

### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 Ausstromverhältnis distal:proximal = 50:50

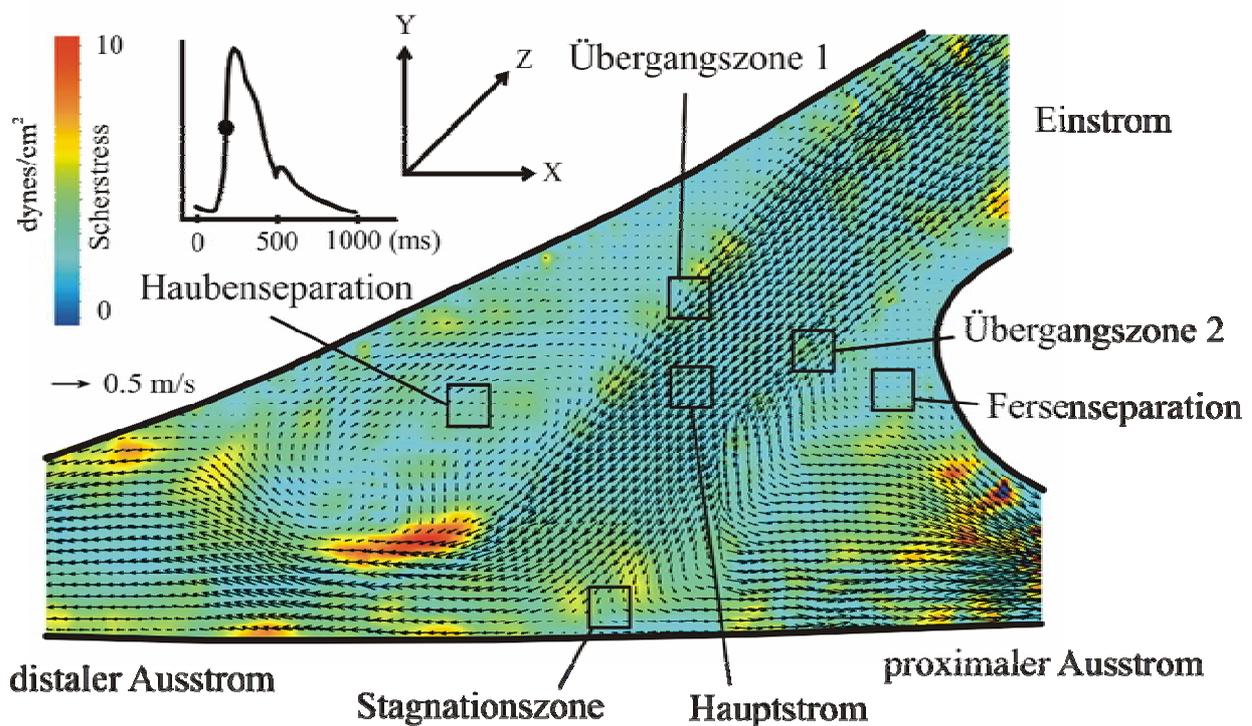
##### 3.1.1 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min.

Das Strömungsmuster der Taylor-Patch-Anastomose zeigte bei einem Fluss von 260 ml/min einen in die Anastomose eintretenden Zentralstrom, welcher bis in das Zentrum vordrang und sich dann in beide Richtungen des distalen und proximalen Ausstroms aufteilte. Durch den Verlauf des Zentralstroms kam es zur Ausbildung zweier unterschiedlich großer Separationszonen. Im Bereich der Haube entwickelte sich die größere der beiden und war ab 250 ms (Akzelerationsphase) vollständig ausgebildet. Im zeitlichen Verlauf entwickelte sie sich zu einem im Uhrzeigersinn rotierenden Wirbel, welcher größere Geschwindigkeiten in der Peripherie als im Wirbelzentrum aufwies und fast den gesamten Herzzyklus andauerte. Während des Zeitpunktes 250 ms wies die Separationszone im Bereich der Haube eine Ausdehnung von  $91 \text{ mm}^2$  auf, was einem Anteil von 22 %, bezogen auf die Gesamtanastomosenfläche ausmachte. Die kleinere Separationszone im Bereich der Ferse belegte lediglich eine Fläche von  $20 \text{ mm}^2$ , was einem Anteil von 5% entsprach. Infolge der Aufteilung des Zentralstroms in die proximalen und distalen Ausstromsegmente fand sich im Bereich des Bodens der Anastomose eine kleine dreieckige Stagnationszone mit einer Fläche von  $4 \text{ mm}^2$ , was einem Anteil von 1% bezogen auf die Gesamtanastomosenfläche entsprach. Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betragen beim Eintritt in die Anastomose  $0,27 \pm 0,05 \text{ m/s}$  und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,184 \pm 0,3 \text{ m/s}$ . Aufgrund der besonderen Geometrie der Taylor-Patch-Anastomose, mit Verkleinerung des Strömungsquerschnittes distal und proximal des Anastomosenzentrums, kam es beim Übertritt des Zentralstroms in diese Ausstromregion zu ausgeprägten Geschwindigkeitserhöhungen der Flüssigkeit. Im Bereich des distalen Ausstroms wurde das Fluid auf  $0,56 \pm 0,09 \text{ m/s}$  beschleunigt, im proximalen Ausstrom sogar bis auf  $0,82 \pm 0,11 \text{ m/s}$ . Im Bereich der zwei Separationszonen und der Stagnationszone fanden sich insgesamt die niedrigsten Geschwindigkeiten.

Bereiche mit hohen Scherstressraten waren im Gebiet der Übergangszonen zwischen dem Zentralstrom und den Separationszonen lokalisiert, die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Wobei die Zone zwischen Zentralstrom und Haube die höchsten Scherstressbereiche aufwies (siehe Tab. 1). Im Übergangsbereich zwischen Zentralstrom und Ferse waren die Scherstresswerte geringer. Innerhalb der zwei Separationszonen und der Stagnationszone am Boden der Anastomose waren die Scherstresswerte deutlich niedriger als die

Werte innerhalb des Zentralstroms oder im Bereich der Übergangszonen. Sie waren jedoch erheblich niedriger als normale arterielle Wandscherkräfte, welche im Bereich von 5–15 dynes/cm<sup>2</sup> liegen. Im Bereich der Ausstromsegmente fanden sich die stärksten Stressbereiche der Anastomose, welche deutlich über denen der Übergangszonen lagen. Die Haubenseparation wies etwas größere Scherstresswerte auf als die Fersensezone (siehe Tab. 1). Die Unterschiede waren aber statistisch nicht signifikant. Die Bereiche mit hohen Vorticitywerten (Rotation in z-Richtung) ähnelten denen der Scherstressverteilung. Bei positivem Vorzeichen drehte sich das Feld in Richtung Uhrzeigersinn und gegen diese Richtung bei negativem Vorzeichen. So fanden sich die höchsten Werte während der Systole im Bereich der Separationszone zwischen Zentralstrom und Haube. Diese Werte waren deutlich größer als in den Separationszonen und statistisch signifikant unterschiedlich. In der Zone zwischen Zentralstrom und Ferse waren die Rotationen in z-Richtung etwas kleiner, statistisch jedoch nicht signifikant unterschiedlich. Die niedrigsten Vorticitywerte fanden sich innerhalb der Separationszonen, mit Ausnahme des Wirbelzentrums.

**Abb. 16: Taylor-Patch-Anastomose (50:50 und 260ml/min)**



Zusammengesetzte Rekonstruktion der Taylor-Patch-Anastomose während der Systole des Herzzyklus bei 250 ms. Darstellung des Zentralstroms mit hohen Geschwindigkeiten und der Aufteilung in einen distalen und proximalen Ausstrom. Deutlich geringere Geschwindigkeiten und Scherstresswerte fanden sich lokal in den Separationszonen im Hauben- und Fersensbereich.

### 3.1.2 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min.

Bei der Reduzierung des Flusses auf 200 ml/min fanden sich die gleichen Flussmuster wie bei 260 ml/min. Der in das Zentrum eintretende Hauptstrom teilte sich in einen proximalen und distalen Anteil auf. Es entstanden zwei Separationszonen und eine Stagnationszone am Boden der Anastomose. Die größere der beiden Separationszonen, welche sich im Bereich der Haube befand, hatte eine Fläche von 88 mm<sup>2</sup>, entsprechend 21 % der gesamten Anastomosenfläche. Im zeitlichen Verlauf fand sich wieder ein im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel. Die kleinere Fersenregion belegte lediglich eine Fläche von 16 mm<sup>2</sup>, dies entsprach 4% der gesamten Anastomose. Die Stagnationszone war etwas größer als bei einem Fluss von 260 ml/min. Sie betrug 3 mm<sup>2</sup>, was einer Fläche von 1% entsprach. Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betrugen beim Eintritt in die Anastomose  $0,22 \pm 0,05$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,14 \pm 0,04$  m/s. Insgesamt waren die Geschwindigkeiten kleiner als bei der höheren Flussrate. Die starke Fluidbeschleunigung in den Ausstromsegmenten wurde auch hier deutlich. So lag die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb des distalen Ausstroms bei  $0,41 \pm 0,1$  m/s und im proximalen bei  $0,52 \pm 0,08$  m/s.

Hohe Scherstresswerte fanden sich in den Übergangszonen zwischen Zentralstrom und Separationszonen (siehe Tab. 1). Bei der Vorticity befanden sich auch hier wieder die höchsten Werte im Bereich der Übergangszonen (siehe Tab. 2).

### 3.1.3 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min.

Bei der weiteren Reduzierung des Flusses auf 140 ml/min war das Flussmuster mit den anderen zwei Flussstärken identisch. Es fanden sich aber insgesamt die geringsten Geschwindigkeiten, Scherstress- und Vorticitywerte. Die Flächen der Separationszonen stimmten mit denen der beiden anderen Flussstärken fast überein. So betrug die Fläche der größeren Haube 82 mm<sup>2</sup> (20 % der Gesamtfläche), sowie im Bereich der Ferse 15 mm<sup>2</sup>, was 4% entsprach. Die Stagnationszone hatte jedoch die größte Ausdehnung aller drei Flussstärken. Sie betrug 4 mm<sup>2</sup>, was 1% der Gesamtanastomose entsprach. Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betrugen beim Eintritt in die Anastomose  $0,17 \pm 0,03$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,09 \pm 0,03$  m/s. Die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb des distalen Ausstroms lag bei  $0,25 \pm 0,06$  m/s und im proximalen bei  $0,31 \pm 0,09$  m/s.

Die größten Scherstress- und Vorticitywerte fanden sich auch hier wieder im Bereich der Übergangszonen (siehe Tab. 1, Tab. 2). Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Im Bereich der Übergangszone, zwischen Zentralstrom und Haubenseparationszone, waren sie

etwas höher als im Bereich zwischen Zentralstrom und Fersen separationszone, jedoch nicht statistisch signifikant unterschiedlich. Bei allen drei unterschiedlichen Flussstärken waren die Scherstresswerte in der Haubenseparation größer als im Fersenbereich. Statistisch signifikante Unterschiede fanden sich jedoch nicht.

**Abb. 17: Haubengebiet der Taylor-Patch-Anastomose (50:50 und 140 ml/min)**

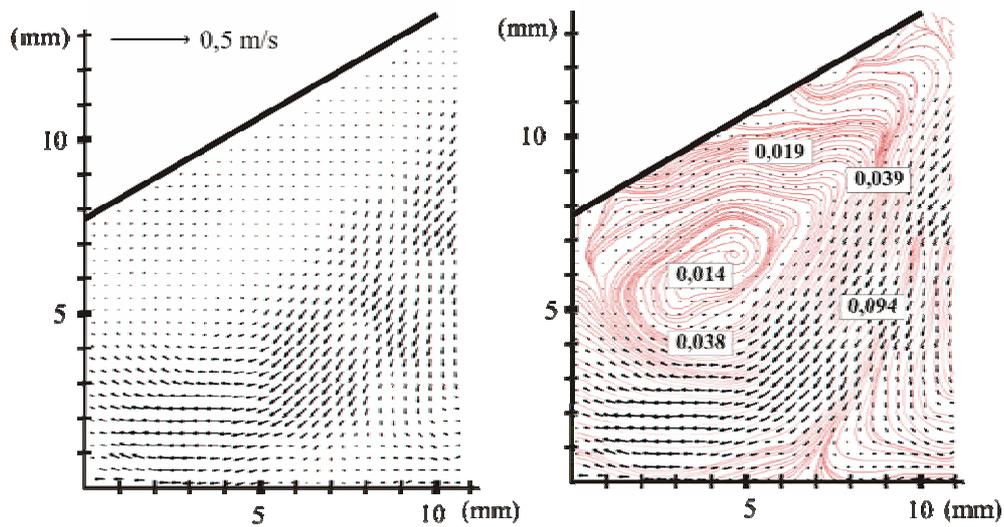
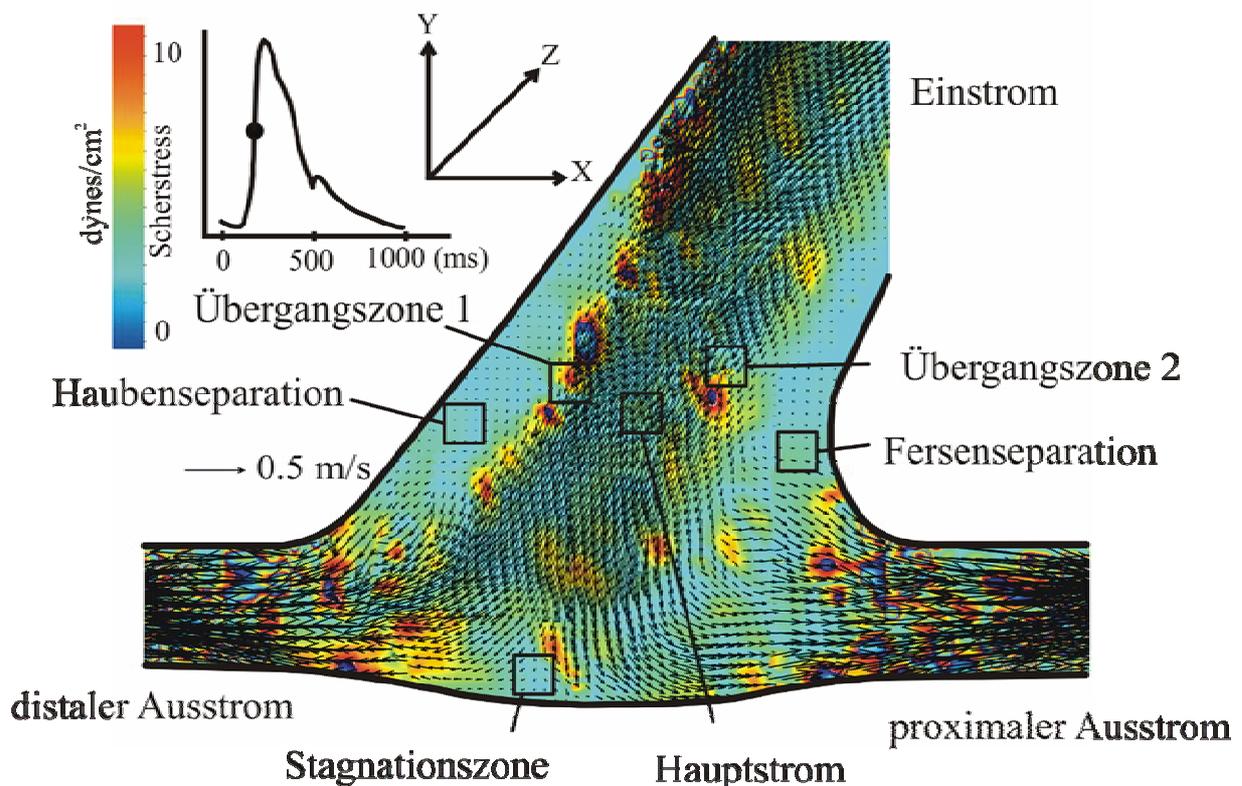


Abbildung der Vektorfeld- und Stromliniendarstellung der Haubenregion, im Zentrum der Taylor-Patch-Anastomose. Innerhalb des Wirbels, welcher mit dem Uhrzeigersinn rotierte, fanden sich deutlich geringere Geschwindigkeiten im Zentrum. Der Zentralstrom wies die höchsten Geschwindigkeiten auf.

### 3.1.4 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min.

Die Flussvisualisierung der Miller-Cuff-Anastomose, bei einem Fluss von 260 ml/min, ergab ein mit dem Taylor-Patch-Flussmuster vergleichbare Struktur. Ein Zentralstrom mit hohen Geschwindigkeiten trat in die Anastomose ein und teilte sich dann im Zentrum in einen distalen und proximalen Ausstrom auf. Es fanden sich wie bei der Taylor-Patch-Anastomose vergleichbare Separationszonen, eine im Haubenbereich und eine Zweite im Fersenbereich. Eine Stagnationszone am Boden der Anastomose wurde ebenfalls gefunden. Im Unterschied zur Taylor-Patch-Anastomose bildete sich im Bereich der Fersenseparation ein entgegen dem Uhrzeigersinn rotierender Wirbel mit höheren Geschwindigkeiten in der Peripherie aus, welcher bei 150 ms entstand und bis 650 ms sichtbar war. Bei 250 ms entwickelte sich im Gegensatz zur Taylor-Patch-Anastomose eine größere Fersenseparation, die jedoch erst am Ende der Systole ihre maximale Ausdehnung besaß. Sie belegte bei 250 ms eine Fläche von 18 mm<sup>2</sup>, dies entsprach 7 % der Gesamtfläche und bei 450 ms eine Fläche von 25 mm<sup>2</sup> (9 %).

Abb. 18: Miller-Cuff-Anastomose (50:50 und 260ml/min)



Darstellung des sich aufteilenden Zentralstroms innerhalb des Zentrums der Miller-Cuff-Anastomose. Durch das Flussmuster entstanden zwei Separationszonen im Hauben- und Fersenbereich sowie eine Stagnationszone am Boden. Die lokalen Scherstresswerte im Bereich der Übergangszonen zeigen deutlich höhere Werte als im Separationszonen- und Stagnationszonenbereich.

Die im Vergleich zur Taylor-Patch-Anastomose größere Haubenseparation besaß eine Fläche von etwa 28 mm<sup>2</sup> (10 %). Die Stagnationszone am Boden der Anastomose hatte eine Fläche von 3 mm<sup>2</sup> (1 %). Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betragen beim Eintritt in die Anastomose  $0,26 \pm 0,05$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,21 \pm 0,07$  m/s. Infolge der geometrischen Unterschiede zur Taylor-Patch-Anastomose, bei der sich die Ausstromsegmente kontinuierlich verjüngen, erfolgte bei der Miller-Cuff-Anastomose eine abrupte Verkleinerung des Ausstromdurchmessers. Dies hatte zur Folge, dass die Ausstrom-Fluidbeschleunigungen ausgeprägter waren, als bei der Taylor-Patch-Anastomose. Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten lagen bei  $0,75 \pm 0,04$  m/s im distalen, sowie bei  $0,64 \pm 0,1$  m/s im proximalen Ausstrom.

Wie bei der Taylor-Patch-Anastomose fanden sich neben den Scherstresswerten im Gebiet der der Ausstromsegmente die höchsten Stresswerte innerhalb der Bereiche zwischen Zentralstrom und Separationszone. Der Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation zeigte bei der Miller-Cuff-Anastomose die größten Stresswerte.

Die Separationszonen und die Stagnationszone wiesen deutlich geringere Stresswerte auf, wobei aufgrund des vorherrschenden Wirbels in der Region der Ferse, im Vergleich zur Haube, lokal höhere Scherkräfte entstanden. Die Stresswerte im Bereich der Stagnationszone waren bei der Miller-Cuff-Anastomose größer als in den jeweiligen Separationszonen (siehe Tab. 1). Das Muster der Vorticitywerte (Rotation in z-Richtung) ähnelte wieder dem des Scherstress. Die größten Werte fanden sich im Bereich der Transitionszonen (Übergangszonen) zwischen Zentralstrom und Haubenseparation.

### **3.1.5 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Das Flussmuster bei reduziertem Fluss ähnelte stark dem 260 ml/min Fluss. Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betragen beim Eintritt in die Anastomose  $0,23 \pm 0,04$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,14 \pm 0,06$  m/s. Im distalen Ausstromsegment beschleunigte das Fluid auf  $0,62 \pm 0,2$  m/s und im proximalen Ausstrom auf  $0,57 \pm 0,08$  m/s. Die Haubenseparation besaß eine Fläche von 27 mm<sup>2</sup> (7%) und die kleinere Fersenseparation etwa 18 mm<sup>2</sup> (10%). In ihrer größten Ausdehnung bei 450 ms erreichte die Fersenseparation eine Fläche von 27 mm<sup>2</sup> (10%). Die Stagnationszone am Boden der Anastomose besaß, wie auch schon bei der Taylor-Patch-Anastomose, einen sehr kleinen Flächenanteil von 2 mm<sup>2</sup> und entsprach 1 % der gesamten Miller-Cuff-Anastomose.

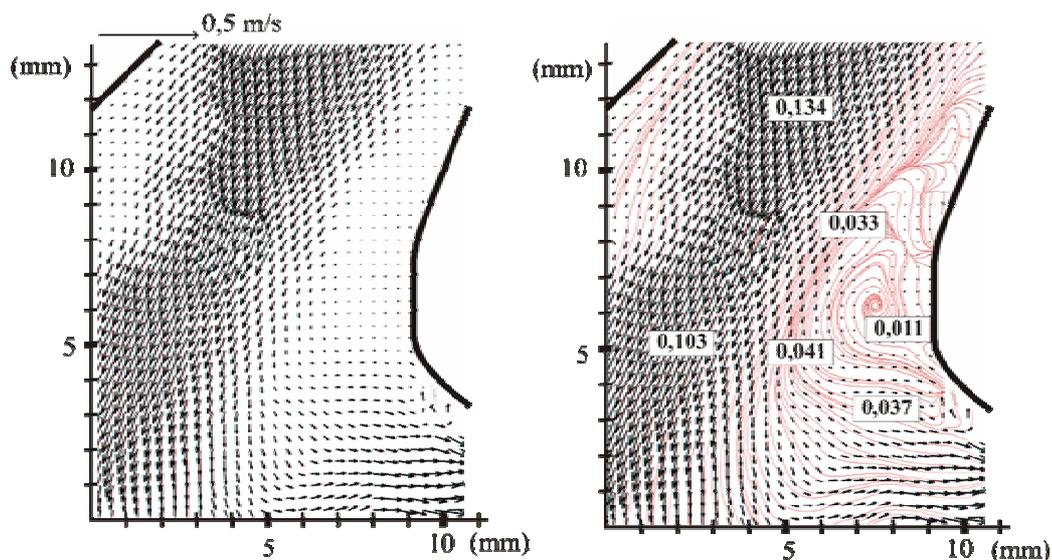
Die Scherstress- und die Vorticitywerte waren auch bei diesem Fluss innerhalb der

Übergangszonen am größten. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Innerhalb der Separationszonen und der Stagnationszonen waren sie wiederum deutlich unterhalb der Werte des Zentralstroms, der Übergangszonen und der physiologischen normalen arteriellen Wandscherraten. Statistisch signifikante Unterschiede ergaben sich bei Betrachtung der systolischen Vorticitywerte, wo deutlich größere Rotationen in z-Richtung lokal im Bereich der Übergangszonen entstanden (siehe Tab. 2).

### 3.1.6 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min

Bei einem Fluss von 140 ml/min zeigte sich das gleiche Flussmuster wie bei 260 und 200 ml/min. Es fanden sich lediglich eine geringere Ausprägung des Zentralstroms und geringere fluiddynamische Messgrößen wie Geschwindigkeit, Scherstress und Vorticity. Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betragen beim Eintritt in die Anastomose  $0,18 \pm 0,04$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,10 \pm 0,04$  m/s. Im distalen Ausstromsegment beschleunigte das Fluid auf  $0,52 \pm 0,12$  m/s und im proximalen Ausstrom auf  $0,43 \pm 0,09$  m/s. Die kleinere Separationszone im Bereich der Ferse belegte eine Fläche von  $15 \text{ mm}^2$  (6%) und die größere Zone im Bereich der Haube hatte eine Ausdehnung von  $26 \text{ mm}^2$  (7%). Bei 450 ms besaß die Ferse ihre größte Ausdehnung und nahm dann eine Fläche von  $25 \text{ mm}^2$  (9%) ein. Die Fläche der Stagnationszone umschrieb lediglich eine Fläche von  $2 \text{ mm}^2$ , was 1 % der gesamten Miller-Cuff-Anastomose entsprach.

Abb. 19: Fersengebiet der Miller-Cuff-Anastomose (50:50 und 140 ml/min)



In der Ferse der Miller-Cuff-Anastomose entwickelte sich ein gegen den Uhrzeigersinn rotierender Wirbel mit deutlich höheren Geschwindigkeiten in der Peripherie. Die roten Linien stellen die Stromlinien dar. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

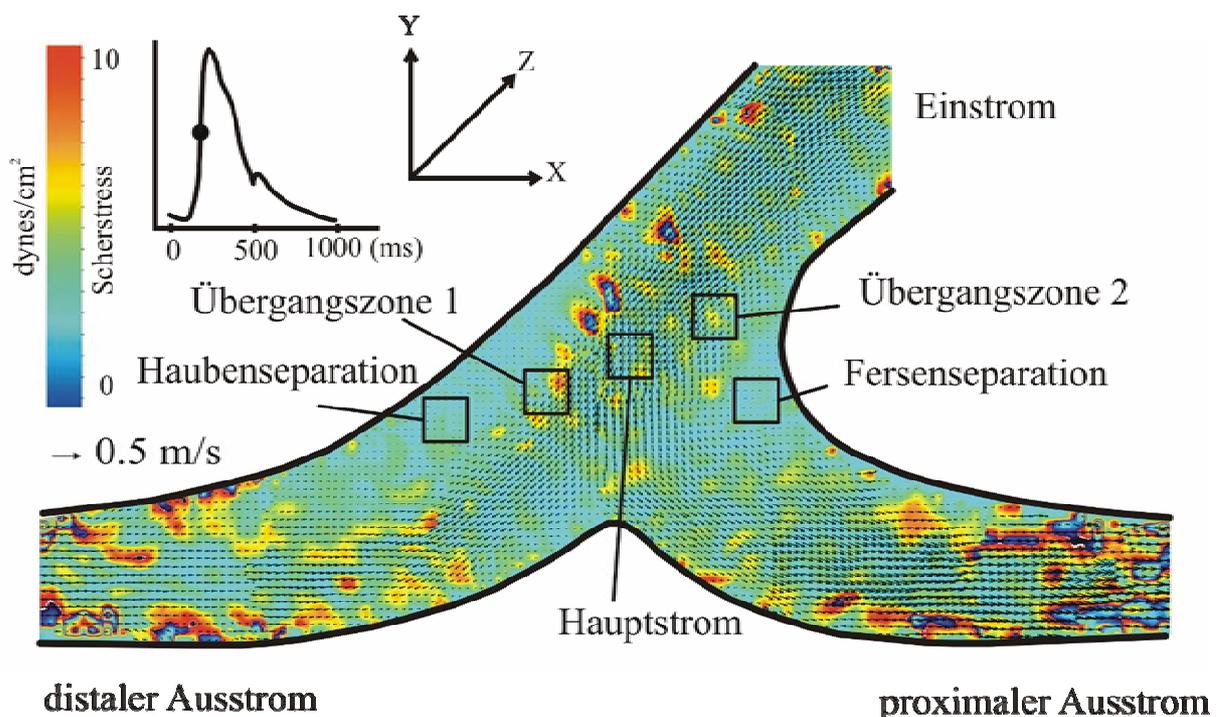
---

Der Scherstress und die Vorticity zeigten kleinere Messwerte als bei einem Fluss von 260 und 200 ml/min. Auch der Wirbel war nicht so stark ausgeprägt wie bei höheren Flussraten. Er entstand aber auch hier bei 150 ms und verschwand bei 650 ms wieder. Die Fersenregion wies auch wie in den zwei anderen Flussstärken einen höheren Scherstress auf als die Haubenseparation (siehe Tab. 1). Statistisch signifikante Unterschiede ergaben sich jedoch bei allen drei Flussstärken nicht. Die bei allen drei Flussstärken gefundenen Unterschiede zwischen Hauben- und Fersenregion (siehe Tab. 1) stellten sich als statistisch nicht signifikant unterschiedlich dar.

### 3.1.7 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 260 ml/min

Das Strömungsmuster der FCPP unterschied sich leicht von dem der Taylor-Patch- und dem der Miller-Cuff-Anastomose bei einem 50:50-Flussverhältnis. Die FCPP-Anastomose wies ebenfalls einen Zentralstrom mit hohen Geschwindigkeiten auf. Auch in diesem Modell fanden sich zwei Separationszonen in Hauben- und Fersenregion. Eine vergleichbare Stagnationszone, am Boden der Anastomose, bildete sich jedoch aufgrund des geometrischen Unterschiedes nicht aus. Die beiden sich bildenden Separationszonen waren im Vergleich zur Taylor-Patch- und Miller-Cuff-Anastomose kleiner und belegten im Haubenbereich (bei 250 ms) lediglich eine Fläche von 34 mm<sup>2</sup>, was 9 % der Gesamtflächen entsprach. 13 mm<sup>2</sup> (3%) waren es bei der Fersenseparation. Eine vergleichbare Wirbelbildung konnte weder in der Fersenregion noch in der Haubenseparation ermittelt werden. Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten im Bereich

Abb. 20: Femoro-crurale Patch-Prothese (50:50 und 260ml/min)



Zusammengesetztes Bild der femoro-cruralen Patch-Prothese. Deutlich zu erkennen sind die während der systolischen Beschleunigungsphase (250 ms) homogener verteilten Flussbedingungen und die kleineren Separationszonen verglichen mit der Taylor-Patch- und Miller-Cuff-Anastomose. Lediglich der proximale Ausstrom erfuhr die energetisch ungünstigere Fluidbeschleunigung.

des Einstroms der FCPP lagen bei  $0,30 \pm 0,05$  m/s und hatten kurz vor Teilung des Zentralstroms in einen distalen und proximalen Ausstrom eine Geschwindigkeit von  $0,22 \pm 0,05$  m/s. Da der distale Ausstrom als direkte Fortsetzung aus dem Anastomosenzentrum hervorgeht, kam es bei

der FCPP-Anastomose nicht zu solch starken Fluidbeschleunigungen, wie sie bei den zwei anderen Anastomosen zu messen waren. Die Fluidbeschleunigung im distalen Ausstromsegment betrug hier  $0,30 \pm 0,06$  m/s. Lediglich im proximalen Schenkel wurden die starken Beschleunigungen nachgewiesen. Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten lagen hier bei  $0,48 \pm 0,11$  m/s.

Beim Vergleich der gemessenen Scherstress- und Vorticitywerte fielen auch bei diesem Modell wieder die größten Werte im Bereich der Übergangszonen auf, speziell im Bereich zwischen Zentralstrom und Fersenseparation. Dabei waren die Werte statistisch signifikant unterschiedlich. Im Gebiet der Haubenseparation waren die Scherstresswerte wieder sehr gering. Aufgrund der geringen Ausbreitung der Fersenseparation besaß die FCPP dort die größten Scherstresswerte aller drei untersuchten Modelle, bei einem Ausstromverhältnis von 50:50 (siehe Tab. 1)

Die FCPP-Anastomose war das einzige Modell bei dem aufgrund der fließenden Verjüngung der Ausstromsegmente die Stresswerte im Ausstrom kleiner waren als in den Übergangszonen. Insgesamt waren die fluiddynamischen Parameter in der FCPP-Anastomose homogener verteilt als in den zwei anderen Modellen.

### **3.1.8 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Bei der Reduzierung des Flusses auf 200 ml/min fand sich auch wieder ein Zentralstrom, welcher sich bei Erreichen des Anastomosenzentrums in ein distales und proximales Ausstromsegment aufteilte. Auch hier fanden sich zwei Separationszonen im Bereich der Haube und im Bereich der Ferse. Eine vergleichbare Stagnationszone, wie in den anderen Modellen, gab es auch hier nicht. Die Größe der Haubenseparation betrug  $34 \text{ mm}^2$  (9%) und die der Fersenseparation  $11 \text{ mm}^2$  (3%). Die mittleren systolischen Zentralstromgeschwindigkeiten betrugen beim Eintritt in die Anastomose  $0,23 \pm 0,05$  m/s und kurz vor der Teilung des Zentralstroms  $0,16 \pm 0,03$  m/s. Im distalen Ausstromsegment beschleunigte das Fluid nur auf  $0,25 \pm 0,06$  m/s und im proximalen Ausstrom hingegen auf  $0,40 \pm 0,08$  m/s.

Die fluiddynamischen Messwerte (Scherstress und Vorticity) verhielten sich so wie bei einem Fluss von 260 ml/min, waren jedoch vergleichsweise kleiner (siehe Tab. 1, Tab. 2).

### **3.1.9 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 140 ml/min**

Bei der weiteren Reduzierung des Flusses auf 140 ml/min zeigte die Flussvisualisierung ein identisches Bild wie bei den beiden höheren Flussstärken. Deutlich wurde hier ein nicht so stark

ausgeprägter Zentralstrom mit geringeren Geschwindigkeiten und geringeren Scherstress- und Vorticitywerten im Bereich der Übergangszonen. Der Bereich zwischen Zentralstrom und Fersenregion besaß, wie auch in den beiden stärkeren Flüssen erkennbar, höhere Scherstress- und Vorticitywerte als der Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation. Die größere Haubenseparation vereinnahmte ein Gebiet von 32 mm<sup>2</sup> (9%) und war somit unwesentlich größer als bei stärkeren Flüssen. Die kleinere Ferse maß hingegen nur 10 mm<sup>2</sup> (3%). Die mittlere systolische Geschwindigkeit im Einstrom betrug  $0,18 \pm 0,04$  m/s und im Zentrum, kurz vor den Ausstromschenkeln,  $0,12 \pm 0,02$  m/s. Die Geschwindigkeit im distalen Schenkel lag bei  $0,19 \pm 0,03$  m/s und im proximalen Ausstrom bei  $0,27 \pm 0,05$  m/s.

Kleinere Scherstressbereiche fanden sich innerhalb der Separationszonen (siehe Tab. 1). Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Bei allen drei Flussstärken (140, 200, 260 ml/min) fanden sich die größeren Werte innerhalb der Fersenregion, jedoch ohne statistisch signifikant unterschiedlich zu sein. Beim Vergleich der Separationszonen innerhalb der unterschiedlichen Anastomosenmodelle fiel auf, dass die lokalen Scherstresswerte innerhalb der Haubenseparation dicht beieinander lagen. Lediglich im Bereich der Fersen-separation wies die Fersenzone der femoro-cruralen Patch-Prothese höhere Stresswerte auf (siehe Tab. 1). Einen statistisch signifikanten Unterschied gab es jedoch nur bei einem Fluss von 140 ml/min und bei 200 ml/min zwischen der Taylor- und FCPP Fersen-separation, wobei die FCPP höhere Stresswerte zeigte.

Beim Vergleich der Geschwindigkeiten innerhalb der Miller-Cuff- und Taylor-Patch-Anastomose, sowie der femoro-cruralen Patch-Prothese waren die Geschwindigkeiten innerhalb des Anstomosenmodelleinstroms bei allen drei Flussstärken (140, 200 und 260ml/min) nicht statistisch signifikant unterschiedlich (siehe Abb. 35). Innerhalb des distalen Ausstroms waren die lokalen Geschwindigkeiten bei der Taylor-Patch-Anastomose größer als bei der FCPP. Der Unterschied war statistisch signifikant. Innerhalb des proximalen Segmentes gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede (siehe Abb. 36).

## 3.2 Ausstromverhältnis distal:proximal = 25:75

### 3.2.1 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min

Das Strömungsmuster bei diesem veränderten Ausstromverhältnis zeigte einige Unterschiede im Vergleich zum 50:50-Ausstromverhältnis. Der Zentralstrom strömte in die Anastomose und teilte sich im Anastomosenzentrum in einen distalen und proximalen Anteil auf. Der proximale Anteil war bei diesem Strömungsverhältnis jedoch wesentlich stärker ausgeprägt. Es entstanden auch hier zwei Separationszonen, eine im Hauben- und eine im Fersenbereich. Die sich am Boden zeigende Stagnationszone war, im Vergleich zum 50:50-Ausstromverhältnis, weiter in Richtung proximales Ausstromsegment verschoben. Insgesamt erfuhr der gesamte Zentralstrom eine Verlagerung in Richtung proximales Ausstromsegment. Die Haubenseparation war die größte Separationszone, sie umfasste bei 250 ms eine Fläche von 104 mm<sup>2</sup>. Das entsprach 25% der Gesamtanastomosenfläche. Im zeitlichen Verlauf entwickelte sich in diesem Gebiet ein sich im Uhrzeigersinn drehender Wirbel, der bei 650 ms wieder verschwand. Auch bei diesem Wirbel fanden sich die höheren Geschwindigkeiten in der Peripherie. Die kleinere Fersenseparation belegte nur noch eine Fläche von 4 mm<sup>2</sup> (1%) und war somit die kleinste Fersenseparationszone bei der untersuchten Taylor-Patch-Anastomose. Die Stagnationszone belegte lediglich eine Fläche von 2 mm<sup>2</sup> (<1%). Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten beim Eintritt des Zentralstroms in die Anastomose lagen bei  $0,27 \pm 0,04$  m/s und kurz vor der Aufteilung im Anastomosenzentrum bei  $0,24 \pm 0,03$  m/s. Aufgrund der erhöhten proximalen Ausstromstärke kam es hier zu starken Fluidbeschleunigungen von  $1,3 \pm$  m/s, was energetisch jedoch sehr ungünstig war. Im distalen Ausstromsegment erreichten die Geschwindigkeiten lediglich einen Wert von  $0,34 \pm 0,08$  m/s.

Das Muster der Scherstress- und Vorticityverteilung war jedoch den anderen Modellen und Ausstromverhältnissen ähnlich. Die höchsten Werte in der Anastomose fanden sich in den Ausstromsegmenten und im Bereich der Übergangszonen. In diesem Modell fanden sich die höchsten Stresswerte im Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation, sie waren statistisch signifikant unterschiedlich. Die Scherstresswerte innerhalb der Separationszonen lagen, ebenso wie die Geschwindigkeiten, deutlich unterhalb derer des Zentralstroms. Beide Zonen wiesen jedoch im Vergleich zum 50:50-Strömungsverhältnis höhere Scherstresswerte auf. Aufgrund der Verkleinerung der Fersenseparation und der Verlagerung des Zentralstroms in Richtung proximaler Ausstrom fanden sich in der Fersenseparation höhere Scherstresswerte als im Haubenbereich (siehe Tab. 1). Die Unterschiede waren aber nicht statistisch signifikant.

Abb. 21: Taylor-Patch-Anastomose (25:75 und 260 ml/min)

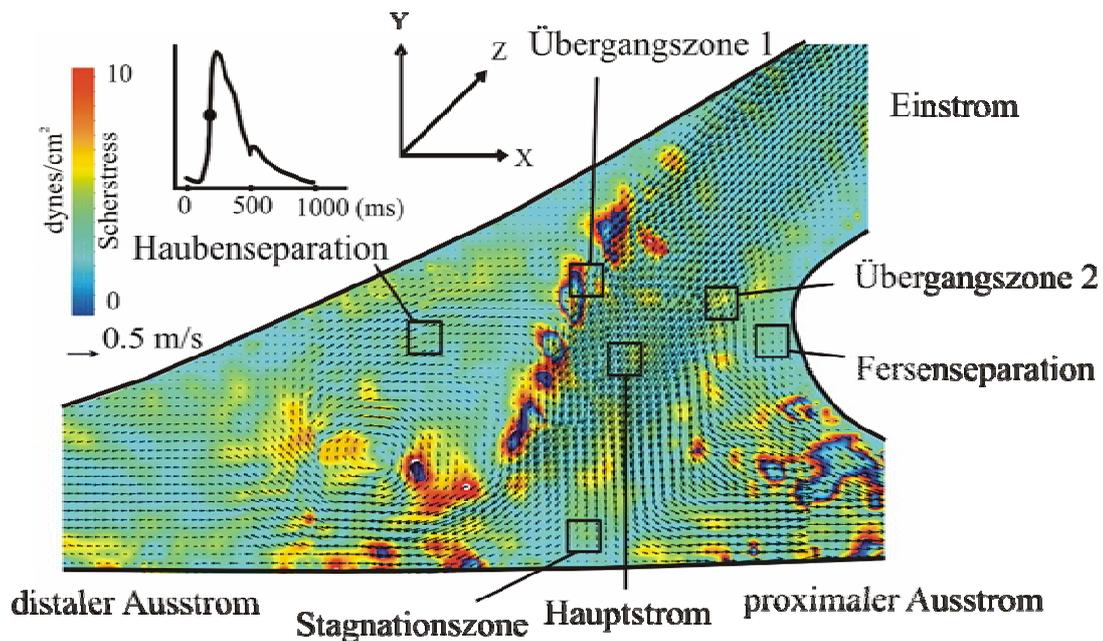


Abbildung der Taylor-Patch-Anastomose bei einem Ausstromverhältnis von 25:75 (distal:proximal). Deutlich zu erkennen ist der sich im Zentrum entwickelnde und mit dem Uhrzeigersinn rotierende Wirbel im Bereich der Haubenseparation und die deutlich kleiner ausgeprägte Fersenseparationszone.

### 3.2.2 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min

Das Strömungsverhalten ähnelte dem des stärkeren Flusses. Der Zentralstrom floss in das Zentrum der Anastomose und teilte sich dann in ungleichem Verhältnis in den schwächeren distalen und stärkeren proximalen Anteil auf. Auch hier entstanden zwei Separationszonen und eine weiter nach proximal verschobene Stagnationszone am Boden der Anastomose. Die Fläche der Haubenseparation war exakt so groß wie bei einem Fluss von 260 ml/min. Die Fersenseparation hingegen war bei 250 ms etwas größer als bei dem stärkeren Fluss. Sie vereinnahmte eine Fläche von 6 mm<sup>2</sup>, was einem Anteil von 1% der Gesamtfläche entsprach. Die Stagnationszone belegte lediglich eine Fläche von 3 mm<sup>2</sup> (1%). Die systolischen Geschwindigkeiten lagen unterhalb derer des stärkeren Flusses. So trat der Zentralstrom mit einer Geschwindigkeit von  $0,23 \pm 0,05$  m/s in die Anastomose ein und hatte kurz vor der Teilung eine Geschwindigkeit von  $0,20 \pm 0,06$  m/s. Der stärker durchströmte proximale Ausstrom besaß eine Fluidgeschwindigkeit von  $1,09 \pm 0,21$  m/s, der schwächer durchströmte distale Anteil hingegen nur eine Geschwindigkeit von  $0,28 \pm 0,04$  m/s.

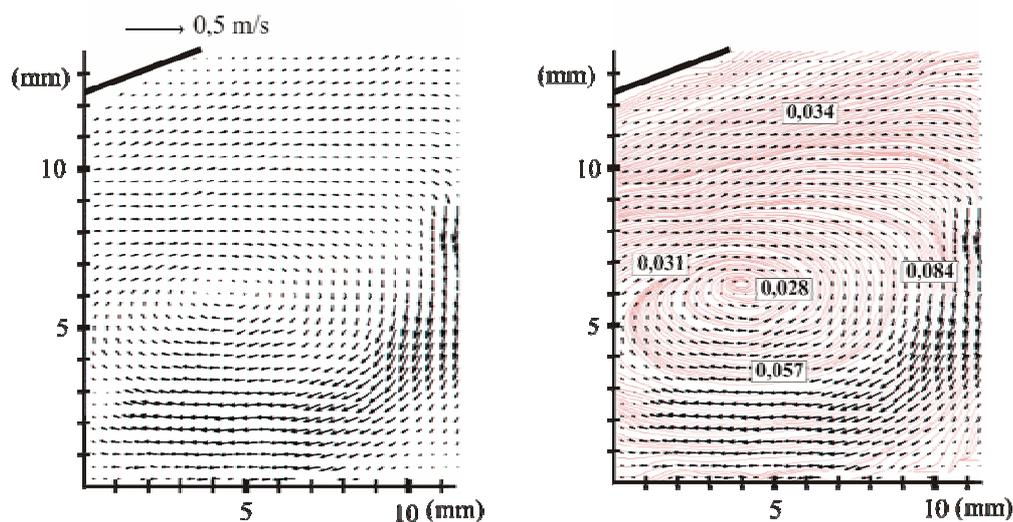
An den Übergangszonen fanden sich wieder die höchsten Scherstresswerte (siehe Tab. 1), wobei diese auch größer waren (statistisch nicht signifikant) als bei einem Ausflussverhältnis von 50:50. Zur Verteilung der Vorticity siehe Tab. 2.

### 3.2.3 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min

Mit der Reduzierung der Flussstärke waren die Ausprägung des Zentralstroms und somit auch die lokalen Geschwindigkeiten, der Scherstress und die Vorticity dezimiert. Die zwei sich bildenden Separationszonen besaßen, durch den sich abschwächenden Zentralstrom, nun die größte Ausdehnung. Die Haubenseparation belegte eine Fläche von 103 mm<sup>2</sup> (25%) und die Fersenseparation ein Gebiet von 7 mm<sup>2</sup> (2%). Bei der Stagnationszone wurde nur ein Areal von 3 mm<sup>2</sup> gemessen, dies entsprach 1% der Gesamtfläche. Der Zentralstrom hatte beim Eintritt in die Anastomose eine Geschwindigkeit von  $0,19 \pm 0,05$  m/s und kurz vor der Teilung im Zentrum  $0,17 \pm 0,04$  m/s. Die Velocity (Geschwindigkeit) innerhalb der Ausstromsegmente war geringer als bei den zwei vorigen Flussstärken, jedoch im proximalen Anteil immer noch größer als bei einem Ausstromverhältnis von 50:50. Der distale Ausstrom wies eine Geschwindigkeit von  $0,20 \pm 0,02$  m/s, der proximale hingegen noch eine Velocity von  $0,79 \pm 0,09$  m/s, auf. Bei allen drei Flussraten war die Rotation in z-Richtung im Bereich zwischen Zentralstrom und Ferse am stärksten ausgeprägt.

Bei allen drei untersuchten Flussstärken fanden sich bei diesem Ausstromverhältnis größere Scherstressbereiche im Hauben- als im Fersengebiet (siehe Tab. 1). Einen statistisch signifikanten Unterschied gab es nicht.

Abb. 22: Haubengebiet der Taylor-Patch-Anastomose (25:75 und 140 ml/min)

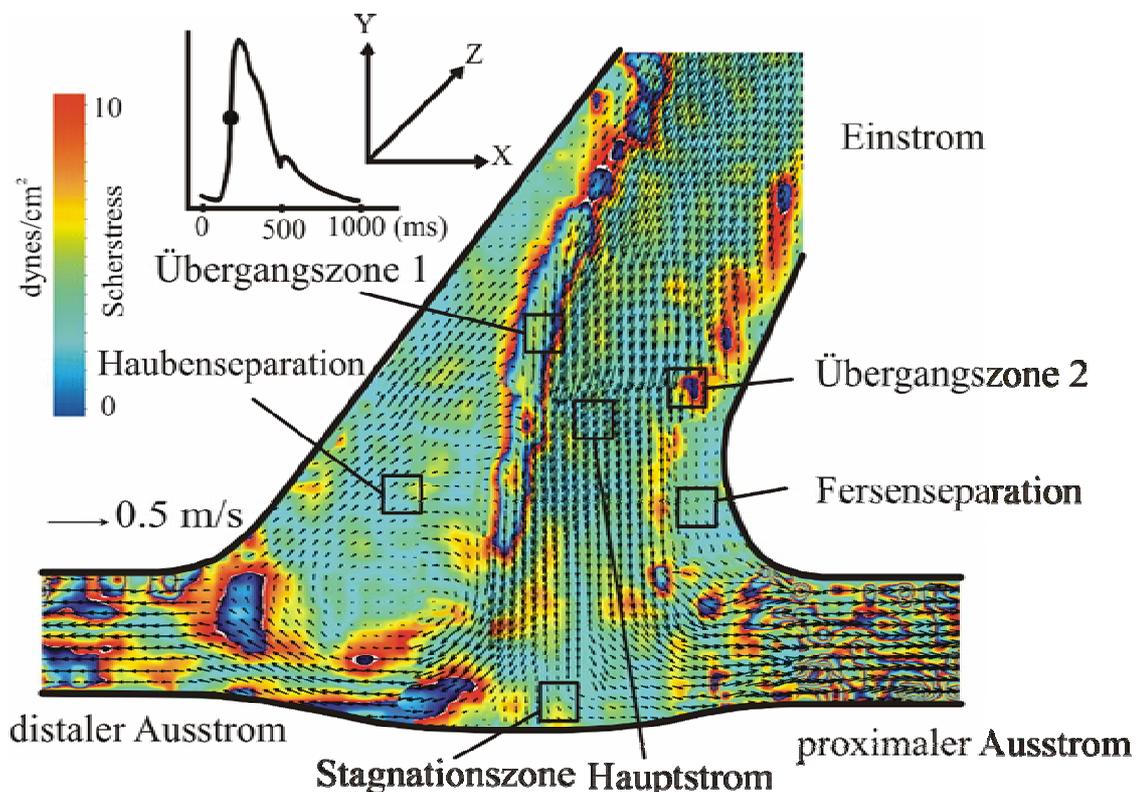


Deutlich im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel im Haubenbereich der Taylor-Patch-Anastomose. Der Wirbel belegte ein großes Gebiet und zeigte höhere periphere Geschwindigkeiten. Gut zu erkennen sind auch die Stromlinien in der rechten Abbildung. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

### 3.2.4 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min

In diesem Flussmodell wurde deutlich, welche Auswirkungen unterschiedliche Ausflussverhältnisse auf den Verlauf des Flussmusters besitzen. Der Zentralstrom trat mit lokal hohen Geschwindigkeiten in die Anastomose ein und teilte sich in einen distalen und proximalen Anteil auf. Das unterschiedliche Flussverhältnis hatte zur Folge, dass der Zentralstrom weiter nach proximal verlagert war als bei zwei gleich starken Ausstromverhältnissen. Das hatte wiederum zur Folge, dass die zwei sich bildenden Separationszonen unterschiedliche Größen aufwiesen als bei einem Ausstromverhältnis von 50:50. Die vorher kleinere Haubenseparation war nun bei 250 ms deutlich größer. Sie besaß eine Fläche von 53 mm<sup>2</sup> (17%) und die zuvor größere Fersenseparation hatte deutlich an Fläche eingebüßt, sie belegte lediglich 6 mm<sup>2</sup> (2%).

Abb. 23: Miller-Cuff-Anastomose (25:75 und 260 ml/min)



Zusammengesetztes Bild der Miller-Cuff-Anastomose mit zwei zu erkennenden Separationszonen und deutlich größeren Scherstressbereichen im Gebiet der Übergangszonen. Der Zentralstrom durchströmte die Anastomose und teilte sich in einen distalen und proximalen Ausstrom auf. Es entstand ein großer Wirbel im Haubenseparationsgebiet.

Die Stagnationszone war schwach ausgebildet. Ihre Fläche war kaum größer als etwa 3 mm<sup>2</sup> (<1%). Sie war weiter in Richtung proximaler Ausstrom verlagert als beim 50:50 Ausstrom. Bei 250 ms entwickelte sich nun in der Haubenregion ein im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel mit

größeren Geschwindigkeiten in der Peripherie, welcher bei 550 ms wieder verschwand. In der Fersenregion bildete sich im Vergleich zum 50:50 oder 75:25 Ausstromverhältnis kein Wirbel aus. Der systolische Zentralstrom trat mit einer Geschwindigkeit von  $0,28 \pm 0,05$  m/s in die Anastomose ein und hatte kurz vor der Teilung eine Geschwindigkeit von  $0,27 \pm 0,07$ . Bei diesem Flussmodell wurden die Geometrie und die daraus resultierenden Geschwindigkeitserhöhungen des Fluids, durch die sich abrupt verjüngenden Ausstromsegmente, wieder deutlich. Der stärker durchströmte proximale Anteil beschleunigte die Flüssigkeit auf eine Geschwindigkeit von  $1,61 \pm 0,30$  m/s sowie  $0,38 \pm 0,07$  m/s im distalen Segment.

Aufgrund des stark ausgeprägten Wirbels waren die Scherstresswerte in den Separationszonen höher als beim 50:50-Ausflussverhältnis (siehe Tab. 1), jedoch immer noch kleiner als in den Übergangszonen. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich.

### **3.2.5 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Der Zentralstrom durchlief die Anastomose und durchströmte dann in zwei Anteilen das distale und proximale Ausstromsegment. Auch in diesem Fall bildeten sich zwei Separationszonen, eine unwesentlich große Fersenseparation mit einer Fläche von  $7 \text{ mm}^2$  (3%) und eine große Haubenseparation von nun nur noch  $50 \text{ mm}^2$  (19%). In dieser bildete sich, wie schon zuvor, ein im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel aus. Beim Eintritt besaß der Zentralstrom eine Geschwindigkeit von  $0,26 \pm 0,04$  m/s und im Zentrum eine Geschwindigkeit von  $0,22 \pm 0,05$  m/s. Der distale Ausstrom wies eine Bewegung von  $0,30 \pm 0,08$  m/s auf und der proximale Anteil beschleunigte das Medium auf Werte von  $1,27 \pm 0,11$  m/s. Die Geschwindigkeiten innerhalb der Separationszonen waren, wie in allen Separationszonen, deutlich unterhalb derer des Zentralstroms.

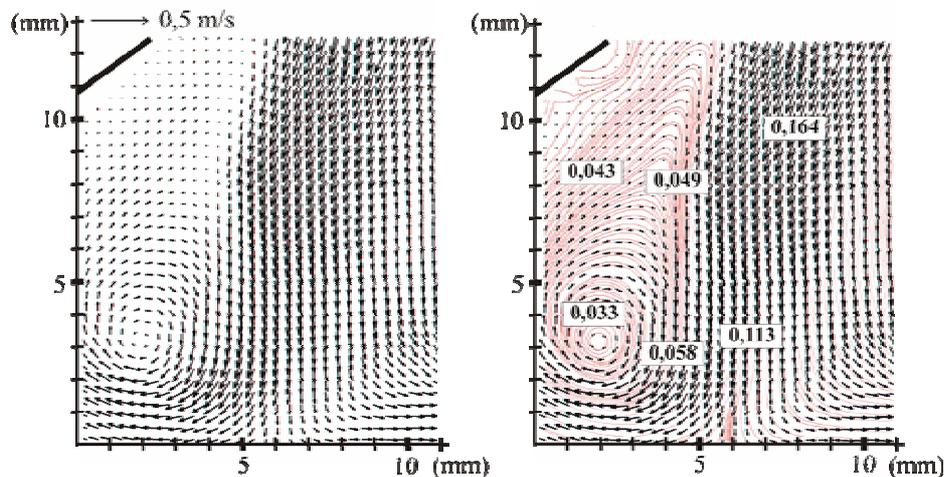
Der Scherstress im Gebiet der Separationszonen lag deutlich unterhalb der Werte im Übergangszonen- und Zentralstrombereich (siehe Tab. 1). Die Scherstresswerte im Fersengebiet waren kleiner als in der Ferse der Miller-Cuff-Anastomose bei einem Ausstromverhältnis von 50:50 und einem Fluss von 260 ml/min. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Zur Verteilung der Vorticity innerhalb der Anastomose siehe Tab. 2.

### **3.2.6 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min**

Durch die weitere Reduzierung der Flussstärke konnten insgesamt geringere Messwerte ersehen werden. Der Zentralstrom verhielt sich wie zuvor und auch die Separationszonen bildeten sich wie schon erwähnt aus. Der Bereich im Haubenareal nahm an Fläche ab, sie lag bei  $46 \text{ mm}^2$  (17%). Der Bereich im Fersengebiet gewann leicht an Fläche, er umfasste nun einen Bereich von

9 mm<sup>2</sup> (3%). Die Stagnationszone war, wie bei den anderen beiden Flussstärken, weiter nach proximal verschoben und belegte eine ähnlich große Fläche.

**Abb. 24: Haubengebiet der Miller-Cuff-Anastomose (25:75 und 140 ml/min)**



Ein großer sich im Uhrzeigersinn drehender Wirbel entwickelte sich innerhalb der Haubenseparation. Abbildung der durchschnittlichen Geschwindigkeit innerhalb des Wirbels und des Zentralstroms sowie Darstellung der Stromlinien. Sehr gut zu erkennen sind die hohen Geschwindigkeiten im Zentralstrom. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

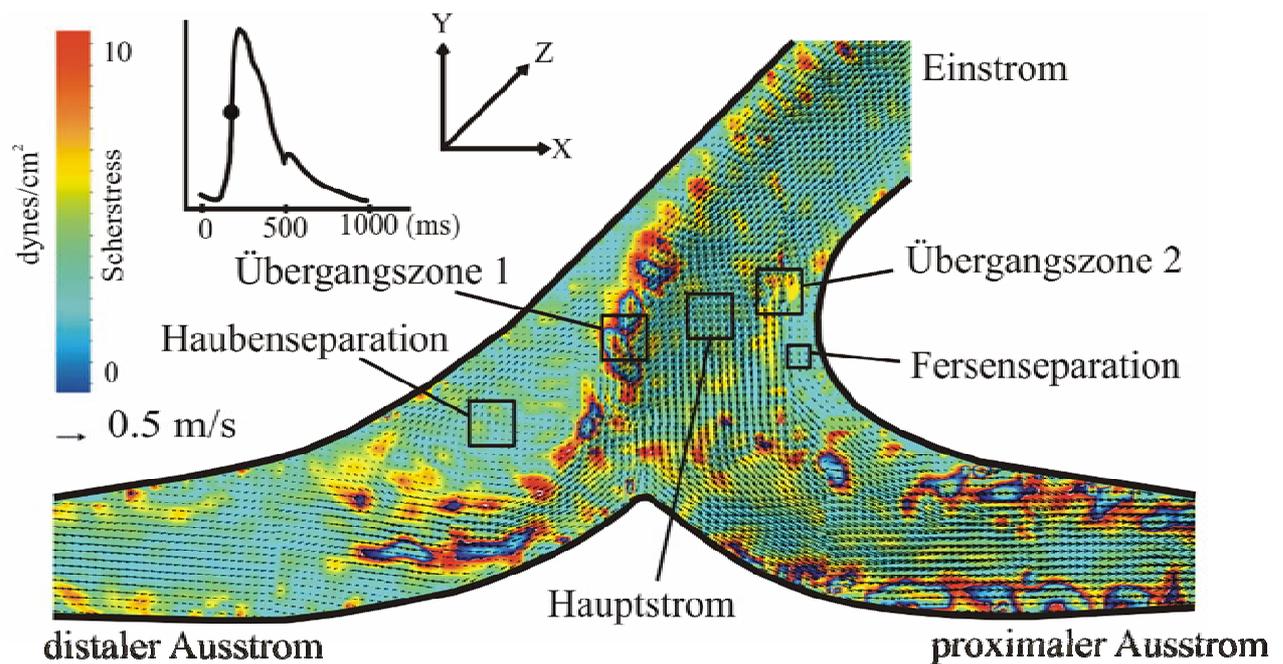
Der Scherstress war wie bei den zwei anderen Flussstärken an den Übergangszonen am größten, wobei der Bereich zwischen Zentralstrom und Haube höhere Werte aufwies als der zwischen Zentralstrom und Ferse (siehe Tab. 1). Dieser Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant. Die Verteilung der Vorticity ähnelte den beiden anderen Flussraten (Tab. 2 und Abb. 39).

Beim Vergleich der Separationszonen fiel auf, dass sich in der Fersenregion höhere Stresswerte fanden als im Haubengebiet. Statistisch signifikante Unterschiede hingegen gab es nicht.

### 3.2.7 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 260 ml/min

Die Darstellung des Flussmusters ergab eine im Vergleich zum 50:50 Ausstromverhältnis unterschiedliche Durchströmung der FCPP-Anastomose. Der Zentralstrom trat in die Anastomose ein und teilte sich in Richtung des distalen und proximalen Schenkels auf. Es entstanden zwei Separationszonen, eine sehr kleine Fersenregion und eine größere, gut ausgeprägte Haubenseparation. Beide besaßen ihr Maximum bei 250 ms. Im zeitlichen Verlauf entstand, anders als bei einem Flussverhältnis von 50:50, ein Wirbel im Haubenbereich, welcher sich nach 650 ms auflöste. Er wies höhere Geschwindigkeiten in der Peripherie auf als im Zentrum. Eine Stagnationszone war auch bei diesem Ausstromverhältnis nicht zu beobachten. Die Fläche der Haubenzzone war bei diesem Strommuster wesentlich größer als bei den beiden anderen. Sie maß eine Größe von 65 mm<sup>2</sup> und entsprach 17% der Gesamtfläche. Die Fersenregion war ähnlich ausgeprägt wie die Zone bei einem Flussverhältnis von 50:50, sie war jedoch kleiner und belegte eine Fläche von nur 5 mm<sup>2</sup> (1%).

Abb. 25: Femoro-crurale Patch-Prothese (25:75 und 260 ml/min)



Zusammengesetztes Bild der FCPP mit einem sich aufteilenden Zentralstrom, der sich in zwei Anteile aufzweigte und eine Hauben- und Fersenseparationszone entstehen ließ. Im Haubenbereich entwickelte sich ein im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel mit deutlich kleineren Scherstresswerten und Geschwindigkeiten als in den Übergangszonen. Auch die Fersenseparation wies kleinere Stresswerte auf, als die Übergangszonen. Eine Stagnationszone fand sich bei diesem Anastomosenmodell nicht.

Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten innerhalb des Zentralstroms lagen beim Eintritt in die FCPP-Anastomose bei  $0,31 \pm 0,08$  m/s und kurz vor Aufteilung in den distalen und

proximalen Schenkel noch bei  $0,26 \pm 0,09$  m/s. Aufgrund der fließenden Durchschnittsverkleinerung der Ausstromsegmente wurde das Fluid auf geringere Geschwindigkeiten beschleunigt, als es bei den anderen Modellen der Fall war. So erreichte das Fluid eine Velocity von  $0,15 \pm 0,02$  m/s im distalen Segment und  $0,55 \pm 0,09$  m/s im proximalen, stärker durchströmten Segment.

Die Stresswerte erreichten ihr Maximum im Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation und waren gleichzeitig größer als zwischen Zentralstrom und Fersenregion. Verglichen zum 50:50 Ausstromverhältnis waren sie doch insgesamt erhöht. Aufgrund des unterschiedlichen Flussverhaltens erhöhten sich die Stresswerte in den Separationszonen. Sie waren dennoch kleiner als in den Übergangszonen und im Zentralstrom. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Die größten Stresswerte waren im Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenzone zu finden (siehe Tab. 1). Die Stress und Vorticitywerte waren im Vergleich zum 50:50 Stromverhältnis in fast allen Bereichen größer. Die Rotation in z-Richtung war im Gebiet zwischen Zentralstrom und Fersenregion am stärksten ausgeprägt. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich.

### **3.2.8 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Der Zentralstrom verlief insgesamt homogener und im Bereich der Haubenseparationszone ausgeprägter, so dass diese an Fläche verlor. Sie belegte nun noch  $60 \text{ mm}^2$  (16%), war aber dennoch größer als die nur  $8 \text{ mm}^2$  (2%) große Fersenseparation. Auch in der Haube entstand der gleiche, sich im Uhrzeigersinn drehende, Wirbel. Die Geschwindigkeiten im zentralen Strom waren während der Systole bei durchschnittlich  $0,26 \pm 0,07$  m/s und kurz vor der Aufteilung noch bei  $0,23 \pm 0,8$  m/s.

Die Stagnationszonen besaßen die kleinsten Stresswerte (siehe Tab. 1). Die stärkste Vorticity wurde im Bereich der Übergangsbereiche gemessen, deutlich zu erkennen beim Betrachten der systolischen Werte (siehe Tab. 2).

### **3.2.9 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 140 ml/min**

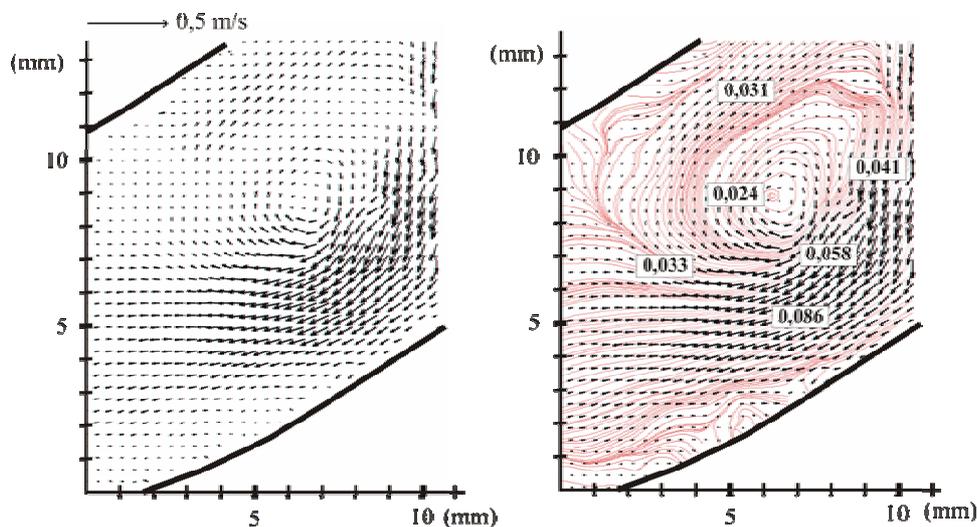
Die Flussvisualisierung zeigte deutlich den in die Anastomose eintretenden Zentralstrom, welcher die gleiche Teilung erfuhr wie bei den zwei stärkeren Flussraten. Insgesamt waren alle fluiddynamischen Messwerte kleiner als in den zwei vorher beschriebenen Fällen. Der Zentralstrom war im distalen Schenkel nicht mehr so stark und verkleinerte so die bei 250 ms entstehende Haubenseparation. Sie war nun am kleinsten von allen drei Flussraten und maß eine Fläche von  $53 \text{ mm}^2$  (14%). Die Fersenzone hatte trotz des immer noch im proximalen Schenkel

betonten Flusses leicht an Größe gewonnen und belegte eine Fläche von  $10 \text{ mm}^2$  (3%). Die Geschwindigkeit im Zentralstrom beim Eintritt in die Anastomose betrug  $0,21 \pm 0,06 \text{ m/s}$  und im Zentrum des Modells noch  $0,19 \pm 0,07 \text{ m/s}$ , im distalen Ausstrom lediglich  $0,10 \pm 0,08 \text{ m/s}$  und im proximalen Anteil  $0,34 \pm 0,09 \text{ m/s}$ .

Auch fanden sich bei diesem Fluss die kleinsten Stress- und Vorticitywerte, deren Verteilungsmuster dem der zwei stärkeren Flussraten entsprach. Die Ferseneparation zeigte bei allen drei Flussstärken der FCPP höhere Stresswerte im Fersenbereich als in der Haubenseparation. Statistisch waren diese Unterschiede nicht signifikant.

Die Scherstresswerte waren bei der Miller-Cuff-Anastomose größer als bei der Taylor-Patch-Anastomose und der FCPP. Einen statistisch signifikanten Unterschied stellten wir hingegen nicht fest. Beim Vergleich der Haubenregionen innerhalb aller drei Anastomosen fiel auf, dass die Haube der FCPP bei allen drei Flussstärken kleinere Stresswerte als die Miller-Haube, aber höhere Stresswerte als die Taylor-Patch-Anastomose, aufwies (siehe Tab. 1). Statistisch signifikant unterschiedlich waren die Werte hingegen nicht. Die Fersenregion zeigte jeweils kleinere Stresswerte als bei der Miller-Cuff- oder Taylor-Patch-Anastomose (siehe Tab. 1).

**Abb. 26: Haubengebiet der femoro-cruralen Patch-Prothese (25:75 und 140 ml/min)**



Im Vergleich zum 50:50 Ausstromverhältnis bildete sich beim 25:75 Ausstromverhältnis in der Haubenregion ein im Uhrzeigersinn rotierender Wirbel. Die lokalen Geschwindigkeiten zeigten die kleinsten Geschwindigkeiten innerhalb des Wirbelzentrums. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

Beim Vergleich der Geschwindigkeiten innerhalb der Miller-Cuff- und Taylor-Patch-Anastomose sowie der femoro-cruralen Patch-Prothese waren die Geschwindigkeiten innerhalb des Anstomosenmodelleinstroms bei allen drei Flussstärken (140, 200 und 260ml/min) statistisch

---

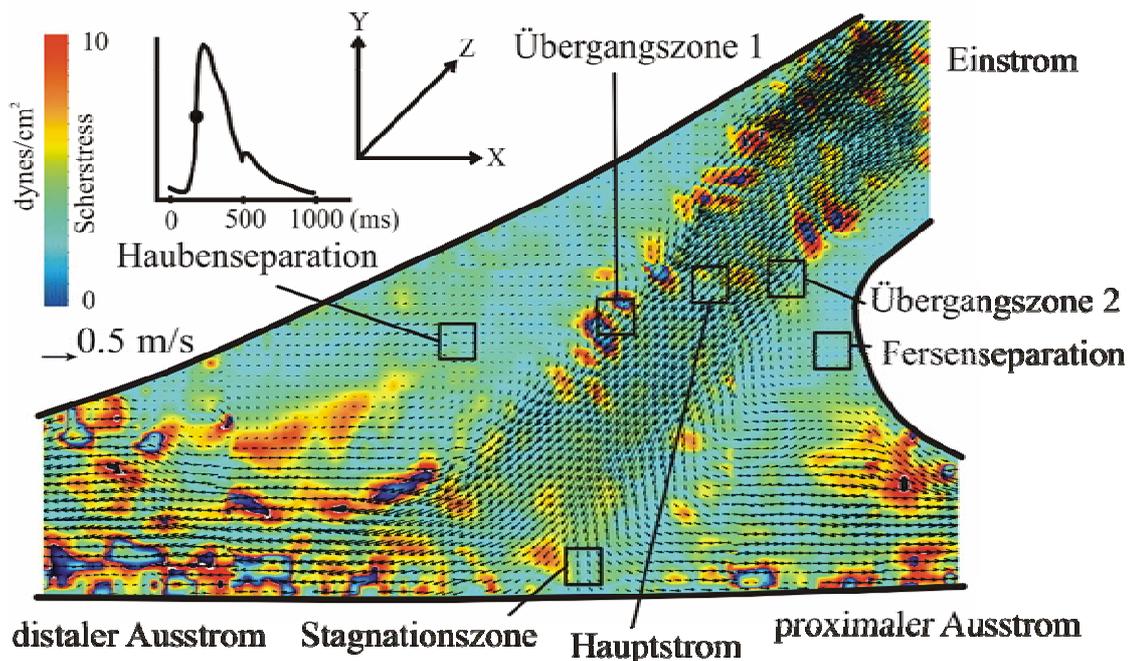
nicht signifikant unterschiedlich (siehe Abb. 37). Auch beim distalen Ausstromsegment konnten wir zwischen den drei Formen keine statistisch signifikanten Geschwindigkeitsunterschiede feststellen. Innerhalb des proximalen Segmentes waren die Geschwindigkeiten der Miller-Cuff- und der Taylor-Patch-Prothese größer als bei der femoro-cruralen Patch-Prothese (siehe Abb. 37). Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich.

### 3.3 Ausstromverhältnis distal:proximal = 75:25

#### 3.3.1 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min

Das Taylor-Patch-Anastomosen-Flussmuster, bei einem distal höheren Ausstrom als proximal, zeigte einen Zentralstrom mit lokal hohen Geschwindigkeiten. Dieser gelangte bis in das Anastomosenzentrum, wo er sich in einen stärker ausgeprägten distalen und in einen schwächeren proximalen Anteil aufteilte. Es entstanden zwei Separationszonen, eine im Haubenbereich und eine im Fersenbereich. Im Unterschied zu den anderen Flussmustern entstand bei diesem Ausstromverhältnis in jeder der zwei Separationszonen ein Wirbel, dessen Peripherie höhere Geschwindigkeiten aufwies als das Zentrum. Der sich gegen den Uhrzeigersinn drehende Wirbel in der Fersenregion bildete sich ab 250 ms aus und verschwand zu Beginn der Diastole. Der im Uhrzeigersinn rotierende Wirbel im Bereich der Hauben-

Abb. 27: Taylor-Patch-Anastomose (75:25 und 260 ml/min)



Die Rekonstruktion der Taylor-Patch-Prothese zeigt zwei sich entwickelnde Separationszonen im Fersen- und Haubenbereich mit lokal geringen Geschwindigkeiten und Scherstresswerten.

separation hatte seinen Entstehungsbeginn bei 250 ms und löste sich bei 650 ms auf. Die Bildung der Stagnationszone fand räumlich an einer ähnlichen Stelle statt wie bei einem 50:50 Ausstromverhältnis. Insgesamt ähnelte der Verlauf des Zentralstroms deutlich dem des Zentralstroms, wie er bei einem Verhältnis von 50:50 zu finden war. Die Haubenseparation belegte in ihrer größten Ausdehnung bei 250 ms eine Fläche von 76 mm<sup>2</sup> (18%). Die

Fersenseparation umspannte ein Areal von  $18 \text{ mm}^2$ , was 4% der Gesamtanastomose entsprach. Die Größe der Stagnationszone konnte nicht berechnet werden, da diese bei dem starken Fluss  $< 1 \text{ mm}^2$  betrug. Die systolischen Geschwindigkeiten des Zentralstroms lagen beim Eintritt in die Anastomose bei  $0,30 \pm 0,08 \text{ m/s}$  und kurz vor der Teilung bei  $0,26 \pm 0,10 \text{ m/s}$ . Der stärker durchströmte distale Ausstrom beschleunigte das Fluid auf  $1,22 \pm 0,30 \text{ m/s}$ , der schwächer durchströmte proximale Anteil hingegen auf eine Geschwindigkeit von  $0,37 \pm 0,07 \text{ m/s}$ .

Der Scherstress war neben den Ausstromgebieten auch bei diesem Modell wieder in den Bereichen der Übergangszonen am größten. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Im Bereich zwischen Fersenseparation und Zentralstrom herrschte erstmalig ein etwas höherer Scherstress als im Übergangsbereich zwischen Haubenzonen und Zentralstrom, der Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant. Im Bereich der Separationszonen waren kleinere Scherstresswerte zu finden als im Zentralstrom. Die Vorticity zeigte deutlich die größten Werte im Gebiet der Übergangszonen und kleine Werte in den Separationszonen.

### **3.3.2 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Der Zentralstrom trat in das Anastomosenzentrum ein und teilte sich in einen distalen und proximalen Anteil auf. Mit Abnahme der Flussstärke nahm auch die Ausbreitung des Zentralstroms zu, welcher jetzt etwas flächiger verlief. Durch diese Größenzunahme verringerte sich das Haubenseparationsareal. Die Fläche dieses Bereichs lag bei  $65 \text{ mm}^2$  (16%). Die Fersenseparation veränderte sich hingegen nicht so stark, sie belegte bei 250 ms eine Fläche von  $23 \text{ mm}^2$  (entspricht 6%). Der Zentralstrom traf nicht so stark auf den Boden wie bei 260 ml/min und die sich bildende Stagnationszone belegte ein Gebiet von  $2 \text{ mm}^2$  ( $< 1\%$ ). Die lokalen systolischen Geschwindigkeiten im Zentralstrom, bei Eintritt in die Anastomose, lagen bei  $0,26 \pm 0,09 \text{ m/s}$  und kurz vor der Teilung bei  $0,20 \pm 0,07 \text{ m/s}$ . Die Flüssigkeitsbeschleunigung in den Ausstromsegmenten reichte im distalen Teil bis auf  $0,90 \pm 0,08 \text{ m/s}$  und im proximalen Ausstrom auf  $0,29 \pm 0,10 \text{ m/s}$ .

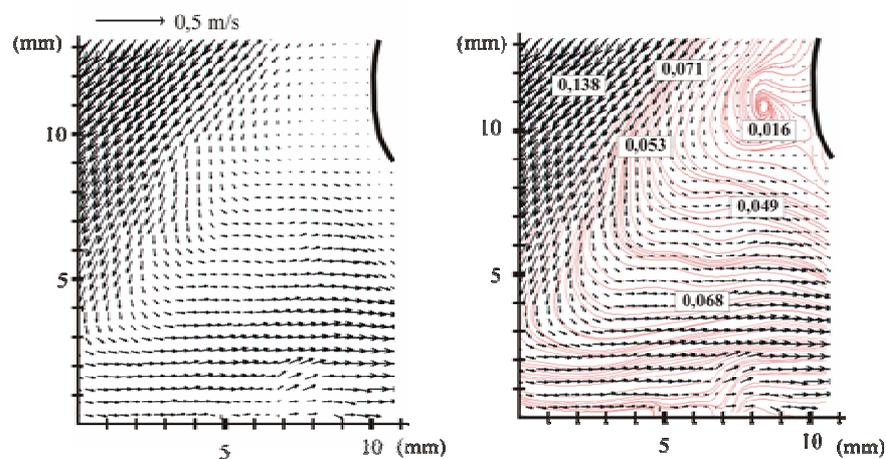
Das Muster der Scherstresswerte ähnelte dem Fluss von 260 ml/min, nur fanden sich kleinere Stresswerte (siehe Tab. 1). Die Vorticitywerte waren auch bei diesem Modell an den Übergangszonen am größten. Geringe Bewegungen in z-Richtungen fanden sich in den Separationszonen und im Hauptstrom (siehe Tab. 2 und Abb. 33).

### **3.3.3 Taylor-Patch-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min**

Der verringerte Fluss hatte zur Folge, dass der sich bildende Zentralstrom geringere lokale Geschwindigkeiten aufwies als bei den zwei höheren Stromstärken. Es bildeten sich wieder die

zwei bekannten Separationszonen und die von allen drei Flussstärken am größten ausgebildete Stagnationszone am Boden der Anastomose. Die Haubenseparation nahm im Vergleich zum nächst höheren Fluss an Fläche ab. Sie belegte nun nur noch eine Fläche von 58 mm<sup>2</sup>, was einem Anteil von 14% der Gesamtanastomose entsprach. Die kleinere Fersen- und Haubenseparation kongruierte mit der Fläche bei 200 ml/min. Durch den geringeren Fluss war die Stagnationszone am stärksten ausgeprägt, sie belegte ein Gebiet von 4 mm<sup>2</sup> (1%). Die vorher schon beschriebenen Wirbel in der Fersen- und Haubenregion bildeten sich zeitgleich, waren aber nicht so stark ausgeprägt.

**Abb. 28: Fersengebiet der Taylor-Patch-Anastomose (75:25 und 140 ml/min)**



Von Beginn der Systole bis zum Beginn der Diastole bildete sich innerhalb der Fersenregion ein sich gegen den Uhrzeigersinn drehender Wirbel. Deutlich erkennbar ist das Wirbelzentrum im Bereich der Separationszone. Die Geschwindigkeiten innerhalb des Wirbels lagen signifikant unter den Zentralstromgeschwindigkeiten. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

Die Geschwindigkeiten in der gesamten Anastomose lagen unterhalb derer bei höheren Flussstärken. So trat der Zentralstrom mit einer Velocity von  $0,21 \pm 0,05$  m/s in die Anastomose ein und hatte kurz vor der Aufzweigung eine Geschwindigkeit von  $0,17 \pm 0,08$  m/s. Die distale Ausstromgeschwindigkeit lag bei  $0,68 \pm 0,10$  m/s und im proximalen Schenkel bei  $0,21 \pm 0,06$  m/s.

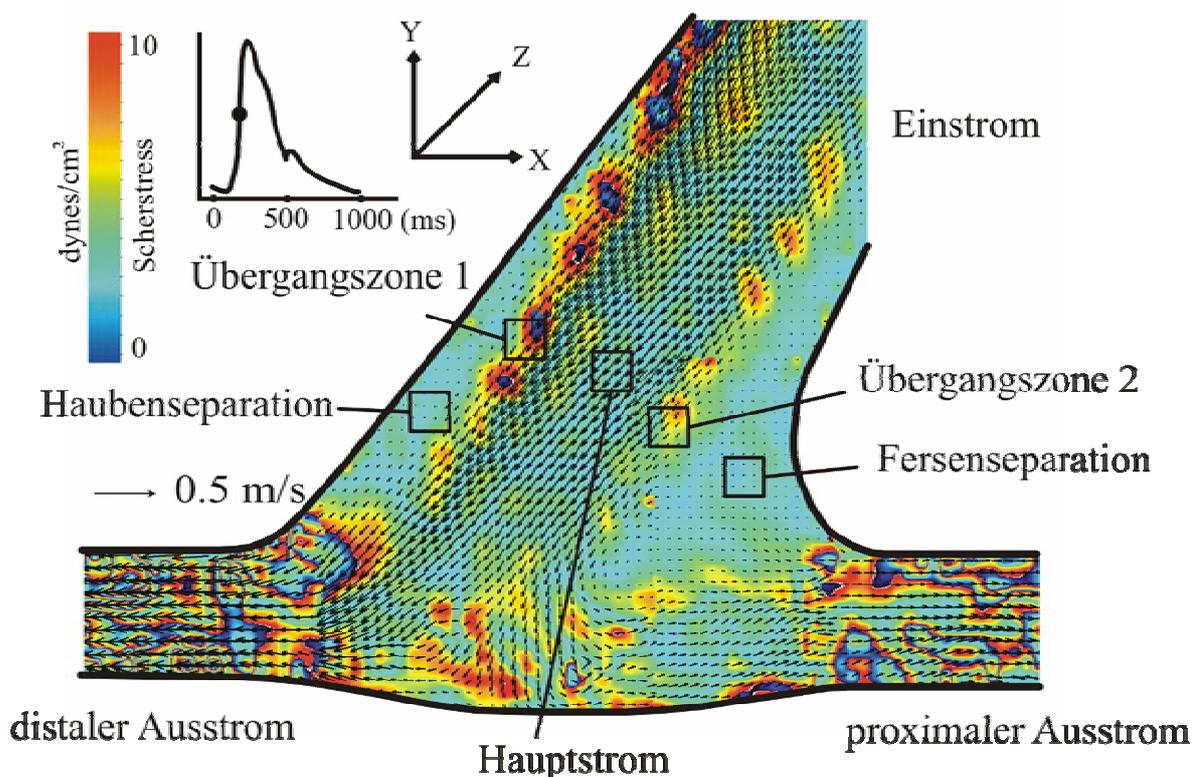
Im Bereich der Separationszonen und der Stagnationszonen waren die erreichten Stresswerte am geringsten. Auch hier war der größte Scherstresswert im Bereich der Übergangszone zwischen Zentralstrom und Fersen- und Haubenseparation und in den Ausstromsegmenten zu finden, wobei die Werte statistisch signifikant unterschiedlich waren.

Bei allen drei Flussstärken fanden sich in den Haubenseparationszonen kleinere Stresswerte als in der Fersenregion (siehe Tab. 1), statistisch signifikante Unterschiede fanden sich jedoch nicht.

### 3.3.4 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 260 ml/min

Die Flussvisualisierung in diesem Flussmodell zeigte einen die Anastomose durchströmenden Zentralstrom, welcher sich im Zentrum in einen stärker ausgeprägten distalen und einen schwächeren proximalen Anteil aufteilte. Es bildete sich eine kleine Haubenseparation mit einer Fläche von 9 mm<sup>2</sup> (3%) und eine Fersenzone, welche mit der bei einem Fluss von 50:50 vergleichbar ist. Die Ferse hatte eine Größe von 30 mm<sup>2</sup> (11%). Der sich hier gegen den Uhrzeigersinn entwickelnde Wirbel besaß seine maximale Ausdehnung allerdings schon bei 250ms.

Abb. 29: Miller-Cuff-Anastomose (75:25 und 260 ml/min)



Die Abbildung zeigt zwei deutlich ausgeprägte Separationszonen im Hauben- und Fersengebiet. Der die Anastomosenform durchströmende Zentralstrom teilte sich in zwei Anteile, einen distalen und einen proximalen, auf. Gut zu erkennen sind die deutlich höheren Stresswerte im Bereich der Übergangszonen zwischen Zentralstrom und Separationszone.

Das Flussmuster ähnelte insgesamt mehr dem Ausstromverhältnis von 50:50. Eine Stagnationszone war bei diesem Flussmodell nicht ausgeprägt. Die mittleren systolischen Geschwindigkeiten im Bereich des Einstroms lagen bei  $0,27 \pm 0,07$  m/s und hatten kurz vor Teilung des Zentralstroms in den distalen und proximalen Ausstrom eine Geschwindigkeit von  $0,24 \pm 0,1$  m/s. Zu sehr starken Fluidbeschleunigungen kam es in dem distalen Ausstrom-

segment mit Geschwindigkeiten von  $1,73 \pm 0,42$  m/s. Der proximale Anteil beschleunigte die Flüssigkeit allerdings nur auf  $0,56 \pm 0,10$  m/s.

Die Bereiche innerhalb der Fersenregion wiesen die geringsten Scherstresswerte auf. Die größten Werte fanden sich im Bereich der Zone zwischen Zentralstrom und Haubenseparation (siehe Tab. 1). Die Rotation in z-Richtung war im Gebiet zwischen Zentralstrom und Haubenseparation am stärksten ausgeprägt.

### **3.3.5 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 200 ml/min**

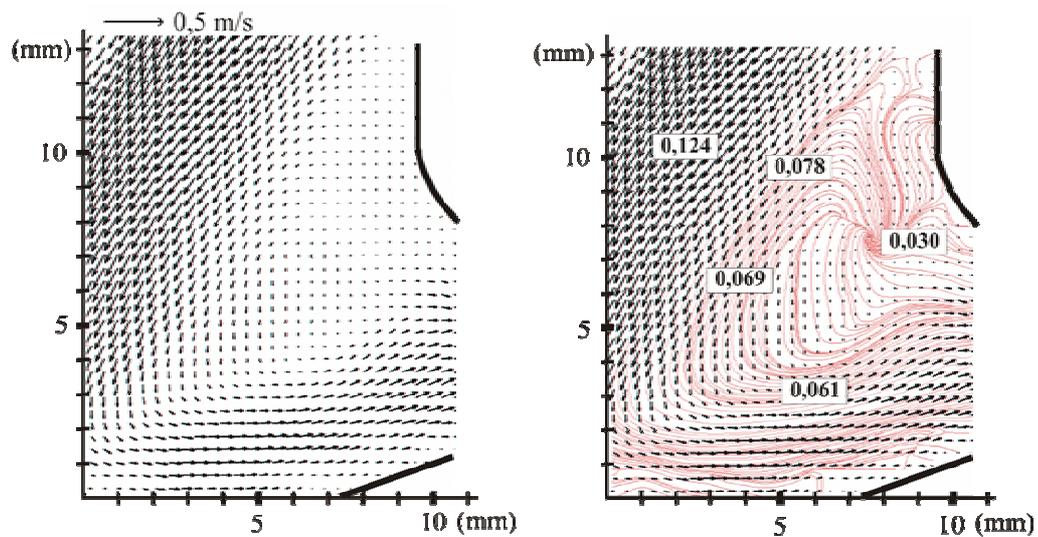
Bis auf geringere Messwerte bei der Geschwindigkeit, beim Scherstress und bei der Vorticity unterschied sich die Flussvisualisierung nicht von der der höheren Flussrate. Der Zentralstrom beim Eintritt in die Anastomose zeigte lokale systolische Geschwindigkeiten von  $0,25 \pm 0,08$  m/s und im Zentrum, kurz vor der Teilung, von  $0,18 \pm 0,07$  m/s. Im distalen Ausstromsegment wurde das Fluid auf  $1,35 \pm 0,21$  m/s beschleunigt und im proximalen, langsameren Anteil auf  $0,49 \pm 0,09$  m/s. Die Haubenseparation nahm im Vergleich zum stärkeren Fluss etwas an Fläche zu, sie belegte eine Fläche von  $10 \text{ mm}^2$  (4%). Das Gebiet der Fersenregion schrumpfte auf  $29 \text{ mm}^2$  (11%).

Im Bereich der Übergangszonen waren die Scherstress- und Vorticitywerte am deutlichsten ausgeprägt. Für den genauen Vergleich der Vorticity siehe Tab. 2. Die Separationszonen wiesen signifikant die kleinsten Stresswerte auf, für einen direkten Vergleich siehe Tab. 1.

### **3.3.6 Miller-Cuff-Anastomose bei einer Flussrate von 140 ml/min**

Der Zentralstrom trat auch hier in die Anastomose ein und teilte sich in die zwei schon beschriebenen Anteile. Die lokalen systolischen Geschwindigkeiten lagen deutlich über denen der Separationszonen. Der Zentralstrom hatte zu Beginn der Anastomosenform eine Geschwindigkeit von  $0,20 \pm 0,05$  m/s und im Zentrum, vor der Teilung, nur noch eine Geschwindigkeit von  $0,12 \pm 0,05$  m/s. Bei den Geschwindigkeiten in den Ausstromsegmenten hatte das Fluid deutlich an Geschwindigkeit verloren. So lag die systolische Geschwindigkeit im distalen Segment bei  $1,05 \pm 0,23$  m/s und im proximalen Segment bei  $0,34 \pm 0,08$  m/s. Die sich entwickelnde Haubenseparationszone war bei dieser Flussstärke am kräftigsten ausgeprägt, sie belegte eine Fläche von  $13 \text{ mm}^2$ , was einem Anteil von 5 % der Gesamtfläche entsprach. Die Fersenregion, mit dem darin gegen den Uhrzeigersinn verlaufenden Wirbel, belegte ein Gebiet von  $29 \text{ mm}^2$  (11%). Der Wirbel hatte wie bei allen drei Flussraten bei 250 ms seine größte Ausprägung und verschwand bei 550 ms. Er zeigte geringere Geschwindigkeiten im Zentrum und schnellere Bereiche in der Peripherie.

Abb. 30: Fersengebiet der Miller-Cuff-Anastomose (75:25 und 140 ml/min)



Innerhalb der sich entwickelnden Fersenseparationszone ist deutlich der gegen den Uhrzeigersinn rotierende Wirbel zu erkennen. Dieser entstand zu Beginn der Systole und besaß seine größte Ausdehnung schon bei 250 ms. Er endete mit Beginn der Diastole. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

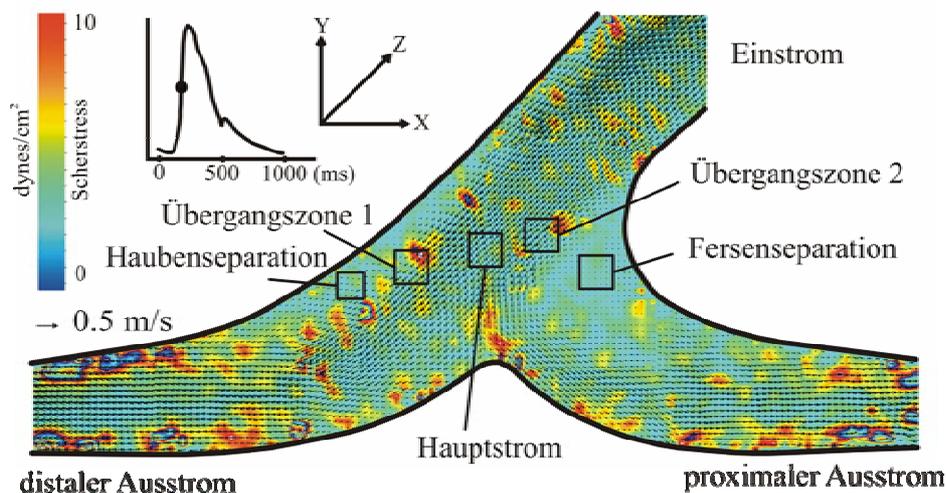
Die größten Vorticitywerte fanden sich im Bereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation. Im Bereich der Übergangszonen zwischen Zentralstrom und Fersenseparation waren sie kleiner. Die höchsten Scherstresswerte fanden sich neben den Ausstromgebieten ebenfalls in den Übergangszonen, sowie deutlich geringere Scherstresswerte in den Separationszonen der Anastomose. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich.

Bei allen drei unterschiedlichen Flussstärken (140, 200, 260 ml/min) waren die Stresswerte innerhalb der Ferse größer als im Gebiet der Haube. Einen statistisch signifikanten Unterschied gab es in unserem Modell jedoch nicht. Im Vergleich zu der Taylor-Patch-Anastomose fanden sich höhere Stresswerte im Bereich der Ferse und Haubenregion. Auch diese Werte waren statistisch nicht signifikant unterschiedlich.

### 3.3.7 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 260 ml/min

Das Flussmuster zeigte einen in die Anastomose eintreffenden Zentralstrom mit hohen Geschwindigkeiten. Dieser gelangte in das Zentrum der FCPP, wo er sich in einen distalen und proximalen Ausstrom separierte. Wie bei allen anderen untersuchten Modellen fanden sich hier ebenfalls Separationszonen in der Hauben- und Fersenregion. Die größere der beiden war die Fersenseparation, die bei 250 ms ihr Flächenmaximum besaß und ein Areal von 46 mm<sup>2</sup> (12%) belegte. Somit bildete sie die größte Separationszonenfläche der FCPP bei den untersuchten Ausstromverhältnissen. Die kleinere Haubenseparation belegte eine Fläche von 19 mm<sup>2</sup> (5%). Sie war somit die kleinste Haubenseparation aller untersuchten Ausstromverhältnisse in der FCPP. Im Bereich der Ferse entwickelte sich bei 150 ms ein sich gegen den Uhrzeiger drehender Wirbel, der bei 550 ms wieder verschwand. Auch bei diesem Wirbel konnte, wie bei allen anderen Anastomosenmodellen, festgestellt werden, dass es zu einer höheren Geschwindigkeitsverteilung in der Peripherie kam. Das Zentrum wies sehr geringe Geschwindigkeiten auf. Solch ein Wirbel konnte bei den beiden anderen Ausstromverhältnissen der FCPP nicht entdeckt werden.

Abb. 31: Femoro-crurale Patch-Prothese (75:25 und 260 ml/min)



Die Abbildung der zusammengesetzten Anastomose zeigt zwei sich deutlich entwickelnde Separationszonen im Fersen- und Haubenbereich, die durch den die Anastomose fließenden Zentralstrom entstanden. Es bildete sich, durch die besondere Geometrie der FCPP, keine Stagnationszone am Boden des Modells aus. Die Scherstresswerte im Bereich der Übergangszonen waren deutlich höher als in den Gebieten der Separationszonen.

Der Zentralstrom, welcher in die Anastomose eintrat, besaß zu Beginn eine Geschwindigkeit von  $0,32 \pm 0,07$  m/s, welche sich kurz vor der Teilung in den distalen und proximalen Schenkel auf  $0,24 \pm 0,06$  m/s reduzierte. Die distalen Geschwindigkeiten lagen über den proximalen. Sie

betragen distal  $0,54 \pm 0,20$  m/s und proximal  $0,22 \pm 0,05$  m/s.

Die Verteilung des Scherstressess folgte grundsätzlich dem gleichen Muster, aller untersuchten Modelle und Ausstromverhältnisse. Die höchsten Werte fanden sich im Bereich der Übergangszonen (siehe Tab. 1), wobei der Bereich zwischen Zentralstrom und Haube signifikant über den Separationszonen lag, und auch größer war als innerhalb des Zentralstroms. In den Separationszonen waren die kleinsten Werte zu ermitteln (siehe Tab. 1). Die größten Vorticitywerte ließen sich im Bereich zwischen Zentralstrom und Separationszone finden.

### **3.3.8 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 200 ml/min**

Der Zentralstrom teilte sich im Zentrum in einen stark ausgeprägten distalen und schwach ausgebildeten proximalen Anteil. Es bildete sich wie bei allen untersuchten FCPP Flussmustern keine Stagnationszone aus. Die zwei sich entwickelnden Separationszonen erhielten ihre maximale Ausdehnung, wie fast alle Zonen, bei 250 ms. Die Ausdehnung der Haubenseparation änderte sich nicht, sie betrug immer noch  $19 \text{ mm}^2$  (5%). In der Fersenseparation fand eine Flächenreduzierung statt, sie nahm nur noch eine Fläche von  $44 \text{ mm}^2$  (12%) ein. Auch in der Ferse war der schon zuvor erwähnte Wirbel zu finden. Die systolische Geschwindigkeit des in die Anastomose eintretenden Zentralstroms betrug  $0,27 \pm 0,07$  m/s und wurde kurz vor der Schenkelteilung auf  $0,22 \pm 0,07$  m/s abgebremst. Die Geschwindigkeit im distalen Schenkel betrug  $0,46 \pm 0,10$  m/s und im proximalen  $0,17 \pm 0,05$  m/s.

Die Stresswerte und die Vorticity waren in den Übergangszonen am größten. Innerhalb der Systole waren die deutlichen Unterschiede bei der Vorticityverteilung gut zu erkennen. Besonders hohe Rotationen der Stresswerte in z-Richtung fanden sich in den Übergangszonen zwischen dem gut ausgeprägten Zentralstrom und den Separationszonen im Hauben- und Fersenbereich (siehe Tab. 2).

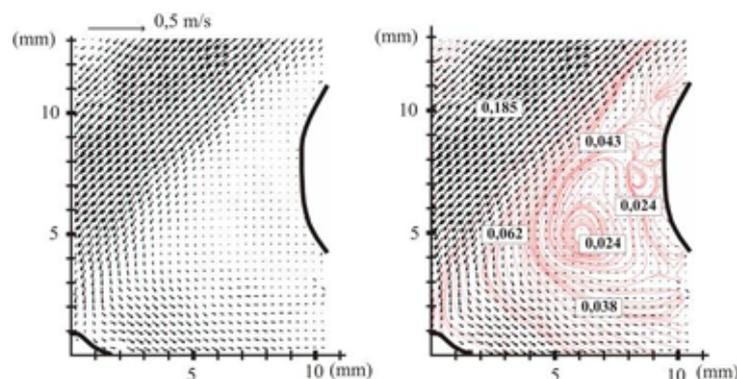
### **3.3.9 Femoro-crurale Patch-Prothese (FCPP) bei einer Flussrate von 140 ml/min**

Die Flussvisualisierung zeigte keine deutlichen Unterschiede zu den zwei höheren Flussraten. Der Zentralstrom betrat die FCPP mit einer Geschwindigkeit von  $0,21 \pm 0,05$  m/s und besaß kurz vor der Aufteilung noch eine Fluidbewegung von  $0,17 \pm 0,05$  m/s. Der langsamere proximale Ausstrom hatte eine Geschwindigkeit von  $0,11 \pm 0,03$  m/s, wohingegen der distale, stärker durchflossene und somit schnellere Ausstrom, eine Geschwindigkeit von  $0,38 \pm 0,09$  m/s besaß. Die zwei sich auch hier bildenden Separationszonen besaßen im Haubenbereich eine Fläche von  $20 \text{ mm}^2$  (5%) und im Fersengebiet von nur noch  $41 \text{ mm}^2$  (11%).

Die Stresswerte waren im Vergleich zu den andern Flussstärken kleiner, ebenso die Vorticity. Deutlich große Stresswerte waren in den Übergangszonen zu finden.

Bei allen drei Flussstärken (140, 200 und 260 ml/min) fanden sich bei der FCPP im Gebiet der Fersenregion kleinere Scherstresswerte als im Haubenseparationsgebiet (siehe Tab. 1). Statistisch signifikant unterschiedliche Werte fanden sich jedoch nicht. Im Vergleich zu den anderen Anastomosenformen fiel auf, dass sich bei einer Flussstärke von 200 ml/min kleinere Stresswerte in der Haubenregion fanden als bei der Taylor-Patch-Anastomose. Die Werte waren statistisch signifikant unterschiedlich. Im Vergleich zu der Miller-Cuff-Anastomose waren die Stresswerte nicht statistisch signifikant unterschiedlich. Auch beim Vergleich der Fersenregion ermittelten wir keinen statistisch signifikanten Unterschied. Im Haubenbereich fanden sich die größten Stresswerte in der FCPP, gefolgt von der Miller-Cuff-Anastomose und gefolgt von der Taylor-Patch-Anastomose. Für den Vergleich der Fersenregion siehe Tab. 1.

**Abb. 32: Fersengebiet der femoro-cruralen Patch-Prothese (75:25 und 140 ml/min)**

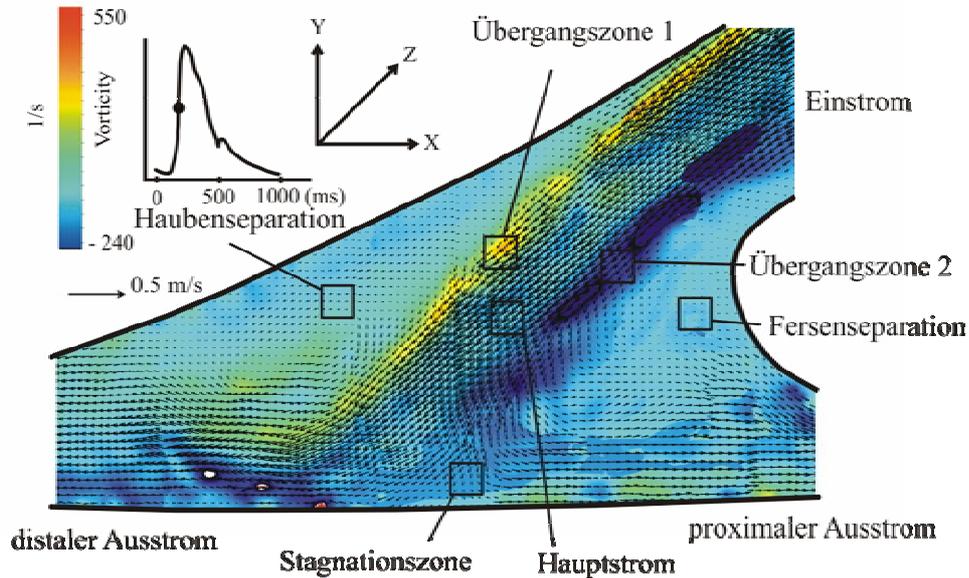


Bei der femoro-cruralen Patch-Prothese bei einem Ausflussverhältnis von 75:25 (distal:proximal) entwickelte sich innerhalb der Fersenregion ein Wirbel. Deutlich zu sehen sind die Stromlinien innerhalb dieses Wirbels, die eine Rotation gegen den Uhrzeigersinn erkennen lassen. Die Geschwindigkeiten innerhalb der Peripherie waren größer als im Wirbelzentrum. Geschwindigkeiten angegeben in m/s.

Beim Vergleich der Geschwindigkeiten innerhalb der Miller-Cuff- und Taylor-Patch-Anastomose sowie der femoro-cruralen Patch-Prothese waren die Geschwindigkeiten innerhalb des Anastomosenmodelleinstroms, bei allen drei Flussstärken (140, 200 und 260ml/min), statistisch nicht signifikant unterschiedlich. Das Geschwindigkeitsprofil der drei Anastomosenmodelle im Einstrombereich, erwies sich als annähernd gleich (siehe Abb. 38). Die Geschwindigkeiten der FCPP waren im distalen und proximalen Ausstrom am kleinsten. Lediglich bei einem Fluss von 140 ml/min fanden sich höhere Geschwindigkeiten bei der Miller-Cuff-Anastomose als bei der Taylor-Patch- und der femoro-cruralen Patch-Prothese, welche statistisch signifikant unterschiedlich waren.

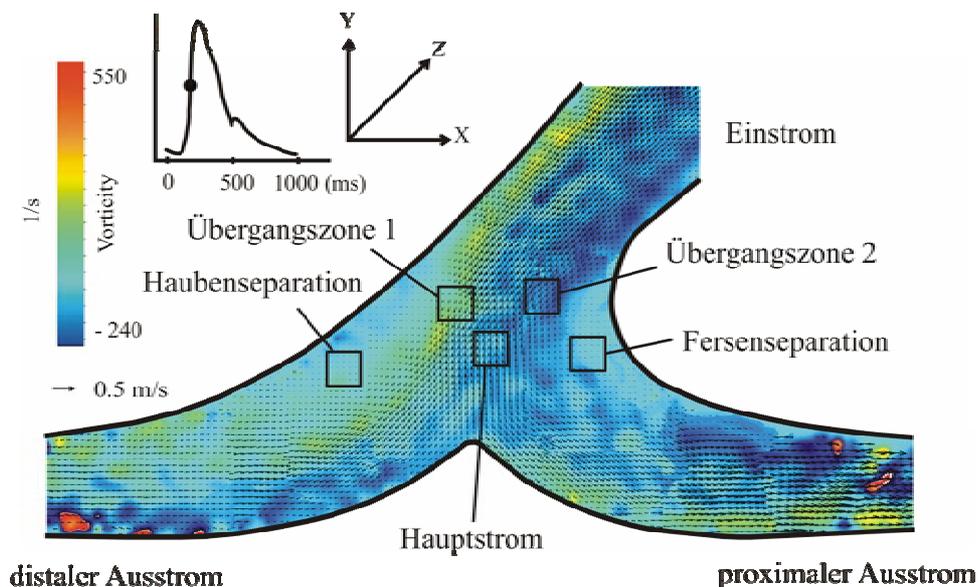
### 3.4 Abbildungen und Tabellen

Abb. 33: Taylor-Patch-Anastomose (75:25 und 200 ml/min)



Zusammengesetztes Modell der Taylor-Patch-Anastomose mit farbiger Darstellung der Vorticity (Rotation in z-Richtung), welche die rotatorischen Scherstresskräfte beschreibt. Gut zu erkennen sind die Hauben- und Fersenseparationen. Bei einem positiven Vorzeichen rotierte das Flussgebiet in Richtung Uhrzeigersinn und bei negativem Vorzeichen gegen ihn. Die stärksten Rotationen fanden sich im Bereich der Übergangszonen zwischen Zentralstrom und Separationszonen.

Abb. 34: Femoro-crurale Patch-Prothese (50:50 und 260 ml/min)



Zusammengesetztes Bild der FCPP und graphische Darstellung des Vorticity-Verteilungsmusters. Deutlich zu erkennen sind die größten Rotationen innerhalb der Übergangszonen.

Tab. 1: Scherstress in unterschiedlichen Anastomosengebieten

Anastomosen Formen	Ferse	Haube	Stag.Zone	Überg.-zone	Zentralstrom	Distaler Ausstrom	Prox.-Ausstrom
<b>Ausstromverhältnis 50:50</b>							
Taylor-260ml	0,43±0,19	0,36±1,20	0,50±0,24	1,08±0,80	0,88±0,71	1,3±0,28	4,27±2,5
Miller-260ml	0,41±0,21	0,46±0,22	0,54±0,24	1,68±1,32	0,63±0,43	5,76±5,13	5,69±4,61
FCPP-260ml	0,37±0,09	0,54±0,27	-----	1,50±1,36	0,91±0,68	1,16±0,63	2,76±2,00
Taylor-200ml	0,28±0,09	0,24±0,11	0,35±0,20	0,98±0,73	0,72±0,53	1,15±0,59	2,62±2,13
Miller-200ml	0,31±0,11	0,38±0,20	0,47±0,28	1,33±1,20	0,99±0,24	3,75±3,25	4,60±3,72
FCPP-200ml	0,26±0,04	0,52±0,18	-----	1,24±0,86	0,84±0,44	0,90±0,55	1,95±1,44
Taylor-140ml	0,20±0,05	0,17±0,05	0,27±0,14	0,68±0,40	0,49±0,33	0,95±0,63	2,28±1,97
Miller-140ml	0,19±0,06	0,24±0,13	0,38±0,25	1,02±0,90	0,41±0,24	2,98±2,22	3,22±2,10
FCPP-140ml	0,19±0,05	0,38±0,13	-----	0,82±0,49	0,55±0,28	0,78±0,54	1,69±1,37
<b>Ausstromverhältnis 25:75</b>							
Taylor-260ml	0,53±0,35	0,56±0,30	0,44±0,20	1,89±1,78	0,82±0,49	1,21±0,79	6,97±5,54
Miller-260ml	0,65±0,37	0,85±0,25	0,84±0,46	2,58±2,20	1,15±0,82	2,30±2,00	6,65±5,23
FCPP-260ml	0,52±0,31	0,58±0,31	-----	2,19±2,10	0,98±0,83	0,88±0,65	1,64±1,10
Taylor-200ml	0,44±0,28	0,47±0,29	0,39±0,22	1,53±1,43	0,73±0,44	1,16±0,79	6,77±6,08
Miller-200ml	0,53±0,29	0,68±0,23	0,62±0,33	2,53±2,12	0,83±0,52	2,00±1,78	6,43±4,46
FCPP-200ml	0,40±0,20	0,54±0,30	-----	2,02±1,88	0,85±0,54	0,72±0,54	1,27±0,93
Taylor-140ml	0,32±0,19	0,43±0,25	0,35±0,13	1,16±1,06	0,61±0,40	0,97±0,67	5,19±4,24
Miller-140ml	0,38±0,19	0,49±0,19	0,45±0,17	1,82±1,43	0,76±0,46	1,56±1,45	6,03±5,00
FCPP-140ml	0,32±0,24	0,48±0,18	-----	1,44±1,27	0,79±0,52	0,60±0,47	1,15±0,45
<b>Ausstromverhältnis 75:25</b>							
Taylor-260ml	0,51±0,35	0,54±0,19	0,58±0,33	1,31±0,88	0,98±0,71	3,42±2,67	1,50±1,19
Miller-260ml	0,64±0,41	0,68±0,36	0,95±0,46	2,03±1,83	0,84±0,45	7,63±5,38	3,56±2,85
FCPP-260ml	0,68±0,28	0,61±0,37	-----	1,46±1,00	0,88±0,55	1,77±0,97	1,26±0,94
Taylor-200ml	0,41±0,19	0,46±0,12	0,21±0,12	1,08±0,92	0,80±0,57	3,03±2,54	1,45±1,14
Miller-200ml	0,45±0,26	0,58±0,30	0,89±0,38	1,76±1,50	0,69±0,42	6,64±5,01	3,07±2,70
FCPP-200ml	0,60±0,25	0,50±0,15	-----	1,24±0,78	0,73±0,39	1,45±0,84	1,12±0,77
Taylor-140ml	0,38±0,13	0,40±0,14	0,19±0,09	0,85±0,54	0,67±0,38	2,33±2,07	1,33±0,90
Miller-140ml	0,39±0,22	0,49±0,24	0,74±0,37	1,37±1,04	0,58±0,40	6,25±5,27	2,45±1,81
FCPP-140ml	0,49±0,23	0,39±0,21	-----	1,05±0,78	0,69±0,29	1,52±0,87	1,05±0,91

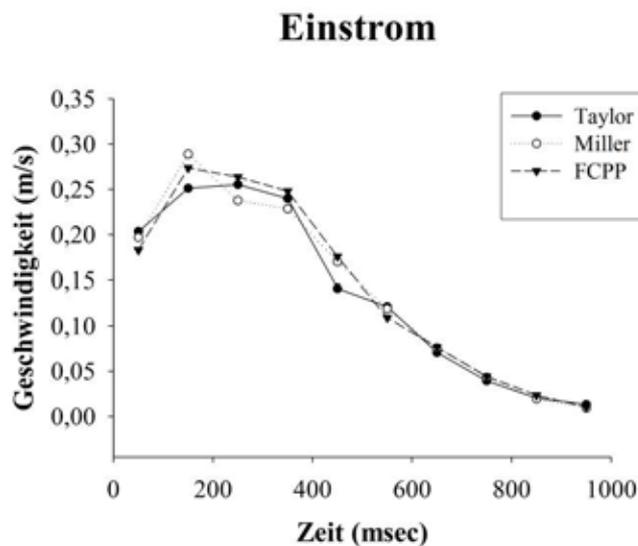
Scherstress-Mittelwerte in dynes/cm<sup>2</sup> ± Standardabweichung, während der gesamten Herzaktion. (Ferse = Fersen-separation, Haube = Haubenseparation, Stag.Zone = Stagnationszone, Überg.-zone = Übergangszone zwischen Hauptstrom und Haubenseparation, Zentralstrom, distaler Ausstrom, prox.-Ausstrom = proximaler Ausstrom).

Tab. 2: Vorticity in unterschiedlichen Anastomosegebieten

Anastomosen- Formen	Fersensepa.	Haubensepa.	Stag.Zone	Überg.-zone	Zentralstrom
<b>Ausstromverhältnis 50:50</b>					
Taylor-200ml	7,21±4,51	-13,93±11,45	-9,24±9,00	67,80±32,73	-39,19±17,64
Miller-200ml	18,48±9,03	-19,98±13,63	7,78±5,72	57,74±44,47	-24,71±21,00
FCPP-200ml	16,55±3,21	-20,86±12,11	-----	48,52±27,01	-23,84±14,91
<b>Ausstromverhältnis 25:75</b>					
Taylor-200ml	13,49±11,21	-44,15±5,70	-9,63±8,31	103,19±55,30	-12,98±7,56
Miller-200ml	31,69±24,40	-51,49±18,48	-13,658±516	121,49±69,11	-18,05±12,34
FCPP-200ml	25,01±10,52	-49,15±14,49	-----	96,81±64,17	-38,47±29,23
<b>Ausstromverhältnis 75:25</b>					
Taylor-200ml	24,29±19,01	-26,27±14,35	-3,47±3,91	72,23±68,04	-8,63±6,36
Miller-200ml	31,59±12,50	-36,29±21,22	-17,56±15,41	145,23±57,79	-42,52±38,54
FCPP-200ml	48,81±12,41	-27,02±12,35	-----	98,01±65,02	-19,10±16,18

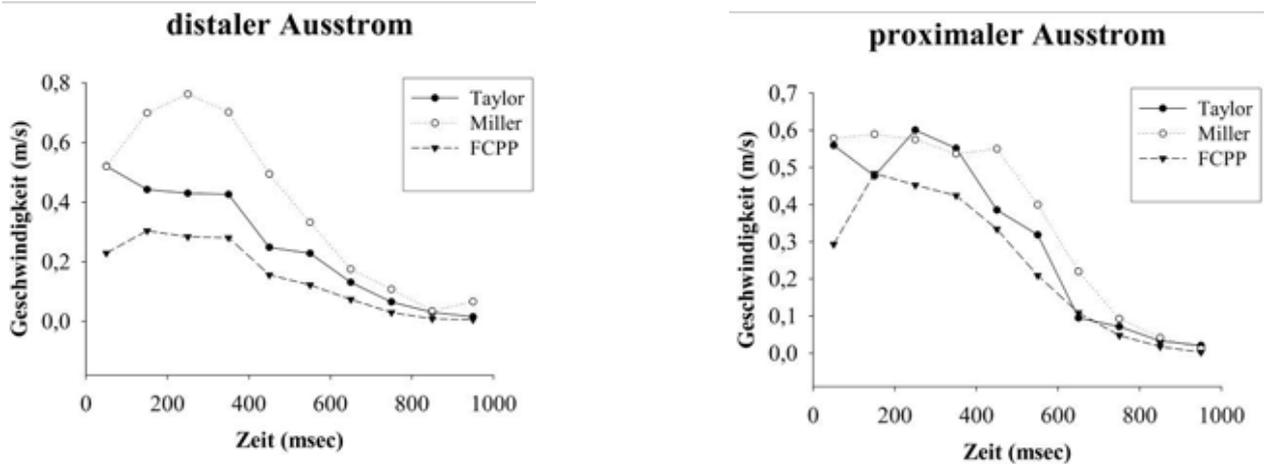
Die Tabelle zeigt exemplarisch die Verteilung der Vorticity (Rotation in z-Richtung) innerhalb der verschiedenen Anastomosenformen. Angegeben sind die systolischen Vorticity-Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Deutlich zu erkennen sind die größeren Werte im Übergangsbereich zwischen Zentralstrom und Haubenseparation. Ein negatives Vorzeichen bedeutet Drehung gegen den Uhrzeigersinn und ein positives stellt die Rotation mit dem Uhrzeigersinn dar. (Ferse = Fersenseparation, Haube = Haubenseparation, Stag.Zone = Stagnationszone, Überg.-zone = Übergangzone zwischen Hauptstrom und Haubenseparation, Zentralstrom, distaler Ausstrom, prox.-Ausstrom = proximaler Ausstrom).

Abb. 35: Geschwindigkeitsverteilung (50:50 und 200 ml/min)



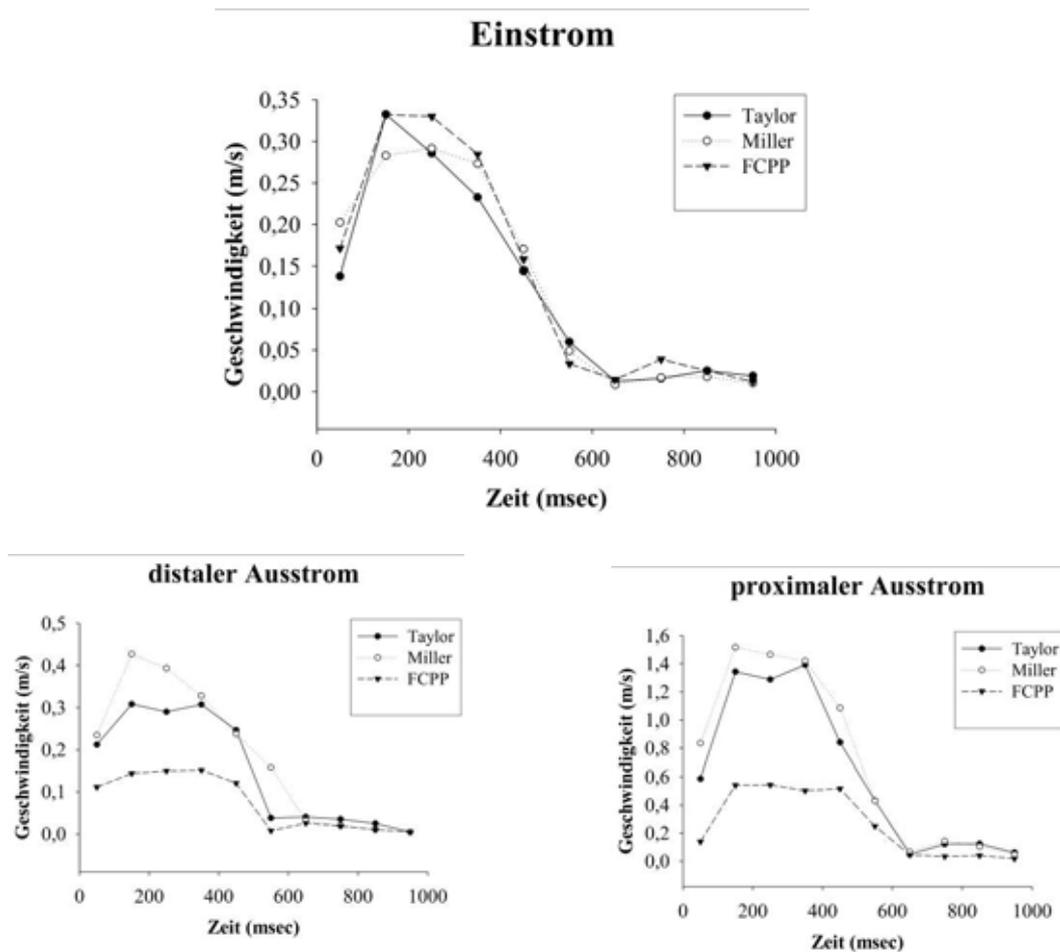
Darstellung der Hauptstromgeschwindigkeiten innerhalb des Einstroms. Deutlich zu erkennen sind die nahezu identischen Geschwindigkeitsprofile der drei Anastomosenformen.

Abb. 36: Geschwindigkeitsverteilung (50:50 und 200 ml/min)



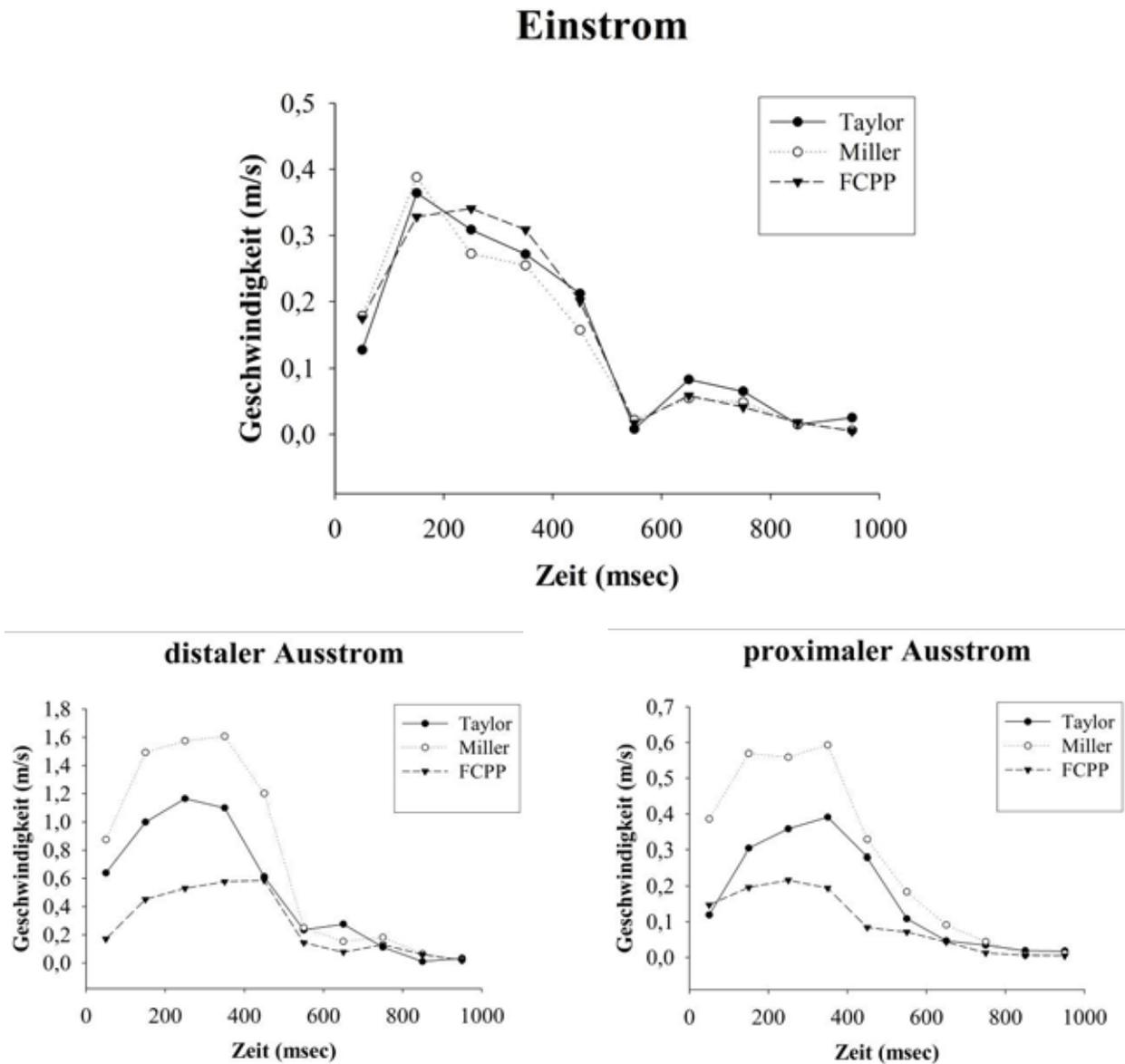
Darstellung der Geschwindigkeitsprofile im distalen und proximalen Ausstrom. Gut zu erkennen sind die höheren Geschwindigkeiten der Miller-Cuff-Anastomose im Bereich des distalen Ausstroms.

Abb. 37: Geschwindigkeitsverteilung (25:75 und 200 ml/min)



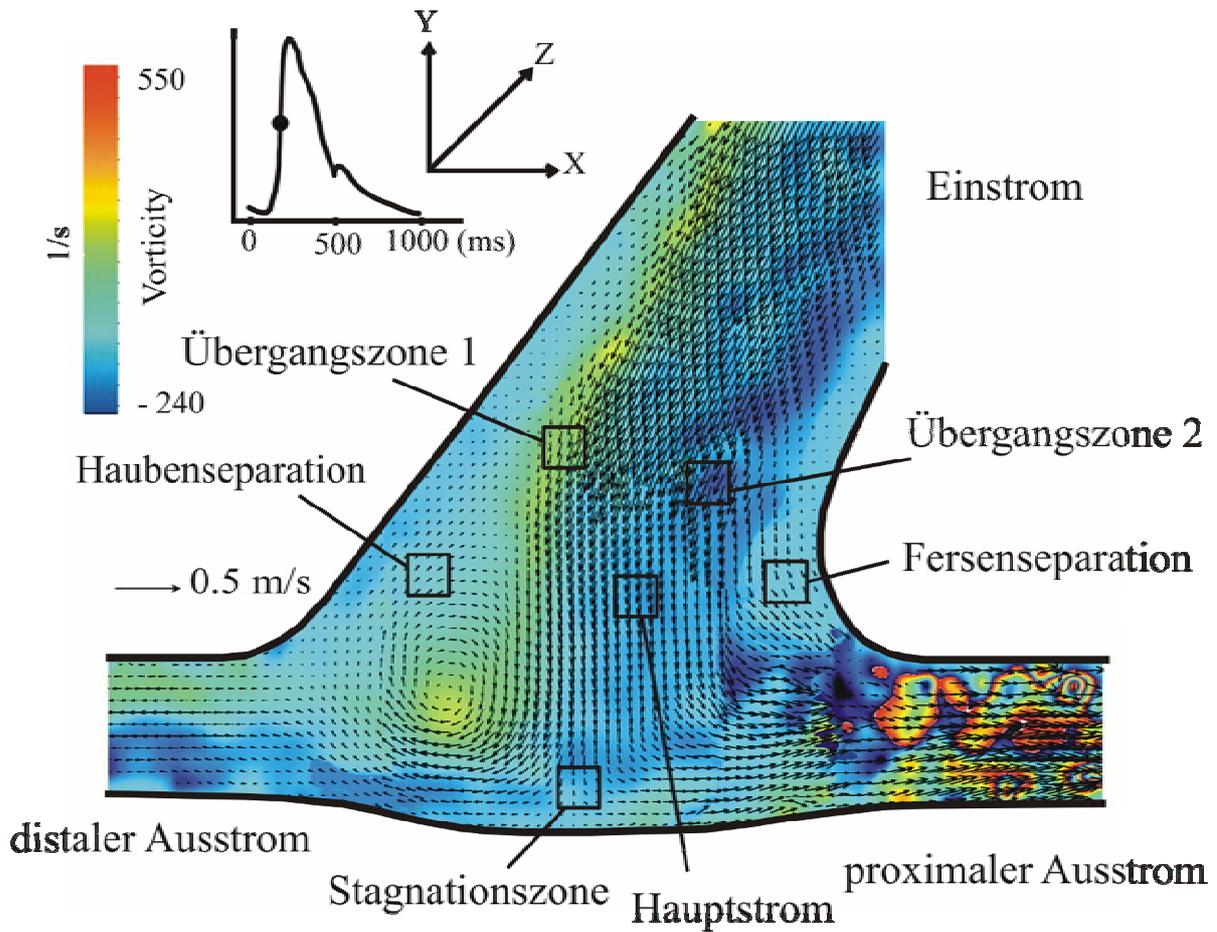
Die Geschwindigkeitsmuster der drei Anastomosen waren innerhalb des Einstroms sehr ähnlich. Unterschiede gab es innerhalb der Ausstromsegmente. Deutlich zu erkennen sind die höheren systolischen Geschwindigkeiten der Miller-Cuff- und Taylor-Patch-Anastomose gegenüber der femoro-cruralen Patch-Prothese.

Abb. 38: Geschwindigkeitsverteilung (75:25 und 200 ml/min)



Die drei Abbildungen zeigen ähnliche Geschwindigkeiten innerhalb des Einstroms und größere Unterschiede innerhalb der Ausstromsegmente, wobei die Miller-Cuff-Anastomose die höchsten Geschwindigkeiten zeigte, gefolgt von der Taylor-Patch-Anastomose, gefolgt von der FCPP.

Abb. 39: Miller-Cuff-Anastomose (25:75 und 140 ml/min)



Exemplarische Darstellung der Vorticity-Flussmuster innerhalb der Miller-Cuff-Anastomose. Deutlich zu erkennen ist die Ausbildung der Separationszonen und die Verteilung der Vorticity (Rotation der Stresswerte in z-Richtung). Dargestellt sind hohe Rotationen der Flüssigkeit im Bereich der Übergangszonen.