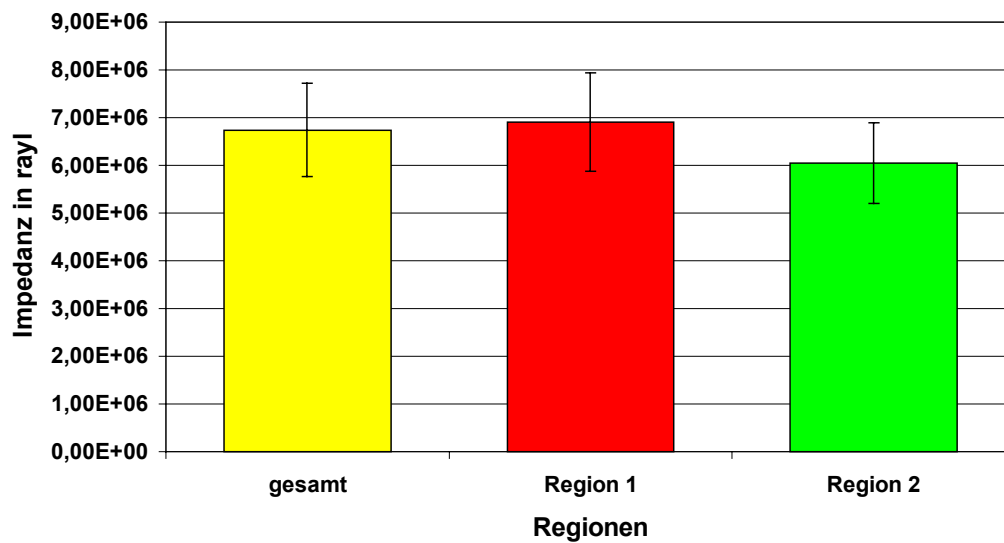


Diagramm 4: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Amboss (n=19)

Zur Untersuchung einer Altersabhängigkeit der akustischen Impedanz erfolgte die Einteilung in drei Altersklassen.

Klasse I:	< 60 Jahre	8 Messungen
Klasse II:	60-70 Jahre	7 Messungen
Klasse III:	>70 Jahre	5 Messungen

Ein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte zwischen den Altersklassen war nicht feststellbar (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p > 0,6$ ).

### 6.1.3 Untersuchungen am Steigbügel

#### 6.1.3.1 Qualitative Analyse

Es wurde von 5 Steigbügeln die Maximalwert- und Impedanzwertverteilung ermittelt und graphisch dargestellt. In Abbildung 15 ist die Maximalwertverteilung eines typischen Steigbügels zu sehen. Hellere Farbtöne findet man im Bereich der Fußplatte, welche dort auf eine starke Reflexion der Schallwellen hinweisen. In Abbildung 16 sieht man die Impedanzwertverteilung in diesem Steigbügel. Höhere akustische Impedanzen (gelber Farbton, ca. 10 Mrayl) findet man z.B. im Bereich der Fußplatte.

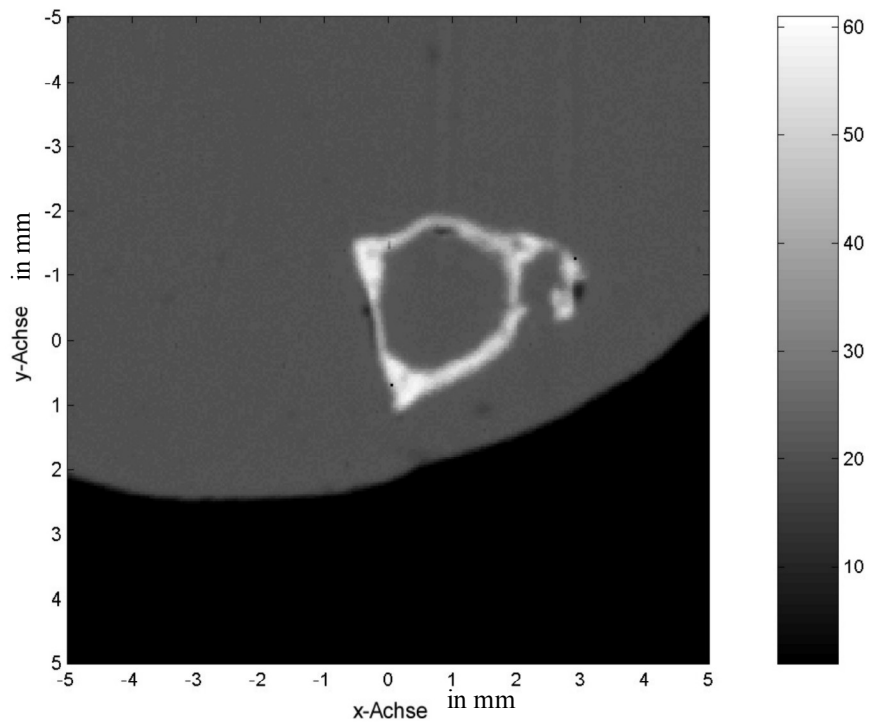


Abbildung 15: Maximalwertverteilung in einem Steigbügelschnitt in Grauwerten (willkürliche Skala)

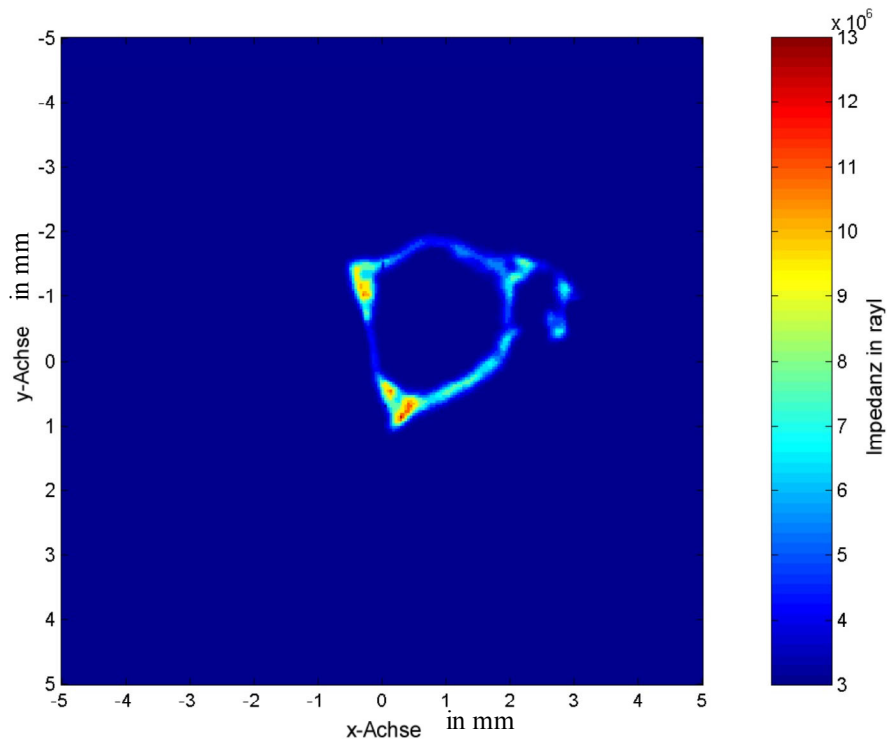


Abbildung 16: Impedanzverteilung in einem Steigbügelschnitt

### 6.1.3.2 Quantitative Analyse

Es wurden die Impedanzmittelwerte von 5 gesunden Steigbügelschnitten ermittelt. In Diagramm 5 ist die akustische Impedanz in rayl für die einzelnen Präparate als Punktdiagramm dargestellt.

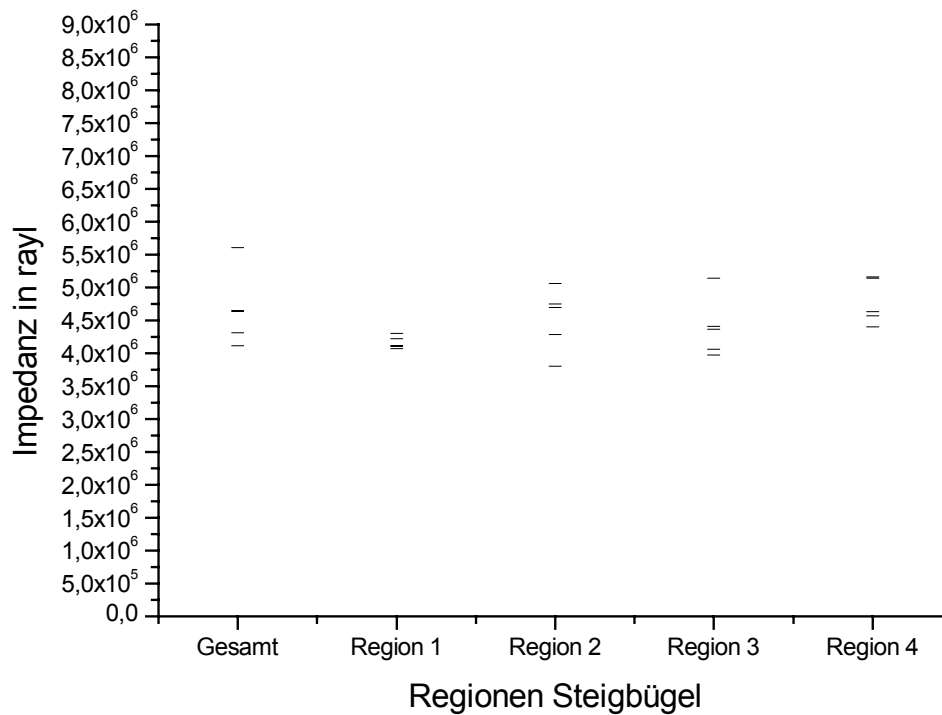


Diagramm 5: Punktdiagramm der Steigbügelmesswerte

Die daraus errechneten Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die einzelnen Regionen des Steigbügels zeigt Diagramm 6. Für die gesamten Steigbügelschnitte wurde eine mittlere akustische Impedanz von  $(4,67 \pm 0,57)$  Mrayl ermittelt. Für Region 1 (Caput) betrug die mittlere akustische Impedanz  $(4,16 \pm 0,01)$  Mrayl, für Region 3 (Crus anterior)  $(4,39 \pm 0,65)$  Mrayl, für Region 2 (Crus posterior)  $(4,52 \pm 0,65)$  Mrayl und für Region 4 (Basis)  $(4,78 \pm 0,54)$  Mrayl. Statistisch signifikant war nur der Unterschied der akustischen Impedanz zwischen Region 1 (Caput) und Region 4 (Basis) (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p=0,005$ ). Eine Untersuchung der Altersabhängigkeit der akustischen Impedanz war aufgrund der geringen Präparateanzahl nicht möglich.

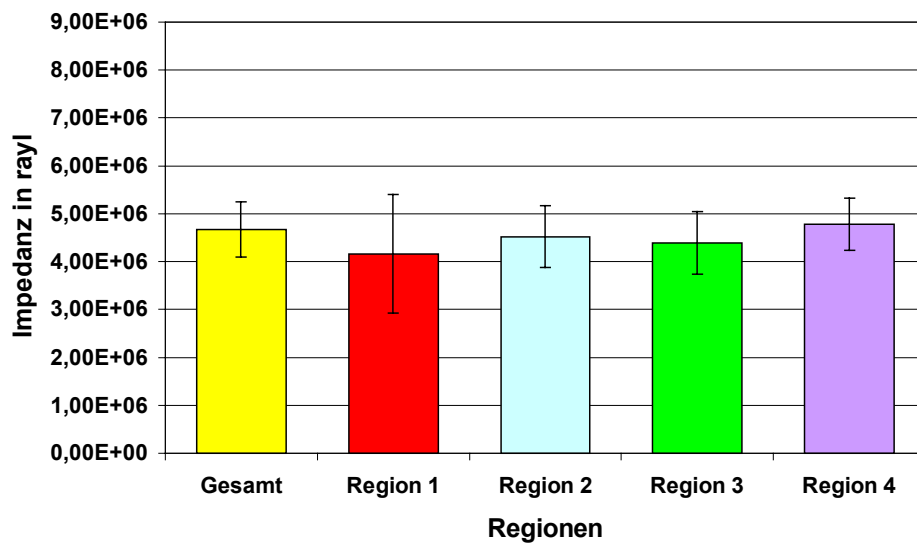


Diagramm 6: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Steigbügels ( $n=5$ )

## 6.2 AKUSTISCHE RASTERMIKROSKOPIE MIT DEM KSI SAM 2000

### 6.2.1 Untersuchungen am Hammer

#### 6.2.1.1 Qualitative Analyse

Es wurde mit dem Multi-Layer-Verfahren die Impedanzwertverteilung in einem Hammer bei 900 MHz ermittelt. Abbildung 17 bis Abbildung 20 zeigen repräsentative Bereiche (Caput, Collum, Hammer-Amboss-Gelenk und Manubrium) als Impedanzverteilungsbild. Bereiche höherer akustischer Impedanz sind im gelben und roten Farbton abgebildet (akustische Impedanz von ca. 4 Mrayl). Das Einbettungsmedium PMMA, welches am Rand und in den Lakunen sichtbar ist, weist eine akustische Impedanz von ca. 2,7 Mrayl auf.

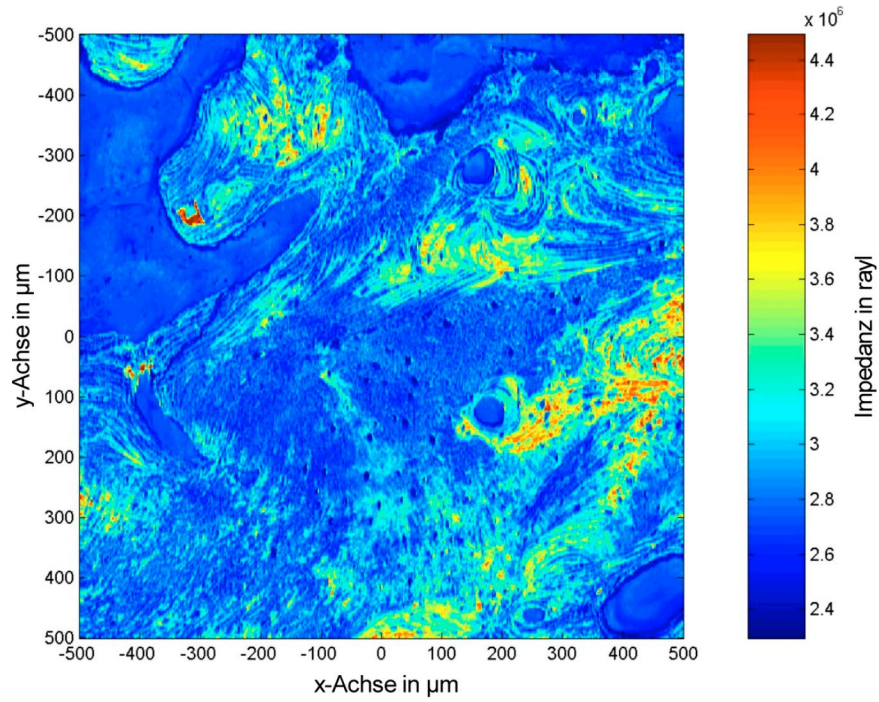


Abbildung 17: Impedanzverteilung, Ausschnitt Caput

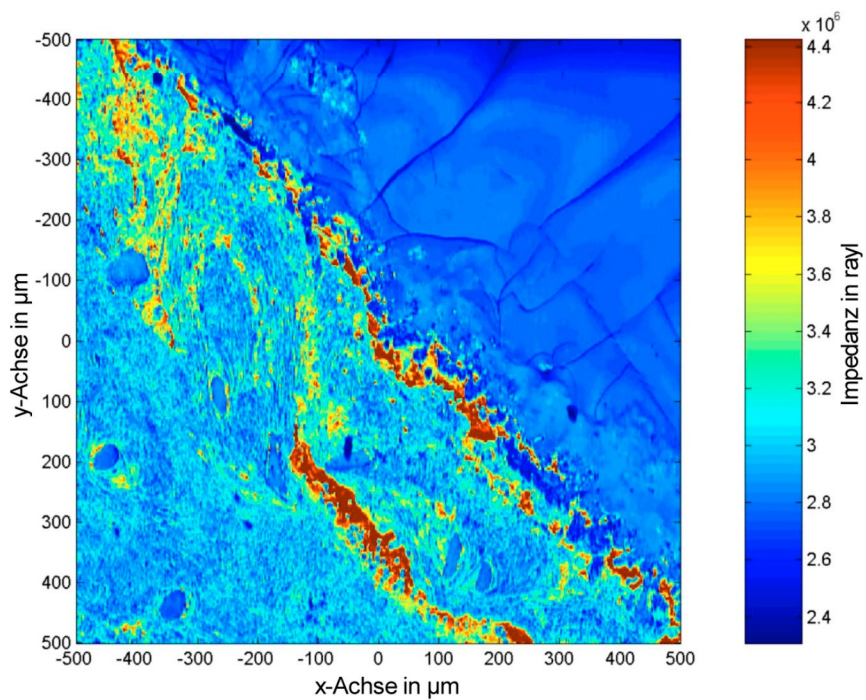


Abbildung 18: Impedanzverteilung, Articulatio incudomallearis

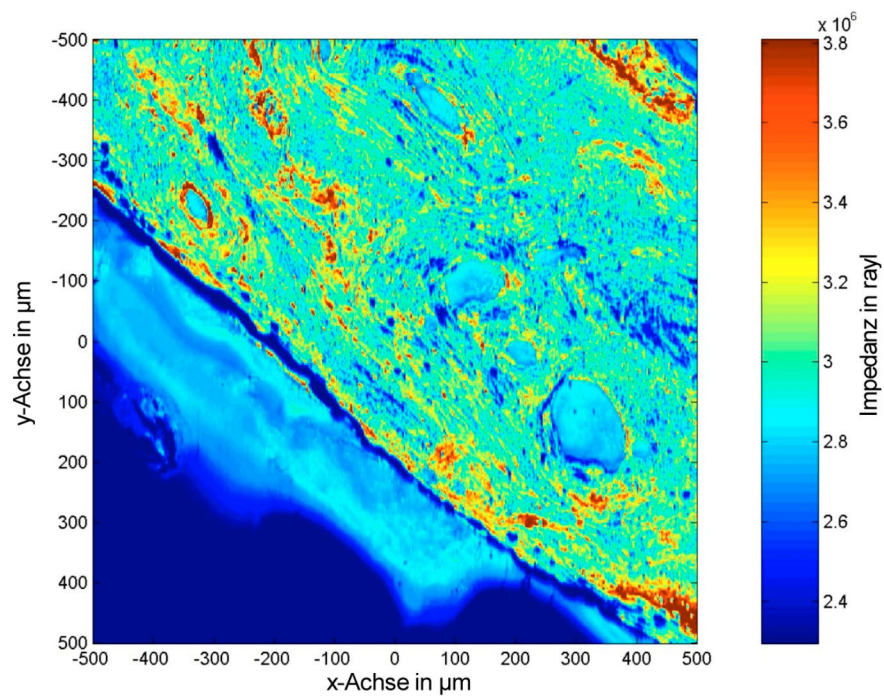


Abbildung 19: Impedanzverteilung, Ausschnitt Collum

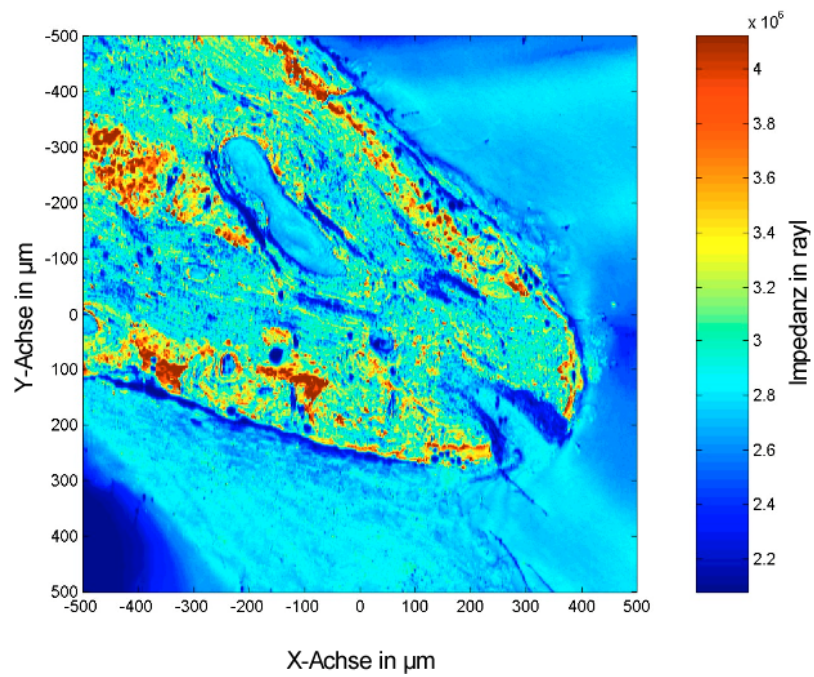


Abbildung 20: Impedanzverteilung, Ausschnitt Manubrium

### 6.2.1.2 Quantitative Analyse

Mit Hilfe der am IMPB entwickelten Software wurden die Impedanzmittelwerte für die Schnittflächen durch den gesamten Hammer, Region 1 (Caput) und Region 2 (Collum, Processus lateralis, Processus anterior, Manubrium) ermittelt. In Diagramm 7 sind die Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Hammers dargestellt. Dabei betrug die akustische Impedanz der gesamten Hammerlängsschnittfläche ( $3,23 \pm 0,28$ ) Mrayl. Für Region 1 wurde ein Mittelwert der akustischen Impedanz von ( $3,42 \pm 0,30$ ) Mrayl und für Region 2 von ( $3,06 \pm 0,12$ ) Mrayl ermittelt. Es besteht ein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte zwischen Region 1 und Region 2 (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p < 0,05$ ).

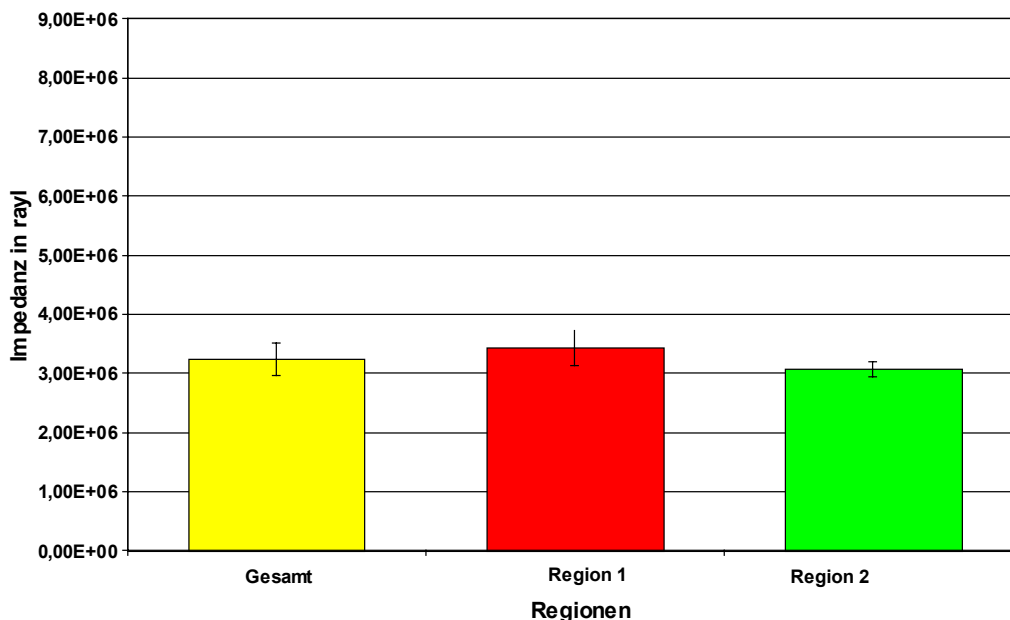


Diagramm 7: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Hammers (bei 900 MHz)

## 6.2.2 Untersuchungen am Amboss

### 6.2.2.1 Qualitative Analyse

Es wurde mit dem Multi-Layer-Verfahren die Impedanzwertverteilung in einem Amboss bei 900 MHz ermittelt.

Abbildung 21 bis Abbildung 24 zeigen die Verteilung der akustischen Impedanzwerte. Bereiche höherer akustischer Impedanz sind im gelben und roten Farbton abgebildet

---

(akustische Impedanz von ca. 4 Mrayl). Das Einbettungsmedium PMMA, welches am Rand in den Lakunen sichtbar ist, weist eine akustische Impedanz von ca. 2,7 Mrayl auf.

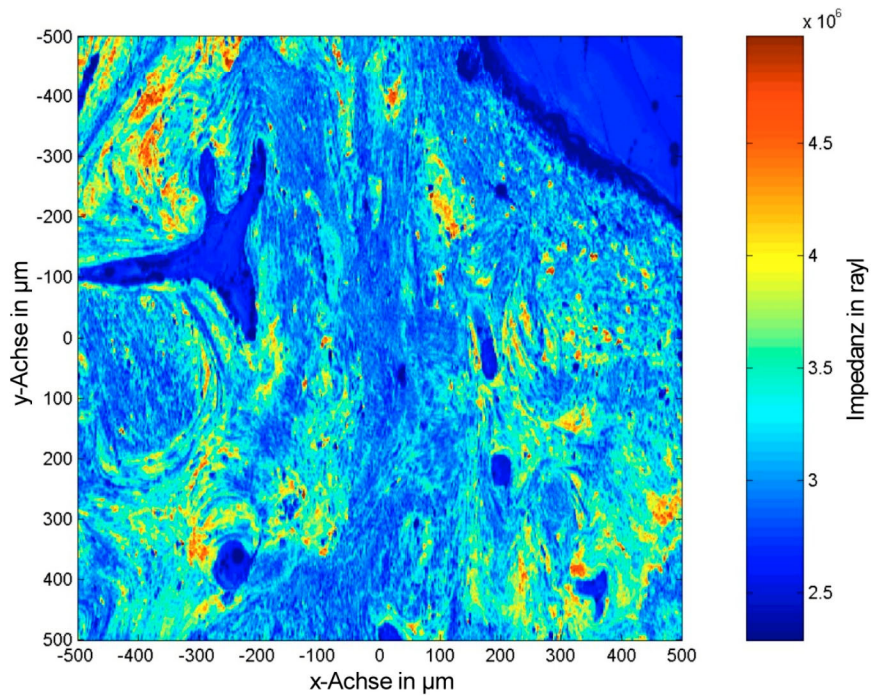


Abbildung 21: Impedanzverteilung, Ausschnitt Corpus

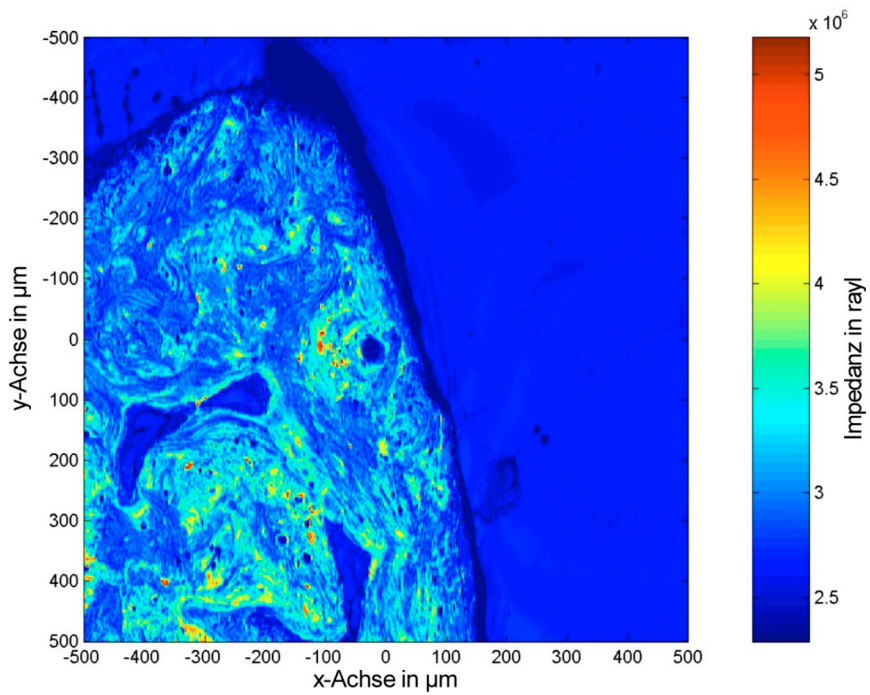


Abbildung 22: Impedanzverteilung, Ausschnitt Crus breve

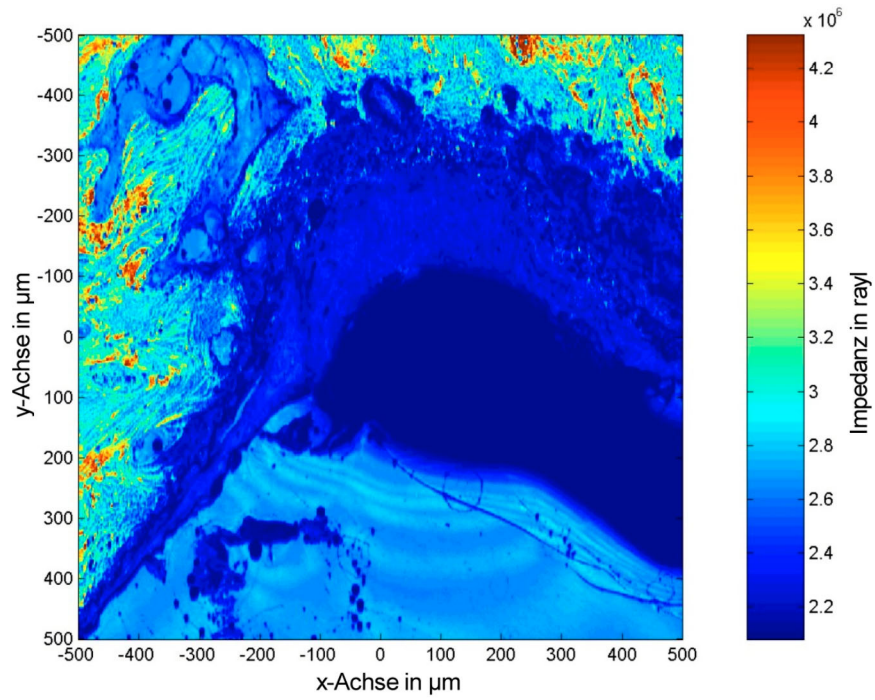


Abbildung 23: Impedanzverteilung, Ausschnitt Articulatio incudomallearis

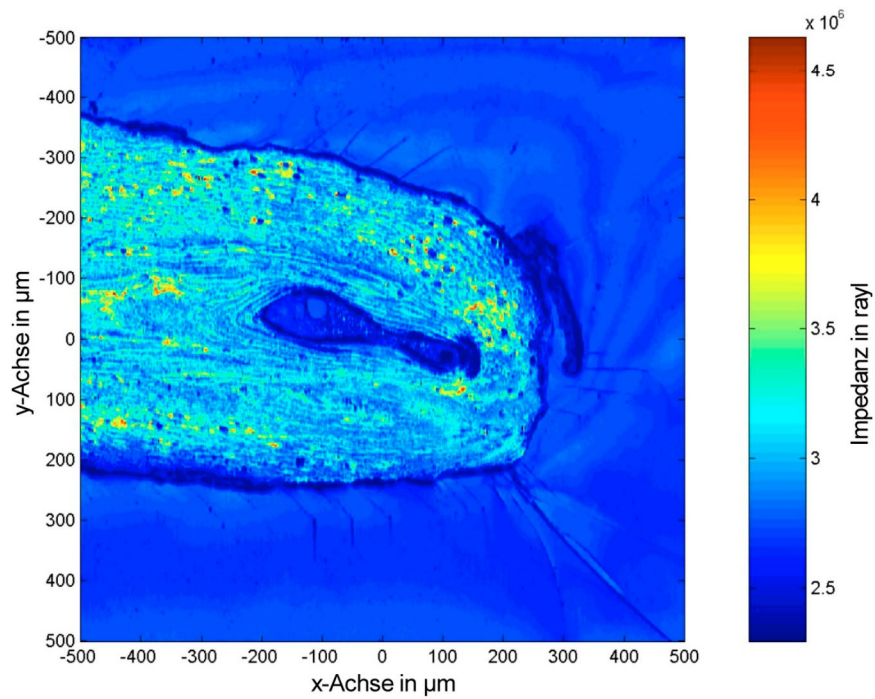


Abbildung 24: Impedanzverteilung, Ausschnitt Crus longum

### 6.2.2.2 Quantitative Analyse

Es wurden die Impedanzmittelwerte für die Schnittfläche durch den gesamten Amboss, Region 1 (Corpus, Crus breve) und Region 2 (Crus longum, Processus lenticularis) bestimmt.

In Diagramm 8 sind die Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Amboss dargestellt. Die akustische Impedanz betrug bei 900 MHz für die gesamte Ambossschnittfläche ( $3,66 \pm 0,37$ ) Mrayl. Für Region 1 wurde eine akustische Impedanz von ( $3,87 \pm 0,27$ ) Mrayl und für Region 2 von ( $3,31 \pm 0,03$ ) Mrayl ermittelt. Es wurde ein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte zwischen Region 1 und 2 festgestellt (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p < 0,001$ ).

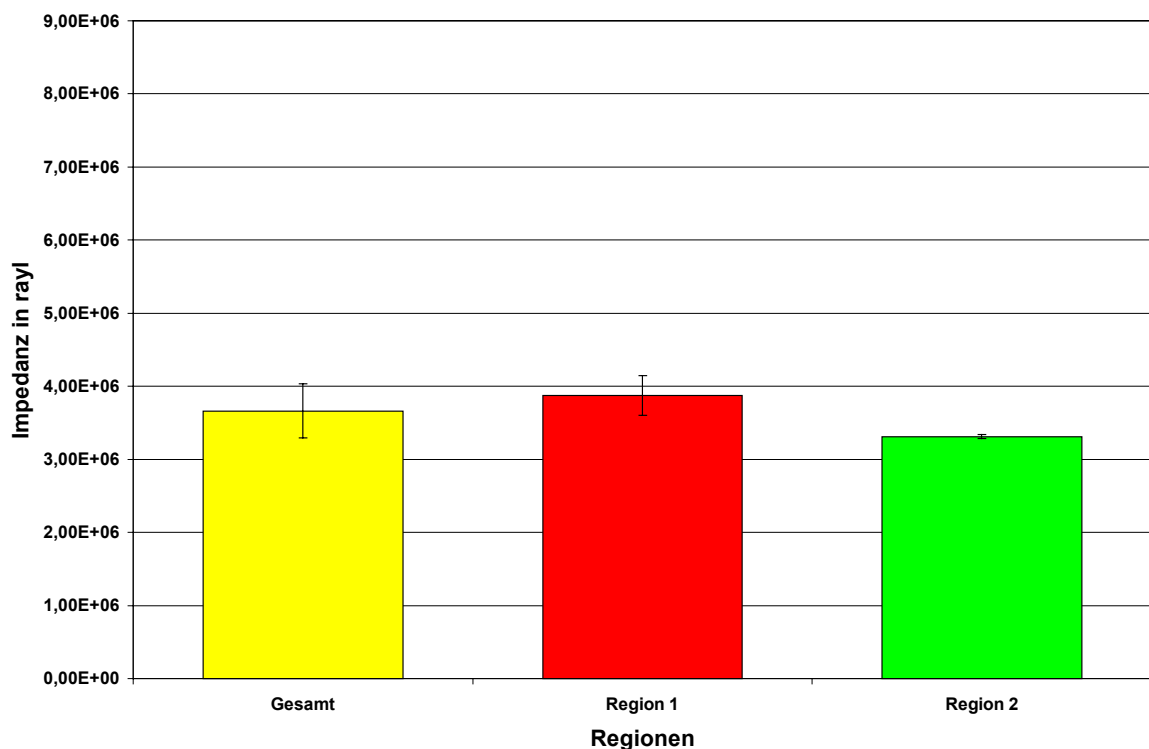


Diagramm 8: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Ambosses (bei 900 MHz)

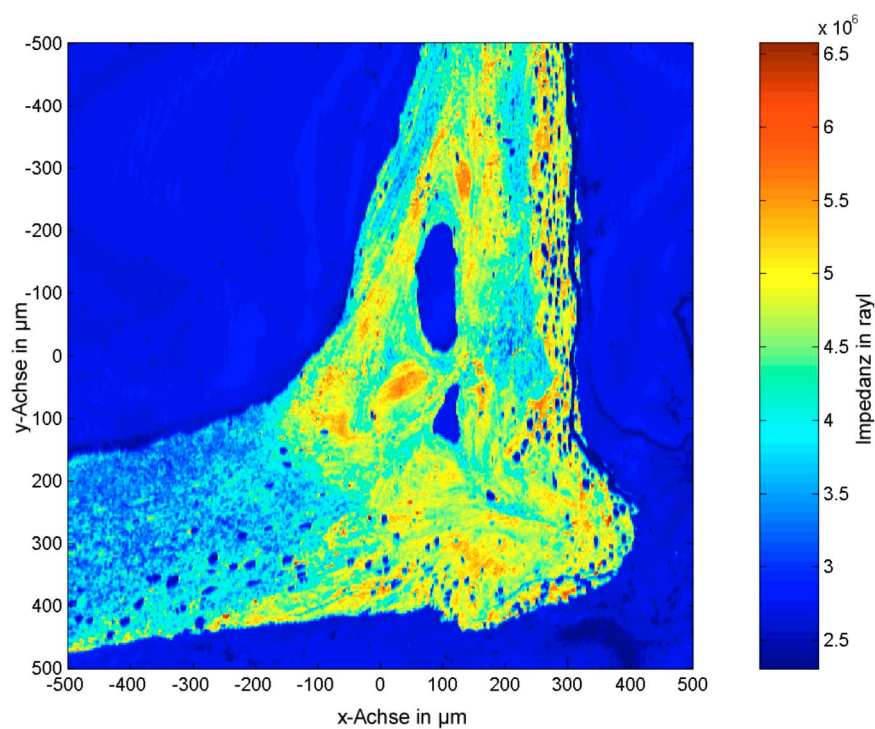
## 6.2.3 Untersuchungen am Steigbügel

### 6.2.3.1 Qualitative Analyse

Die Untersuchungen am Steigbügel erfolgten mit 900 MHz, was einer lateralen Auflösung

von ca. 1  $\mu\text{m}$  entspricht. Der Messbereich betrug 1x1 mm. Die Impedanzverteilung im Mikrostrukturbereich wird an repräsentativen Ausschnittsbildern deutlich. Sie wurde mit dem Multi-Layer-Analysis-Verfahren bei 900 MHz ermittelt.

Abbildung 25 bis Abbildung 28 zeigen die Verteilung der akustischen Impedanzwerte. Bereiche höherer akustischer Impedanz sind im gelben und roten Farbton abgebildet (akustische Impedanz von ca. 4 Mrayl). Das Einbettungsmedium PMMA, welches am Rand in den Lakunen sichtbar ist, weist eine akustische Impedanz von ca. 2,7 Mrayl auf.



*Abbildung 25: Impedanzverteilung, Ausschnitt Übergang Steigbügelfussplatte zum Steigbügelbogen*

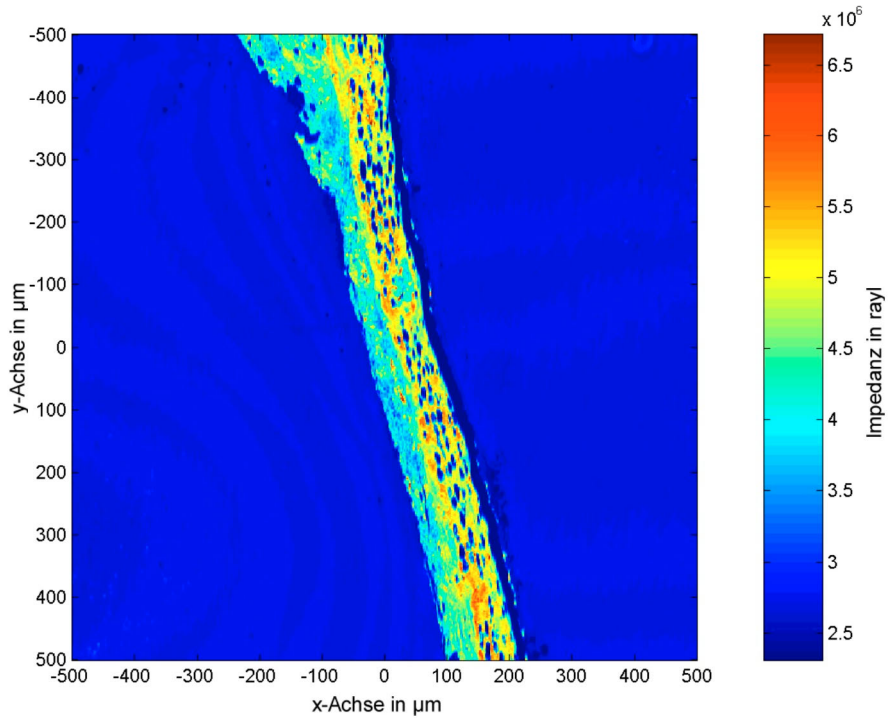


Abbildung 26: Impedanzverteilung, Ausschnitt Steigbügelfußplatte

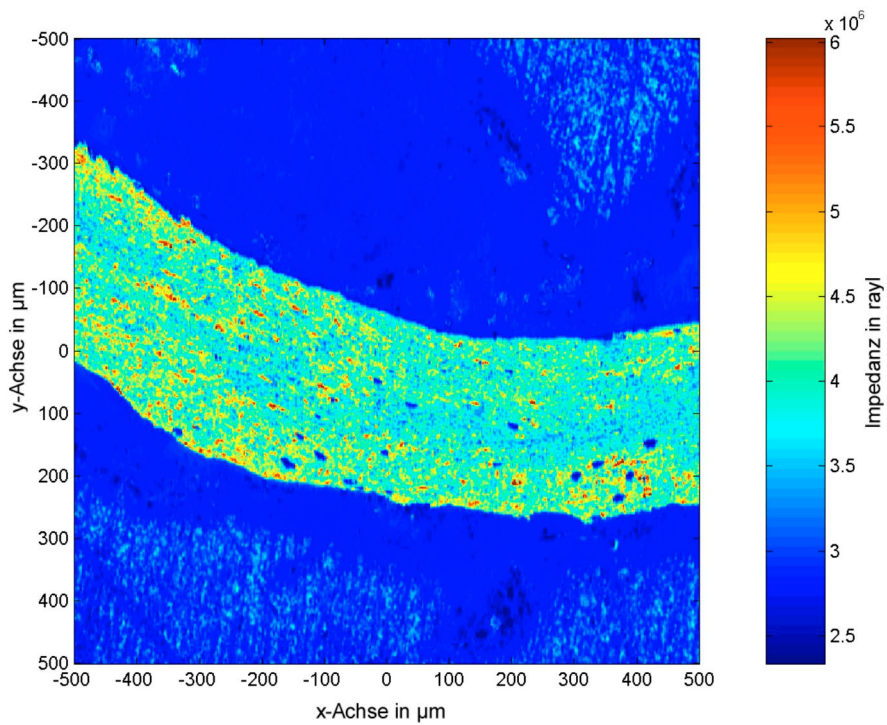


Abbildung 27: Impedanzverteilung, Ausschnitt Steigbügelbogen

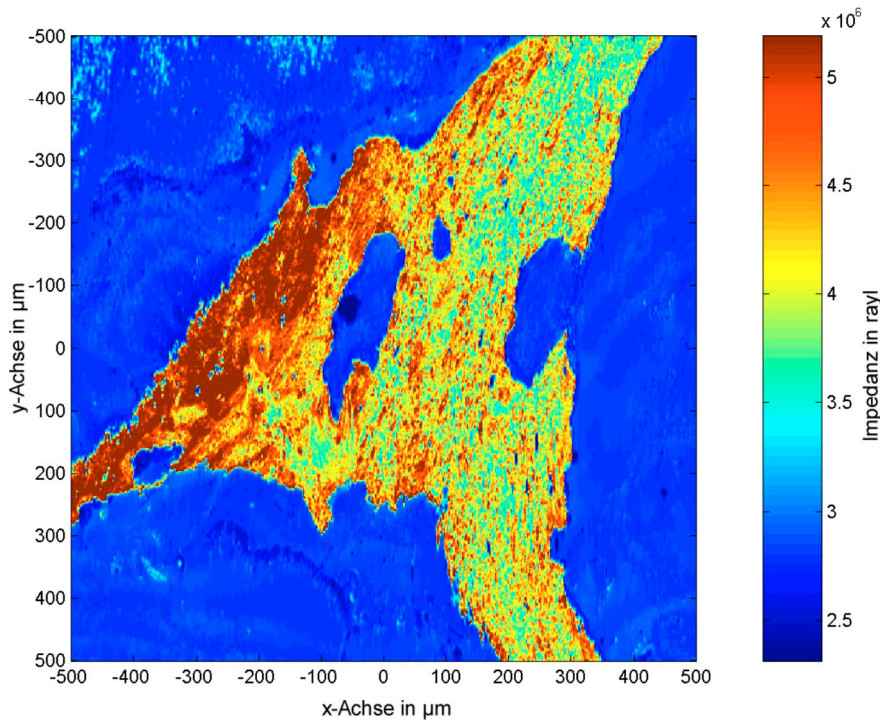


Abbildung 28: Impedanzverteilung, Steigbügelköpfchen

### 6.2.3.2 Quantitative Analyse

Es wurden die Impedanzmittelwerte für die Schnittfläche durch den gesamten Steigbügel, den Steigbügelkopf, den vorderen und hinteren Bogen und die Steigbügelfussplatte ermittelt. In Diagramm 9 sind die Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Steigbügels dargestellt. Die akustische Impedanz beträgt für die gesamte Steigbügelschnittfläche ( $3,96 \pm 0,32$ ) Mrayl. Für Region 1 (Caput) wurde eine akustische Impedanz von ( $3,65 \pm 0,05$ ) Mrayl, für Region 2 (Crus posterius) von ( $3,71 \pm 0,10$ ) Mrayl, für Region 3 (Crus anterius) von ( $3,69 \pm 0,05$ ) Mrayl und für Region 4 (Basis) von ( $4,30 \pm 0,14$ ) Mrayl ermittelt. Ein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte war zwischen Region 4 und Region 1-3 nachweisbar (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p < 0,005$ ). Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Caput, Crus anterius und Crus posterius bestand nicht (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p > 0,4$ ).

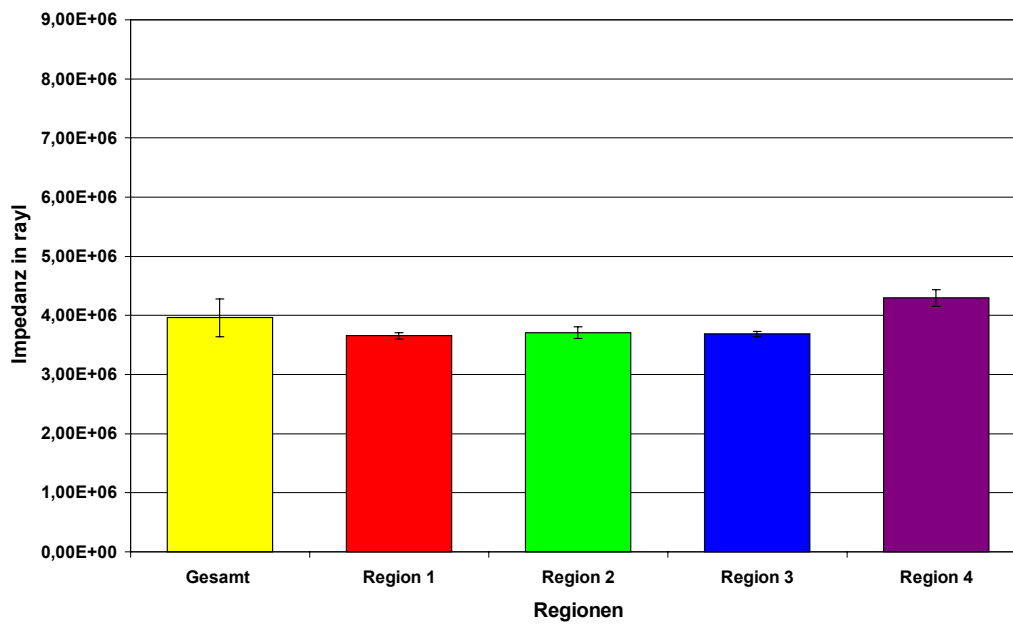


Diagramm 9: Impedanzmittelwerte mit Standardabweichung für die verschiedenen Regionen des Steigbügels (bei 900 MHz)

## 6.3 VERGLEICH DER GEHÖRKNÖCHELCHENIMPEDANZ

### 6.3.1 KSI SAM 100

Es erfolgte ein Vergleich der akustischen Impedanz der gesamten Hammer-, Amboss- und Steigbügelschnitte, die bei einer Arbeitsfrequenz von 25 MHz ermittelt wurde (Diagramm 10). Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied der Impedanzmittelwerte der Hämmer (7,13 Mrayl) und der Ambosse (6,74 Mrayl) (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p=0,2$ ).

Der Unterschied der Impedanzmittelwerte von Hammer und Steigbügel (4,66 Mrayl) war statistisch signifikant (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p<0,001$ ). Ebenfalls waren die Impedanzmittelwerte von Amboss und Steigbügel statistisch signifikant (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p<0,001$ ).

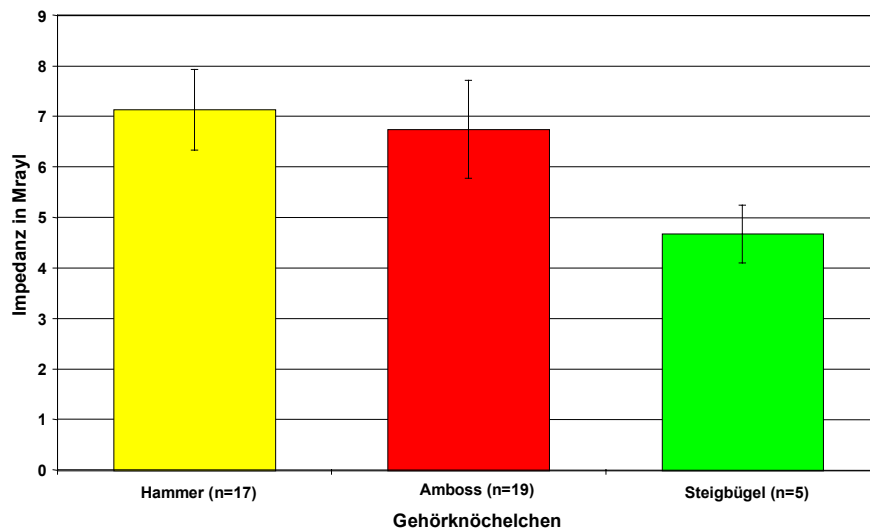


Diagramm 10: Mittlere akustische Impedanz von Gehörknöchelchen mit Standardabweichung bei einer Arbeitsfrequenz von 25 MHz

### 6.3.2 KSI SAM 2000

Es erfolgte ein Vergleich der mittleren akustischen Impedanz zwischen den einzelnen Gehörknöchelchen bei einer Arbeitsfrequenz von 900 MHz. Der Unterschied zwischen Hammer, Amboss und Steigbügel war statistisch signifikant (einfaktorielle Varianzanalyse,  $p < 0,02$ ) (Diagramm 11).

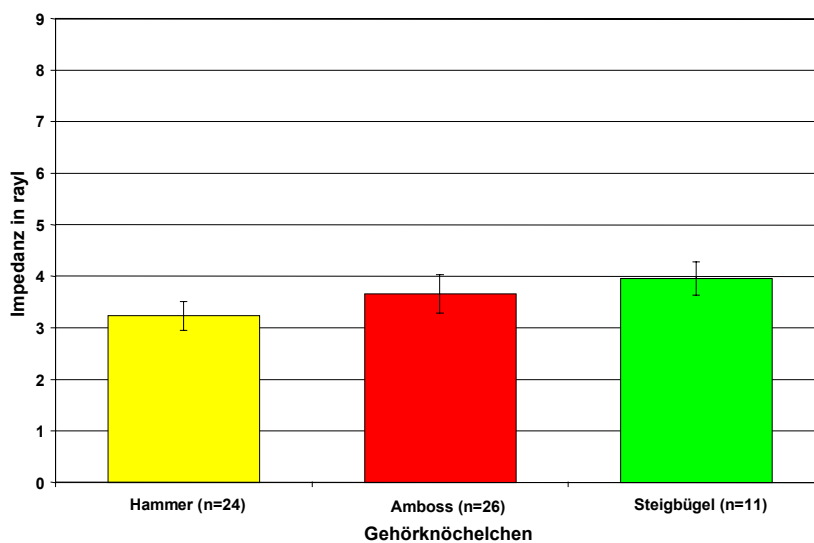


Diagramm 11: Mittlere akustische Impedanz mit Standardabweichung von Gehörknöchelchen bei einer Arbeitsfrequenz von 900 MHz