

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der hydrodynamischen Klappentestung

Aus den vom HKP gelieferten Messgrößen $\Delta P(t)$ wurden für die beiden Klappentypen die folgenden hydrodynamischen Parameter bei unterschiedlich großen Herzminutenvolumina ermittelt:

die mittlere Druckdifferenz ΔP , die effektive Öffnungsfläche EOA , der transvalvuläre Widerstand TVR , die Gesamtverlustleistung während der Systole N und der durch mechanische Deformation des Klappenapparates bedingte Anteil daran ND .

5.1.1 Mittlere Druckdifferenz ΔP

In Abb.11 sind die Regressionskurven der mittleren Druckdifferenzen in Abhängigkeit vom Herzminutenvolumen dargestellt.

Mit zunehmendem HMV wachsen die Druckdifferenzen exponentiell an, wobei die Regressionskurven für die Schweineklappen steiler ansteigen als die der Perikardklappen.

Mit zunehmender Klappengröße nimmt die mittlere Druckdifferenz für beide Klappentypen ab. Im niedrigen Flussbereich haben MM- Klappen geringere Druckdifferenzen als die EP-Klappen gleicher Nahtringgröße.

Mit zunehmendem HMV kreuzen die Regressionskurven der EP - Klappen die der MM - Klappen, so dass sie im mittleren und hohen Flussbereich niedriger sind als die größengleichen MM-Klappen.

Bei einem HMV von 4,9 l / min schneiden sich die Regressionskurven der MM 23 und der EP 21 und haben annähernd die gleiche Druckdifferenz. Im höheren Flussbereich divergieren sie auseinander, wobei die MM 23-Klappen höhere Druckdifferenzen haben als die EP 21-Klappen.

Die EP 25- Klappen haben im Flussbereich größer als 2 l / min die niedrigste Druckdifferenz aller untersuchten Klappen.

Für den Vergleich verschiedener Klappentypen und -größen wurden aus diesen Regressionskurven der Prognosewert und die Standardabweichung der mittleren Druckdifferenz

für eine Frequenz von 70 Schlägen pro Minute bei einem HMV von 4.9 l / min berechnet. Diese Werte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Sie enthält ebenfalls die berechneten Gesamtverlustleistungen N (Gl. 9) bei der systolischen Durchströmung und den sich durch Anwendung des mathematischen Modellansatzes (Gl. 10) ergebenden Verlustanteil ND durch mechanische Deformation des Klappenapparates. In diesen Anteil gehen im Wesentlichen die Verluste durch Dehnung der Klappentaschen, sowie die Biegungen im Bereich der Kommissurhalterung ein.

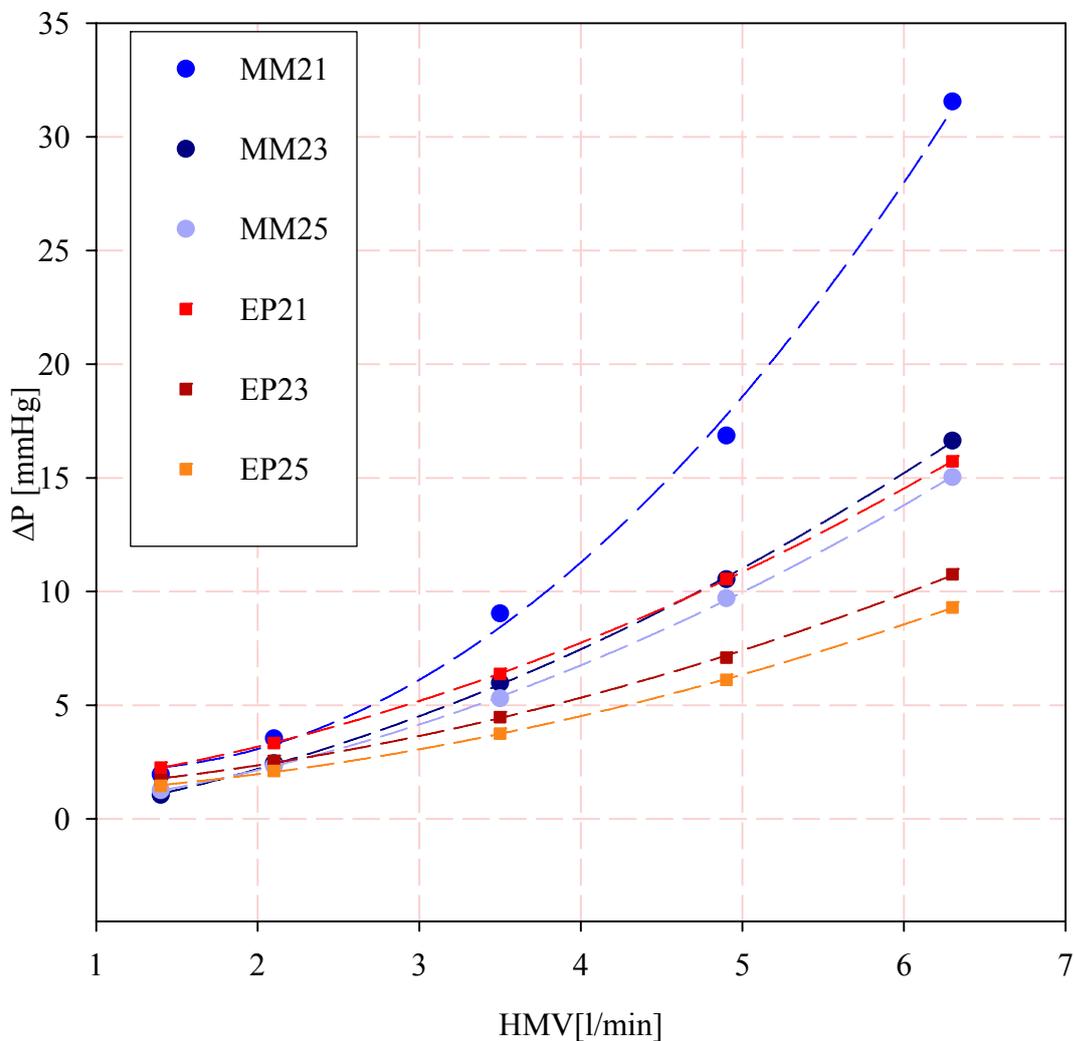


Abb. 11 Mittelwertkurven der Druckdifferenzen in Abhängigkeit vom Herzminutenvolumen für alle Klappengrößen beider Klappentypen

Klappe	ΔP	Mwt \pm SD	N	Mwt \pm SD	ND	Mwt \pm SD	ND % von N
EP21- JF9744	10,41		325		163		50
EP21- JM9815	9,02	10,27 \pm 1,19	282	321 \pm 37	80	109 \pm 46	28
EP21- JR9700	11,39		356		85		24
EP23- JG6590	6,59		206		125		61
EP23- JR8395	7,01	7,28 \pm 0,86	219	228 \pm 27	59	99 \pm 35	27
EP23- JR1826	8,25		258		112		43
EP25- JK5205	8,62		269		192		71
EP25- JL1946	5,71	6,78 \pm 1,60	178	212 \pm 50	96	122 \pm 61	54
EP25- JT3274	6,01		188		78		42
MM21- A627994I	16,75		523		-13		-3
MM21- A666056I	21,89	18,46 \pm 2,97	684	577 \pm 93	216	109 \pm 115	32
MM21- A690182I	16,75		524		124		24
MM23- A608105I	9,53		298		63		21
MM23- A680704I	11,42	10,45 \pm 0,95	357	327 \pm 30	134	73 \pm 57	38
MM23- A690237I	10,39		325		21		7
MM25- A621068I	8,72		273		65		24
MM25- A677294I	6,59	7,27 \pm 1,26	206	227 \pm 39	28	40 \pm 22	14
MM25- A688697I	6,51		203		25		12

Tab. 3 Gegenüberstellung von mittlerer Druckdifferenz ΔP in [mmHg], Gesamtverlustleistung während der Systole N in [mW], Verlustleistung durch Dehnung ND in [mW] und der prozentuale Anteil ND von N bei einem HMV von 4,9 l / min ($HF = 70/\text{min}$; $SV = 70\text{ml}$)

Edwards Perimount (EP)-Klappen der Größen 21 und 23mm haben im Mittel signifikant niedrigere mittlere Gradienten ΔP als größengleiche *Medtronic Mosaic* (MM) –Klappen (EP 21 vs. MM 21 $p = 0,03$; EP 23 vs. MM 23 $p = 0,01$). Die Klappentypen der Größe 25 mm unterscheiden sich nicht signifikant bezüglich der Druckgradienten (EP 25 vs. MM 25 $p = 0,69$).

Die Gesamtverlustleistung N während der Systole ist analog zu den Druckdifferenzen bei kleinen Klappen höher als bei größeren Klappen. EP - Klappen kleiner und mittlerer Größe (21 und 23 mm) haben eine signifikant niedrigere Gesamtverlustleistung als vergleichbare MM - Klappen (EP 21 vs. MM 21 $p = 0,03$; EP 23 vs. MM 23 $p = 0,01$). EP- und MM - Klappen der Größe 25 mm unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p = 0,70$).

Die Verlustleistung ND , in dem sich der Leistungsanteil zur mechanischen Deformationen des Klappenapparates widerspiegelt, ist bei den EP-Klappen im Mittelwert größer als bei den MM - Klappen und macht 44 % der Gesamtverlustleistung aus. Bei den MM-Klappen liegt dieser Anteil gemittelt über alle Klappengrößen im Bereich bis 19 %.

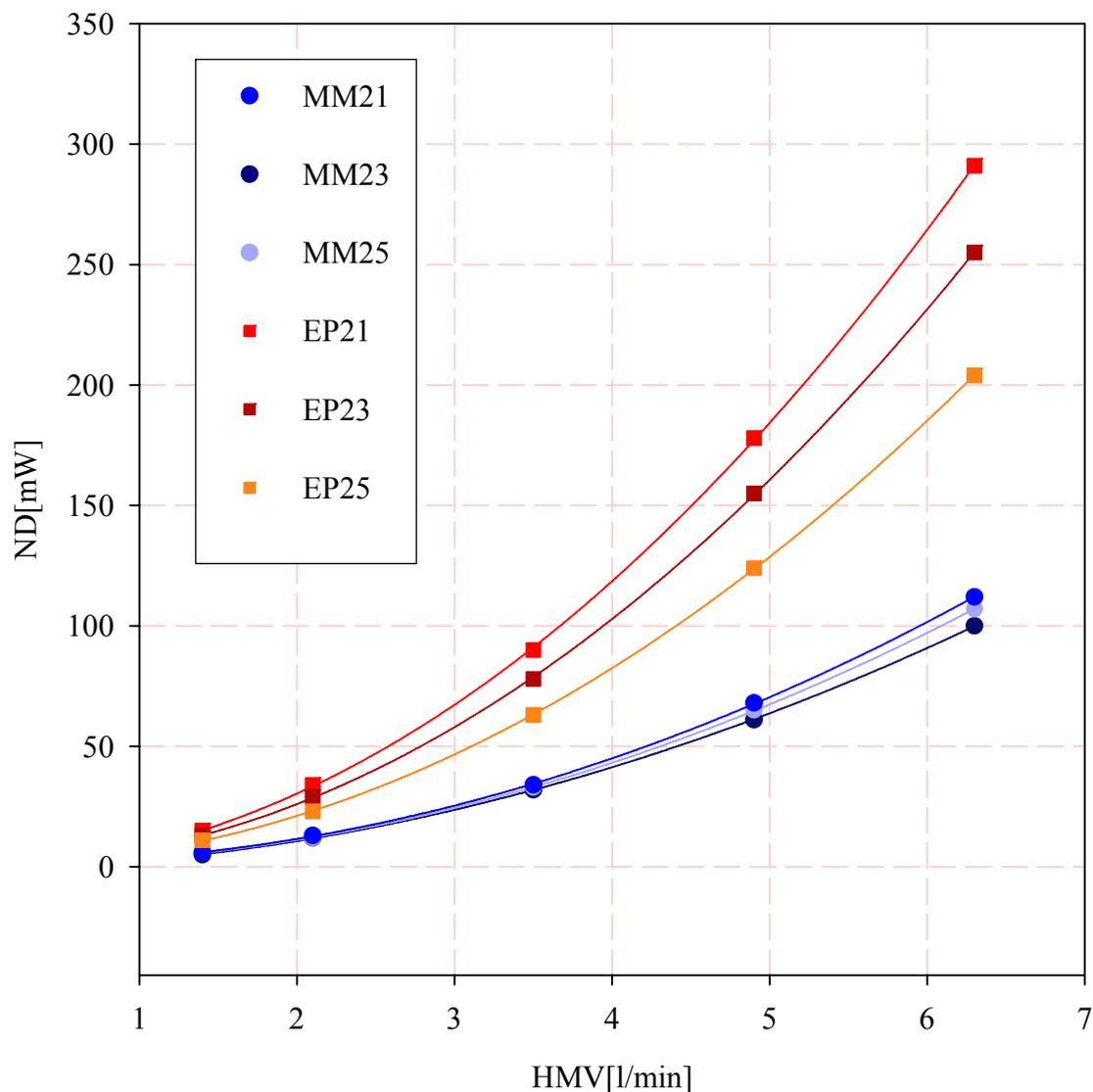


Abb.12 Verlustleistung durch Dehnung in Abhängigkeit vom HMV für alle Klappengrößen beider Klappentypen

Die Abb.12 veranschaulicht die Flussabhängigkeit der Verlustleistung durch Dehnung.

Mit zunehmendem HMV nimmt dieser Anteil für beide Klappentypen zu.

Die Flussabhängigkeit ist allerdings bei den EP - Klappen stärker ausgeprägt als bei den MM-Klappen, was sich in der Anstiegssteilheit der Kurvenverläufe widerspiegelt.

5.1.2 Effektive Öffnungsfläche EOA

Die sich aus den Messwerten von Kapitel 5.1.1 nach Gleichung (1) errechneten Effektiven Öffnungsflächen sind in Abhängigkeit vom HMV in Abb. 13 dargestellt und in Tab. 4 für zwei Extremwerte der systolischen Durchströmung und einen Standardwert zusammengefasst.

Die Minimalwerte („min“-Werte) entsprechen einem HMV von 1,4 l / min, die Maximalwerte („max“-Werte) einem HMV von 6,3 l / min, der Standardwert („EOA_{70/70}“) einem HMV von 4,9 l / min.

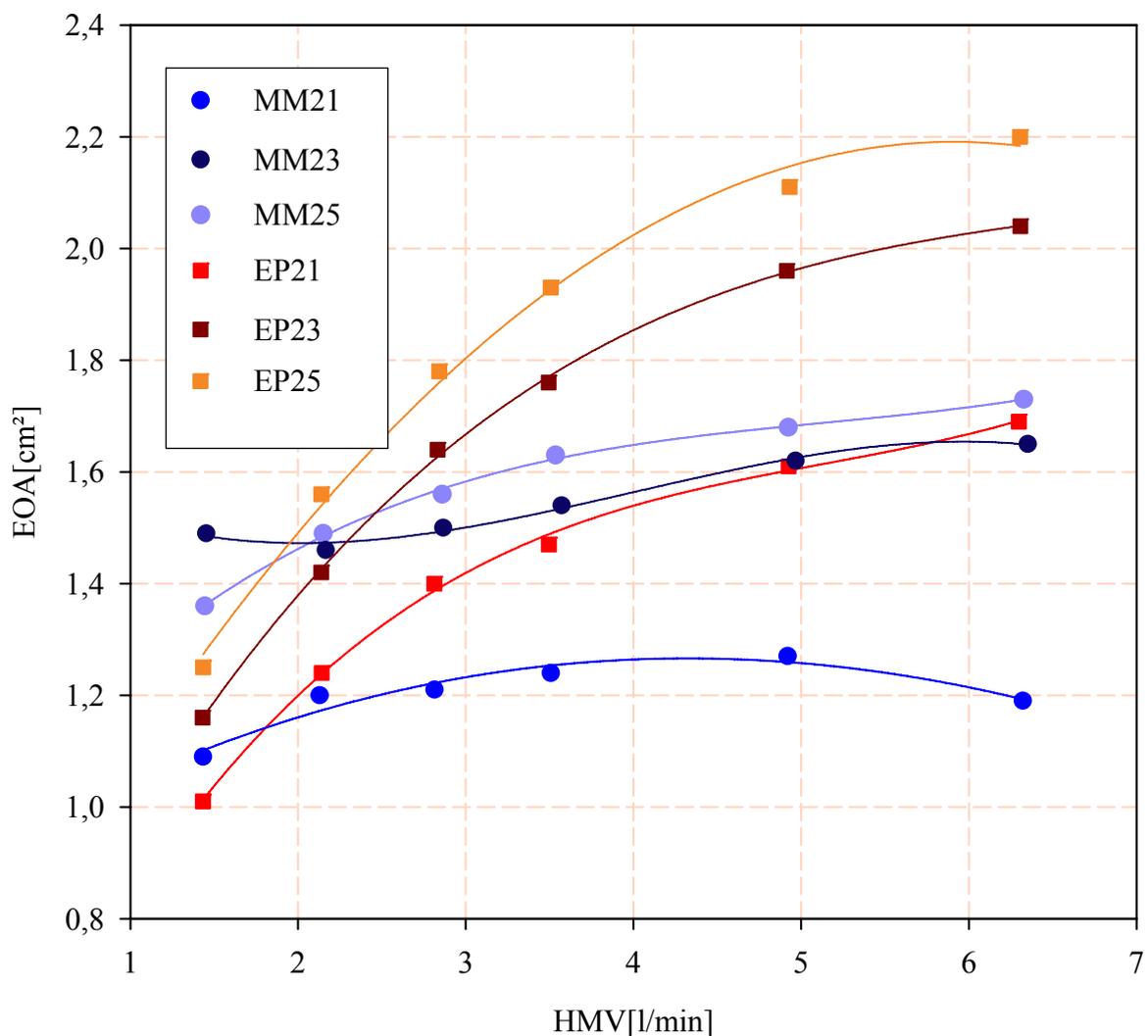


Abb. 13 EOA in Abhängigkeit vom HMV für beide Klappentypen und alle Klappengrößen

Die Kurvenverläufe in Abb. 13 zeigen charakteristische Unterschiede der Flussabhängigkeit der EOA bei den untersuchten Klappentypen. Bei einem standardisierten HMV von 4,9 l / min haben EP - Klappen der Größen 21 und 23 mm signifikant größere EOA als MM - Klappen (EP 21 vs. MM 21 $p = 0,010$; EP 23 vs. MM 23 $p = 0,018$). Die EOA der Klappengrößen 25 mm unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (EP 25 vs. MM 25 $p = 0,633$)

Während im niedrigen Flussbereich die EOA der MM - Klappen größer sind als die der EP - Klappen, kehrt sich dieses Verhältnis mit steigendem HMV um. Dies wird durch den Schnittpunkt der Regressionskurven der verschiedenen Klappentypen bei gleicher Klappengröße deutlich. Diese Unterschiede sind statistisch nicht signifikant ($p = 0,88$).

Die Perikardklappen weisen allerdings bei hohen Flüssen signifikant größere EOA auf als die MM - Klappen (EOA_{max} bei 6,3 l / min EP - Klappen: $1,87 \pm 0,24 \text{ cm}^2$; MM - Klappen: $1,57 \pm 0,31 \text{ cm}^2$; $p = 0,038$).

Klappe	EOA <i>min</i>	Mwt ± SD	EOA <i>max</i>	Mwt ± SD	EOA <i>Standard</i>	Mwt ± SD
EP21- JF9744	1,01		1,66		1,54	
EP21- JM9815	1,25	1,15 ± 0,13	1,70	1,61 ± 0,12	1,65	1,55 ± 0,09
EP21- JR9700	1,21		1,48		1,47	
EP23- JG6590	1,18		2,03		1,93	
EP23- JR8395	1,36	1,27 ± 0,09	1,95	1,93 ± 0,11	1,87	1,84 ± 0,11
EP23- JR1826	1,27		1,81		1,73	
EP25- JK5205	1,02		1,81		1,69	
EP25- JL1946	1,25	1,25 ± 0,23	2,22	2,05 ± 0,22	2,08	1,93 ± 0,21
EP25- JT3274	1,47		2,13		2,02	
MM21- A627994I	1,06		1,27		1,21	
MM21- A666056I	0,81	0,95 ± 0,13	1,10	1,23 ± 0,12	1,06	1,16 ± 0,09
MM21- A690182I	0,99		1,32		1,21	
MM23- A608105I	1,47		1,66		1,61	
MM23- A680704I	0,98	1,26 ± 0,25	1,52	1,57 ± 0,08	1,47	1,54 ± 0,07
MM23- A690236I	1,33		1,54		1,54	
MM25- A621068I	1,35		1,74		1,68	
MM25- A677294I	1,70	1,51 ± 0,18	1,97	1,91 ± 0,15	1,93	1,85 ± 0,15
MM25- A688697I	1,47		2,01		1,94	

Tab.4 Gegenüberstellung der EOA [cm²] bei 1,4 l / min („min“), 6,3 l / min („max“) und als Standard -Wert bei einem HMV von 4,9 l / min (HF = 70 / min; SV = 70 ml) mit den Mittelwerten (Mwt) und Standardabweichung (SD)

5.1.3 Transvalvulärer Widerstand, TVR

Die nach Gleichung (2) berechneten transvalvulären Widerstände sind in Abb.14 in Abhängigkeit vom HMV für alle Klappengrößen dargestellt und in Tab. 4 zusammengefasst.

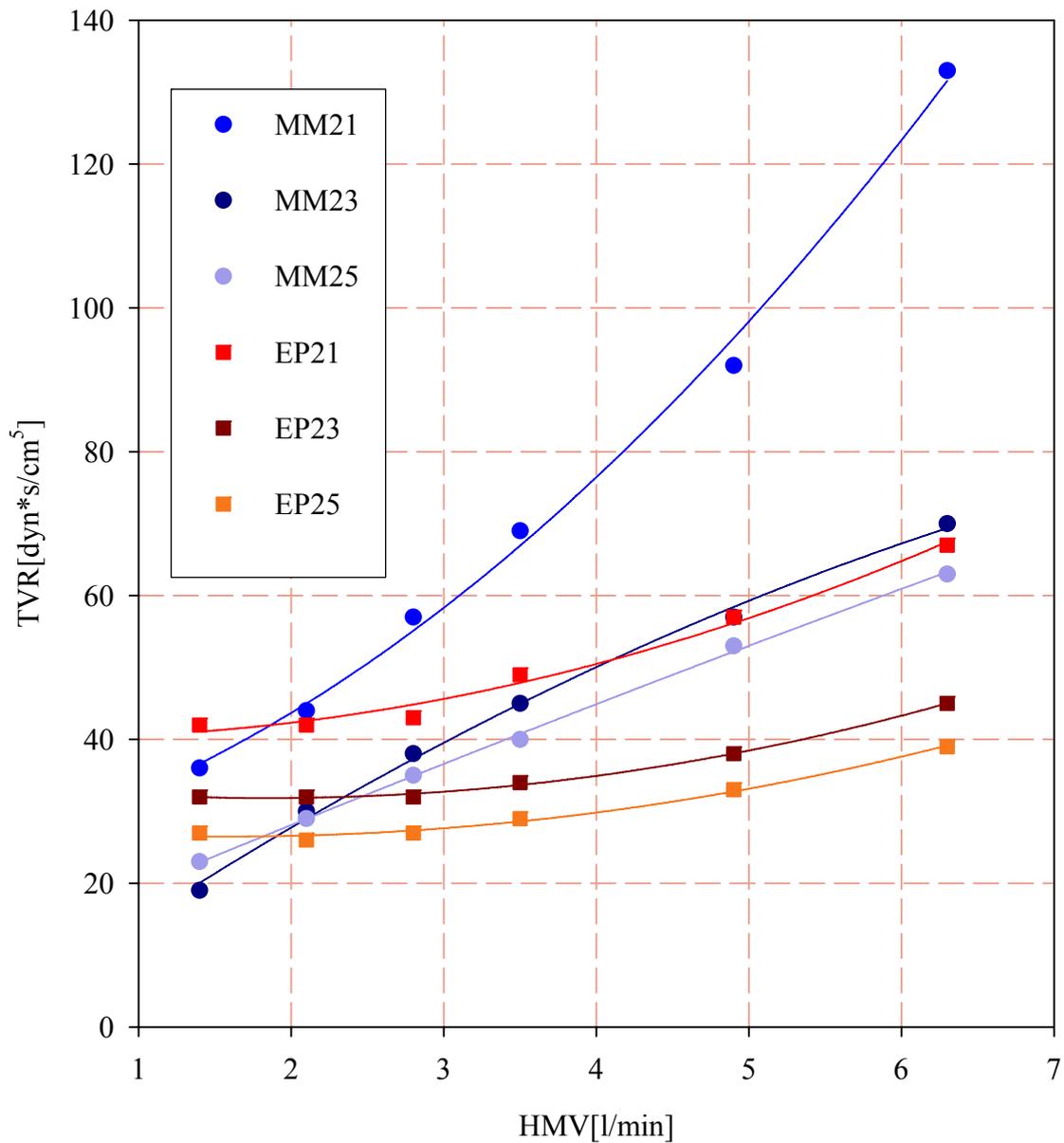


Abb. 14 TVR in Abhängigkeit vom HMV für beide Klappentypen und alle Klappengrößen

Aus Abb.14 ist ersichtlich, dass die Kurven für Schweineklappen steiler ansteigen als für Perikardklappen und die Flussabhängigkeit des TVR bei MM - Klappen ausgeprägter ist.

MM - Klappen haben im niedrigen Flussbereich geringere Widerstände als EP-Klappen. Mit zunehmendem HMV kreuzen die Kurven der Schweineklappen die der Perikardklappen, so dass im höheren Flussbereich die Schweineklappen deutlich höhere Widerstände haben als die Perikardklappen.

Vergleicht man die Widerstände beider Klappentypen unter standardisierten Bedingungen (HMV= 4,9 l / min bei einer HF = 70 / min und einem SV = 70 ml) haben EP - Klappen der Größe 21 und 23 mm einen signifikant niedrigeren Widerstand als größengleiche MM - Klappen (EP 21: $58,3 \pm 6,8 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$; MM 21: $104,7 \pm 16,8 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$; $p = 0,028$; EP 23: $41,3 \pm 4,9 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$; MM 23: $59,3 \pm 5,4 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$; $p = 0,013$).

Die Flussabhängigkeit des Transvalvulären Widerstandes TVR wurde im Bereich der Herzminutenvolumina von 1,4 bis 6,3 l / min untersucht.

Für Perikardklappen ist die Flussabhängigkeit bei den kleinen und mittleren Klappengrößen signifikant (EP 21 $p = 0,011$; EP 23 $p = 0,012$), während bei den MM - Klappen alle Klappengrößen einen signifikanten Unterschied der Widerstände bei kleinen und hohen Flüssen zeigen (MM 21 $p = 0,026$; MM23 $p = 0,010$; MM 25 $p = 0,010$).

Klappe	TVR <i>min</i>	Mwt ± SD	TVR <i>max</i>	Mwt ± SD	TVR <i>Standard</i>	Mwt± SD
EP21- <i>JF9744</i>	42,1		69,1		59,1	
EP21- <i>JM9815</i>	27,4	33,8 ± 7,5	54,7	65,2 ± 9,2	51,1	58,3 ± 6,8
EP21- <i>JR9700</i>	31,8		71,8		64,6	
EP23- <i>JG6590</i>	30,9		45,9		37,4	
EP23- <i>JR8395</i>	17,5	25,8 ± 7,3	50,8	50,5 ± 4,5	39,8	41,3 ± 4,9
EP23- <i>JR1826</i>	29,0		54,9		46,8	
EP25- <i>JK5205</i>	44,6		54,8		48,9	
EP25- <i>JL1946</i>	27,1	31,1 ± 12,0	38,6	44,9 ± 8,7	32,4	38,5 ± 9,1
EP25- <i>JT3274</i>	21,7		41,16		34,1	
MM21- <i>A627994I</i>	37,6		103,2		95,0	
MM21- <i>A666056I</i>	48,7	42,5 ± 5,7	156,3	128,9 ± 26,6	124,2	104,7 ± 16,8
MM21- <i>A690182I</i>	41,1		127,1		95,0	
MM23- <i>A608105I</i>	19,8		69,1		54,1	
MM23- <i>A680704I</i>	33,5	26,6 ± 6,9	70,2	69,9 ± 0,7	64,8	59,3 ± 5,4
MM23- <i>A690236I</i>	26,4		70,4		58,9	
MM25- <i>A621068I</i>	23,4		62,9		49,5	
MM25- <i>A677294I</i>	14,7	17,5 ± 5,1	49,1	52,4 ± 9,3	37,4	41,3 ± 7,1
MM25- <i>A688697I</i>	14,5		45,1		36,9	

Tab. 5 Gegenüberstellung des TVR [$\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^5$] bei 1,4 l / min („min“), 6,3 l / min („max“) und als Standard-Wert bei einem HMV von 4,9 l / min (HF = 70 / min; SV = 70 ml) mit den Mittelwerten (Mwt) und Standardabweichung (SD)

Bei einem HMV von 4,9 l / min zeigen die EP - Klappen der Größen 21 und 23 mm signifikant niedrigere TVR als die größengleichen MM - Klappen (EP 21: $58,3 \pm 6,8 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, MM 21: $104,7 \pm 16,8 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, $p = 0,027$; EP 23: $41,3 \pm 4,9 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, MM23: $59,3 \pm 5,4 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, $p = 0,013$).

Im niedrigen Flussbereich (HMV = 1,4 l / min) gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Klappentypen. Im hohen Flussbereich (HMV = 6,3 l / min) weisen EP – Klappen der Größen 21 und 23 mm signifikant niedrigere TVR auf als größengleiche MM – Klappen (EP 21: $65,2 \pm 9,2 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, MM 21: $128,9 \pm 26,6 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, $p = 0,042$; EP 23: $50,5 \pm 4,5 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, MM 23: $69,9 \pm 0,7 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$, $p = 0,016$). Klappen der Größe 25 mm unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

5.2 Ergebnisse der Highspeed - Visualisierung

5.2.1 Klappenbewegung während der Systole

In Abb.15 ist das unterschiedliche Öffnungsverhalten einer Schweine- und einer Perikardklappe bei niedrigen und hohen Flüssen gegenübergestellt.

Die zeitgleichen Momentaufnahmen in der oberen Reihe der Abbildung zeigen die maximalen Öffnungsflächen beider Klappentypen bei einer Durchströmung von 1,4 l / min.

Die MM- Klappe öffnet weiter als die EP- Klappe und hat bereits bei einem kleinen HMV ihre größtmögliche, sichtbare Öffnungsfläche erreicht, während die EP- Klappe ihre Öffnungskapazität nicht voll ausschöpft.

Im unteren Teil der Abbildung werden die Klappen von einem HMV von 4,9 l / min durchströmt. Die Öffnungsfläche der MM- Klappe zeigt im Vergleich zur Aufnahme bei 1,4 l / min keinen wesentlichen Größenunterschied, während die EP- Klappe deutlich weiter öffnet als bei kleinem HMV. Ihre Öffnungsfläche ist jetzt größer als die der MM- Klappe.

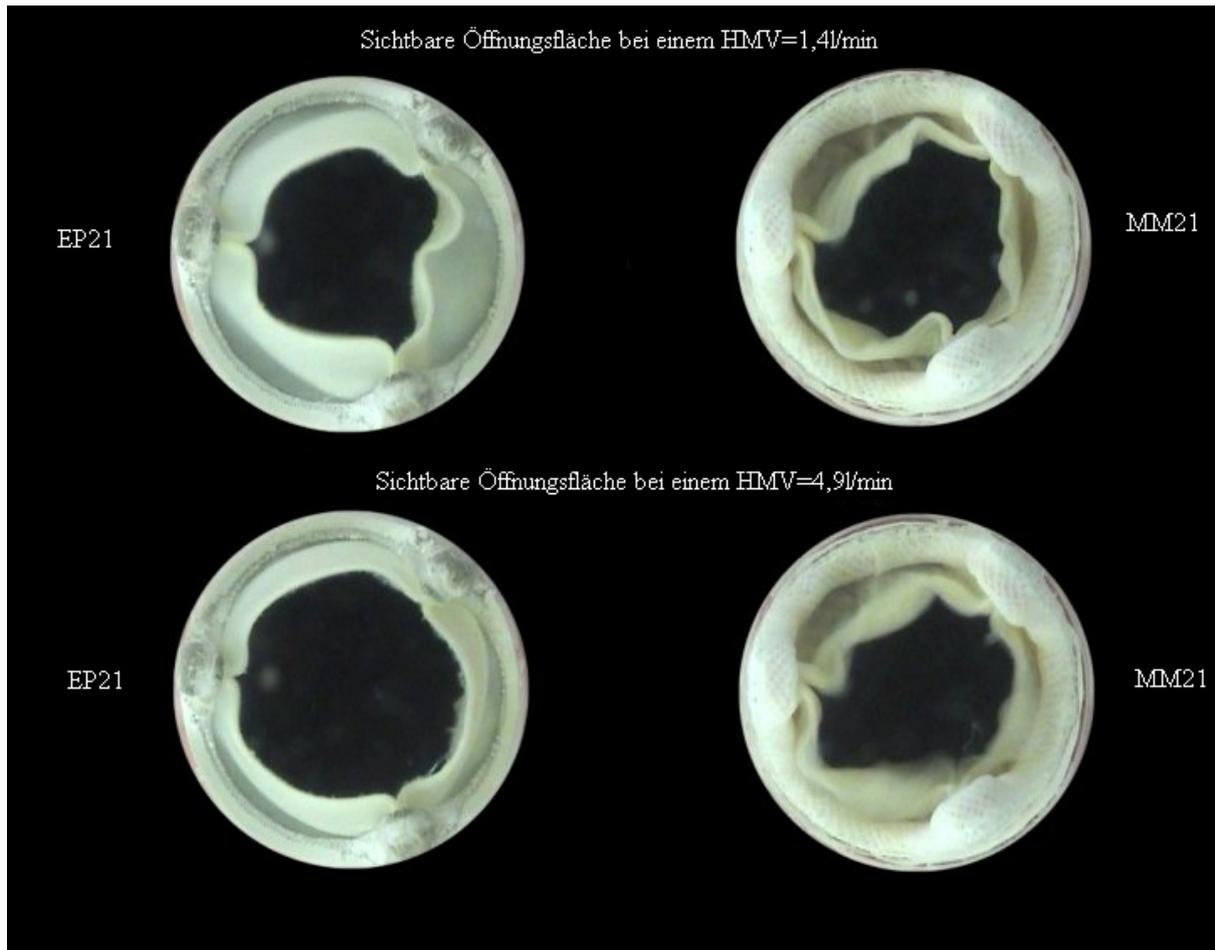


Abb.15 Gegenüberstellung der maximalen sichtbaren Öffnungsflächen einer EP 21 und einer MM 21- Klappe bei HMV von 1,4 l / min (obere Reihe) und 4,9 l / min (untere Reihe)

Die folgenden Abbildungen zeigen Ausschnitte von Highspeed-Videosequenzen, die Grundlage für die detaillierte quantitative Analyse der Klappenbewegungen von Bioprothesen sind.

Abb. 16 zeigt den Vergleich der Öffnungs- und Schließphase einer MM 23- und einer EP 23- Bioprothese in einer synchronen Bildfolge mit 5 ms Zeitabstand.

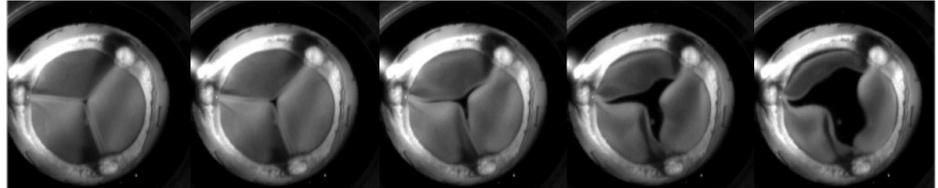
Neben der größeren Öffnungsfläche der Perikardklappe ist eine Asymmetrie der Taschenbewegung sowohl beim Öffnen als auch beim Schließen auffällig.

Ebenso wird die geringfügig längere Öffnungszeit aber deutlich längere Schließzeit der Perikard-Klappe deutlich.

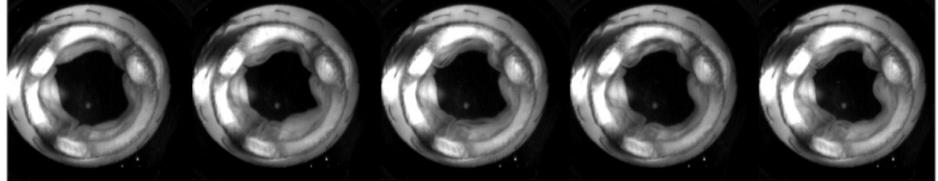
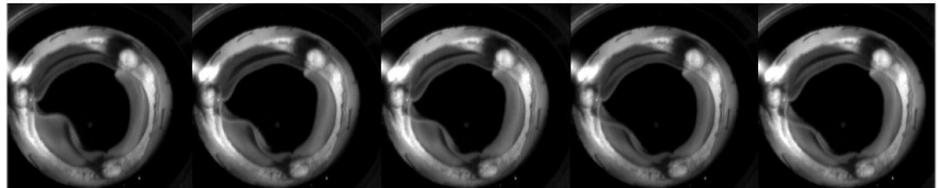
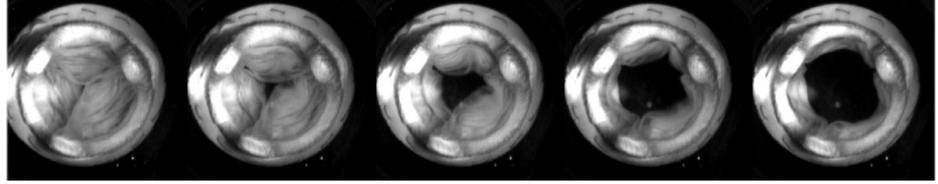
Beim Betrachten der Highspeed- Aufzeichnung in „slow motion“ kann das unterschiedliche Bewegungsmuster der Taschen der beiden Klappentypen während der gesamten Systole beschrieben werden, das aus dieser Bildfolge nicht ersichtlich ist.

Öffnungsphase

EP23

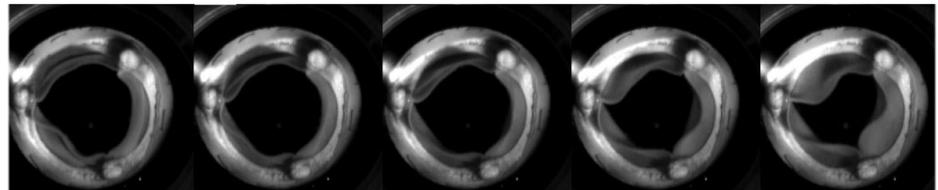


MM23



Schließphase

EP23



MM23

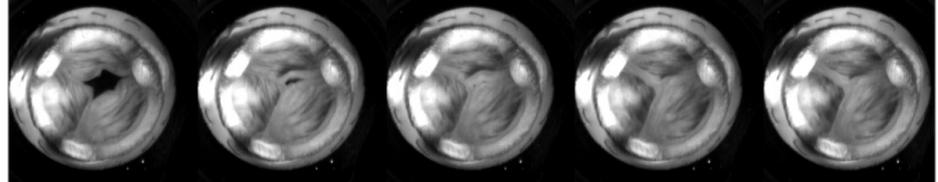
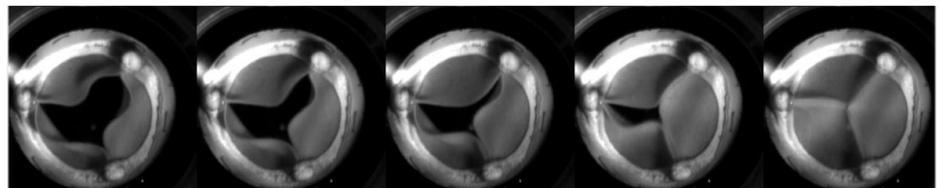
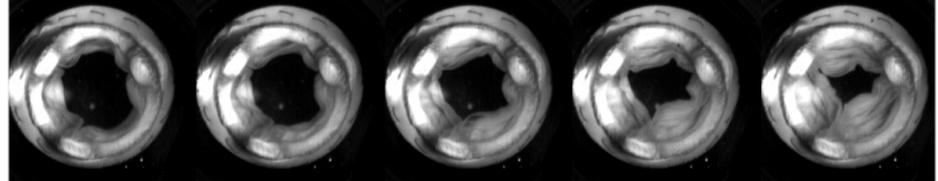


Abb.16 Öffnungs - und Schließphase einer EP- und MM- Klappe der Klappengröße 23 mm.

Aus der Abb. 16 wird deutlich, dass die MM - Klappen schneller als die EP - Klappen öffnen und ihre maximale Öffnungsfläche zeitiger im Vergleich zu den Perikardklappen erreichen.

Die sichtbare Öffnungsfläche der EP- Klappe ist im gezeigten Beispiel größer als die der MM- Klappe.

EP - Klappen öffnen mit einer homogenen Dehnungsbewegung der konstruierten Perikardtaschen. Die Taschen erscheinen dabei rigider als die der Schweineklappen. Die Stützen der Stents biegen sich während der Öffnungsphase leicht nach außen.

In der Phase des geöffneten Zustands sind Flutterbewegungen an den Perikardtaschen zu sehen, die allerdings nicht so ausgeprägt sind wie bei den MM - Klappen.

In der Schließphase fällt die Federwirkung der Stentbrücken auf, die durch ihre Elastizität einen Großteil der Schließdynamik der Perikardtaschen auffangen und die Belastung von ihnen nehmen.

Die Stentbrücken federn nach innen und richten sich, vergleichbar einem Kopfnicken, wieder in ihre Ausgangslage auf.

Die **MM - Klappen** mit ihren nativen Klappentaschen öffnen schnell zu ihrer größtmöglichen Öffnungsfläche. Die sichtbare Öffnungsfläche ist bei MM - Klappen zu Beginn der Öffnungsphase am größten, da zu diesem Zeitpunkt die freien Ränder der Klappentaschen durch den Vorwärtsstrom mit aufgedrückt werden. Dieser Zeitpunkt entspricht dem Spitzenwert der Öffnungsflächenkurve und gibt der Kurve ihr charakteristisches Aussehen.

Die Klappentaschen vollziehen eine ausgeprägte Flutterbewegung während der Durchströmungsphase. Die Taschen der MM - Klappen erscheinen flexibler als die Taschen aus Perikardgewebe.

Die Schließphase der MM - Klappen ist kurz. Ein elastisches Federn der Stentbrücken, vergleichbar den EP - Klappen konnte nicht beobachtet werden.

Die Stentbrücken und der Klappenring der MM - Klappen erscheinen rigider als bei den EP - Klappen, so daß bei niedrigen und mittleren Flüssen (SV = 20- 70 ml) keine Mitbewegung, bei großen Flüssen (SV = 90 ml) eine geringe Mitbewegung beobachtet werden konnte.

Bei den EP - Klappen werden die Stentbrücken während des Öffnungs- und Schließvorgangs mitbewegt, während sich die Klappendynamik bei den MM - Klappen vorwiegend im Bereich der Klappentaschen abspielt.

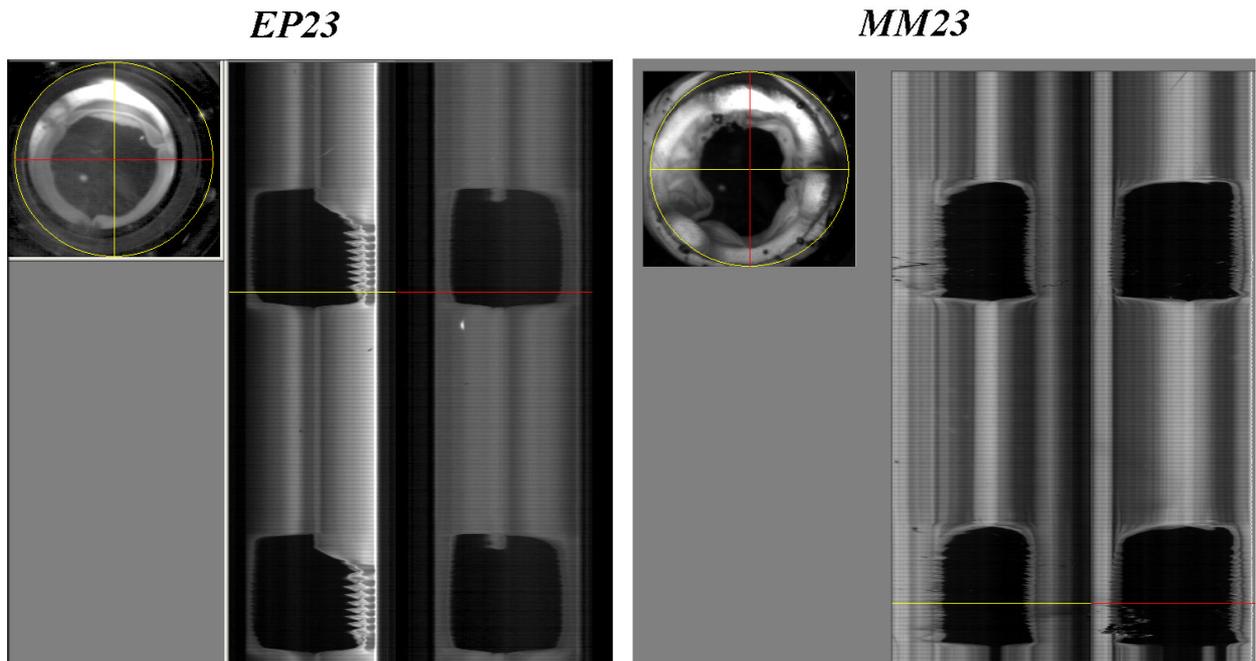


Abb.17 *Bildschirmansicht einer EP 23 und einer MM 23- Klappe im Flächenplanimetrierungs- Modus und die zeitliche Entwicklung des Durchmessers (eingezeichnete Linien) während der gesamten Periode*

Die Abb. 17 zeigt beide Bioprothesentypen der Größe 23 mm in der Aufsicht und im Schnittbild. In der Seitansicht sind jeweils zwei aufeinander folgende systolische Durchströmungsphasen mit dazwischen liegender Diastole dargestellt.

Die in diesem Fall sichtbare inhomogene Öffnungsbewegung der Perikardklappe links im Bild zeigt eine verzögerte Entfaltung des Taschenbauchs in den beiden oberen Quadranten. Diese Inhomogenität während der Öffnung wird auch in der Seitansicht deutlich, wo der angeschnittene Taschenbauch zu einem schrägen und gezackten Öffnungsprofil führt.

Im Vergleich zur EP 23- Klappe zeigt die MM 23- Klappe rechts im Bild eine homogene Klappenöffnung und –schluss. Das Profil im seitlichen Schnittbild ist symmetrischer.

Diese inhomogene Öffnungsbewegung war nicht bei allen untersuchten Perikardklappen zu beobachten, allerdings neigt das steifere Perikard eher zu solchen Verspannungen als das flexiblere Schweineklappengewebe.

5.2.2 Sichtbare und mittlere Öffnungsflächen, Öffnungsflächen-Indices

Die mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware *HEART VALVE INSPECT*[®] ermittelten Größen der sichtbaren Öffnungsflächen (VOA) wurden in *EXCEL*-Diagrammen in Abhängigkeit von der Zeit für verschieden große HMV von 1,4 bis zu 6,3 l / min grafisch dargestellt. Dabei wurden charakteristische Kurvenverläufe für die beiden Klappentypen deutlich.

Während VOA- Kurven der MM - Klappen einen plateauförmigen Verlauf zeigen, ist für EP - Klappen eher ein domförmiger Verlauf charakteristisch.

In Abb. 18 ist die sichtbare Öffnungsfläche (VOA) in Abhängigkeit von der Zeit beispielhaft für beide Klappentypen der Größe 21 mm bei verschiedenen großen HMV dargestellt. Während die Öffnungsflächen der MM - Klappen nahezu flussunabhängig sind, zeigt sich bei EP - Klappen eine deutliche Flussabhängigkeit.

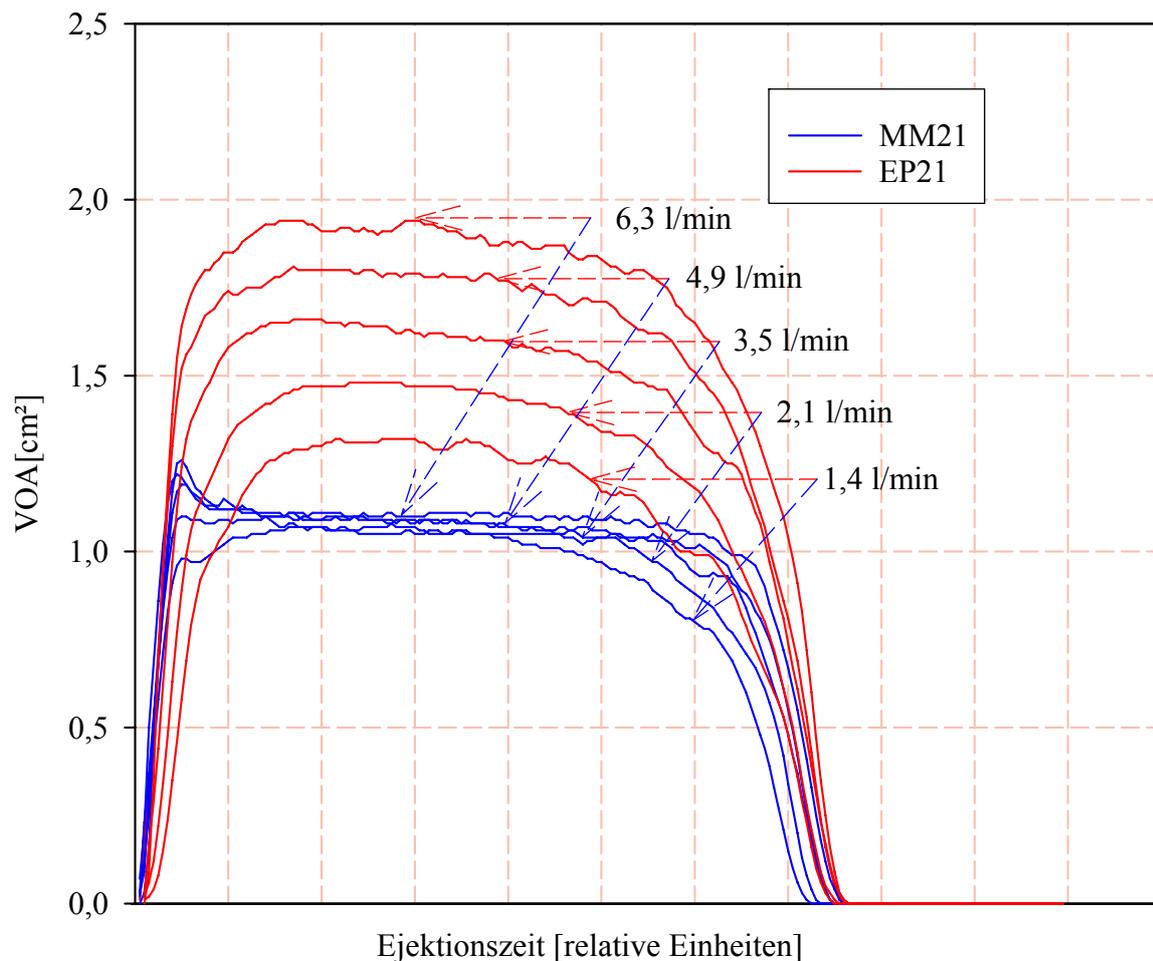


Abb.18 VOA in Abhängigkeit von der Zeit bei MM- und EP - Klappen der Größe 21 mm für verschiedene HMV

Die Kurven der **MM - Klappen** zeigen eine deutliche, frühsystolische Öffnungsflächenspitze, die wahrscheinlich in einem kurzzeitigen, kompletten Auffalten der Klappentaschen beim Vorwärtsstrom begründet ist.

Die Flächenkurven bleiben relativ lange auf einem Niveau mit leicht abfallender Tendenz und fallen dann beim Schließvorgang steil ab.

Auch die **EP - Klappen** öffnen mit einem steilen Anstieg. Das Kurvenprofil der EP - Klappe zeigt keinen deutlichen Spitzenwert, wie die MM - Klappe. Es ist homogener und fließender in den Übergängen von Beginn der Öffnungsphase an, während des geöffneten Zustands bis zum Übergang in die Schließphase, so dass auch der Kurvenabfall bis zum Klappenschluss (sichtbare Öffnungsfläche $VOA = 0$) nicht so steil ist wie bei der Schweineklappe.

Aus derartigen $VOA(t)$ - Kurven wurden die mittleren Öffnungsflächen bestimmt, deren Mittelwerte für die jeweiligen Klappentypen und –größen in Abb. 19 dargestellt sind.

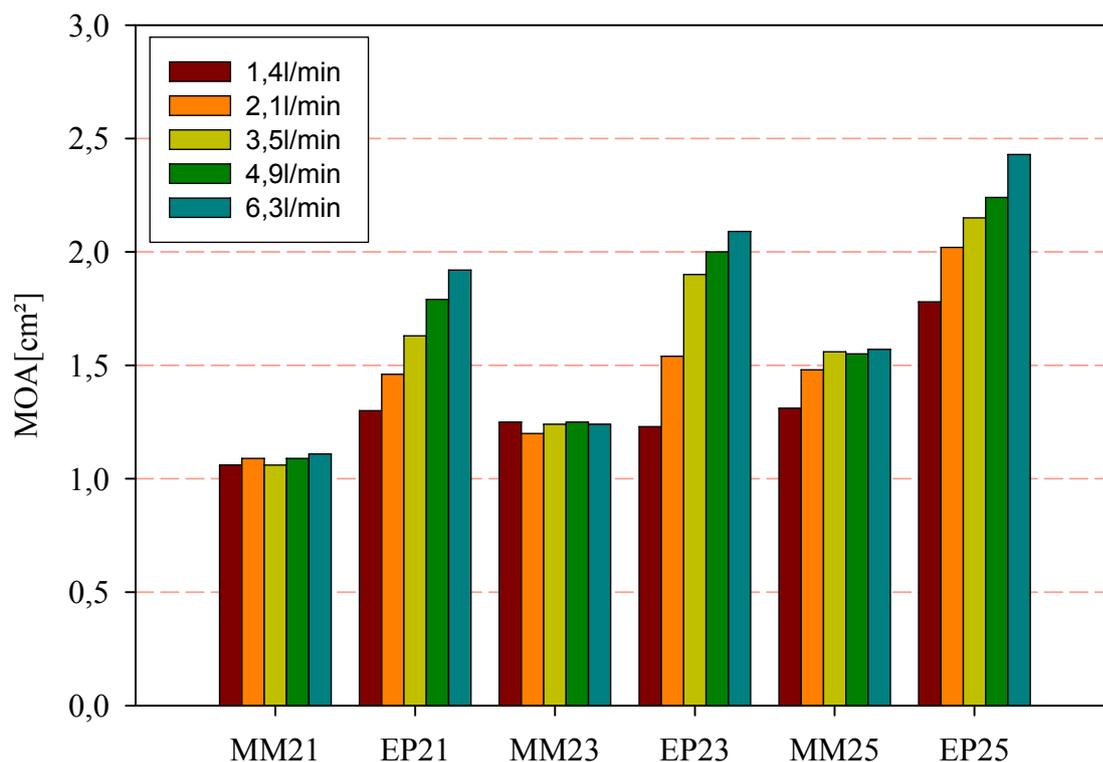


Abb.19 Flussabhängigkeit der MOA aller Klappengrößen für beide Klappentypen bei verschiedenen HMV

Auch hier zeigt sich in unterschiedlichem Maße eine Flussabhängigkeit.

Die mittlere Öffnungsfläche der MM 21 beträgt bei einer Durchströmung von 1,4 l / min 1,06 cm², bei 6,3 l / min sind es 1,11 cm². Bei den *Perimount* - Klappen der Größe 21 mm reicht die Öffnungsfläche von 1,3 cm² bei 1,4 l / min bis hin zu 1,92 cm² bei 6,3 l / min.

Die MOA sind für die Schweineklappen nur gering flussabhängig im Gegensatz zu den Perikardklappen.

Dieses unterschiedliche Verhalten der Flussabhängigkeit gilt für alle Klappengrößen.

In Tab. 5 sind für ein HMV von 4,9 l / min die effektiven Öffnungsflächen, die mittleren sichtbaren Öffnungsflächen, die aus den mit Hegar- Stift- Messungen berechneten Flächen und die aus dem TAD nach Herstellerangaben berechneten Öffnungsflächen zusammengestellt.

<i>Klappe</i>	<i>EOA_(Standard)</i>	<i>MOA</i>	<i>A_{Hegar}</i>	<i>A_{TAD}</i>
MM21	1,16	1,1	2,0	2,7
EP21	1,55	1,8	2,6	3,14
MM23	1,54	1,3	2,6	3,3
EP23	1,84	2,0	3,1	3,8
MM25	1,85	1,6	3,1	4,0
EP25	1,93	2,2	3,8	4,5

Tab. 5 Gegenüberstellung von Effektiver Öffnungsfläche, Mittlerer Öffnungsfläche, Hegarfläche und TAD- Fläche

<i>Klappe</i>	<i>EOA / MOA</i>	<i>EOA / A_{Hegar}</i>	<i>EOA / A_{TAD}</i>	<i>MOA / A_{Hegar}</i>	<i>MOA / A_{TAD}</i>
MM21	1,06	0,58	0,43	0,55	0,41
EP21	0,86	0,59	0,49	0,69	0,57
MM23	1,18	0,59	0,46	0,5	0,4
EP23	0,92	0,59	0,48	0,65	0,53
MM25	1,15	0,59	0,46	0,52	0,4
EP25	0,87	0,51	0,43	0,58	0,49

Tab. 6 Gegenüberstellung verschiedener möglicher Flächenindices

Die mit Hilfe der Hegar- Obturatoren bestimmten Klappendurchmesser dienen als Grundlage zur Berechnung der Hegarflächen nach der allgemeingültigen Formel

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (15)$$

zur Berechnung des Flächeninhalts. Die Hegarflächen sind größer als die mittleren sichtbaren Öffnungsflächen bei beiden Klappentypen und allen Klappengrößen. Ursache dafür kann eine mechanische Dilatation durch den Hegar- Obturator sein, oder aber eine Öffnungsfläche, die während der Konturenbestimmung in der axialen Draufsicht durch vorgewölbte Taschenstrukturen nicht erfasst werden kann. Am größten sind die nach Herstellerangaben aus dem TAD berechneten Flächen. Entsprechend verschieden sind auch die aus diesen Werten ermittelten möglichen Flächenindices, wobei das EOA/ A_{TAD} -Verhältnis dem Performance Index des ISO 5840 entspricht.

5.2.3 Öffnungs- und Schließzeit, Systolischer Bewegungs- Index SMPI

Die Öffnungs- und Schließzeiten wurden mit *MATLAB*[®] für jede einzelne Systole bestimmt und anschließend über die Anzahl der Messzyklen gemittelt. Die Mittelwerte der untersuchten Parameter aller untersuchten Klappen sind in Tabelle 7 bei einem HMV von 4,9 l / min für die jeweilige Klappengröße gegenübergestellt. Der SMPI wurde nach Gl. (12) bestimmt und spiegelt den Anteil von Öffnungs- und Schließzeit an der systolischen Ejektionsdauer wieder.

Damit kann der Zeitraum der Systole erfasst werden, in dem die untersuchte Klappe für eine Durchströmung von 90 % der maximalen Öffnungsfläche zur Verfügung steht, das heißt wie lange die Klappe effektiv geöffnet ist.

Die mittlere Systolendauer betrug bei den hier durchgeführten Messungen 285 ms.

Klappe	ÖZ [ms]	± SD	SZ [ms]	± SD	SMPI
MM21	15,0	3,9	59,1	7,0	0,75
EP21	25,0	3,8	75,4	5,0	0,66
MM23	12,7	0,1	63,2	6,3	0,75
EP23	31,2	2,5	69,3	20	0,66
MM25	11,7	1,0	66,5	6,5	0,74
EP25	22,4	3,4	75,3	16	0,67

Tab. 7 Mittelwerte von ÖZ, SZ bei einem HMV von 4,9 l / min und daraus berechneter SMPI

Aus der Tabelle 5.2.3 wird ersichtlich, dass MM - Klappen kürzere Öffnungszeiten haben als EP - Klappen. Die kürzeste Öffnungszeit aller Klappen hatte die 25- er MM- Klappe (11,7 ms ± 3,4 ms). Die längste Öffnungszeit wies die EP 23- Klappe auf (31,2 ms ± 2,5 ms).

Die Schließzeiten der Perikardklappen sind länger als die der Schweineklappen unabhängig von der Klappengröße.

Der SMPI ist für MM-Klappen höher als für EP-Klappen, d.h. dass die Schweineklappen bezogen auf die Systolendauer länger geöffnet sind bei 90 % der maximalen Öffnung als die Perikardklappen. Das Verhältnis bleibt für alle Klappengrößen und für den jeweiligen Klappentyp konstant.

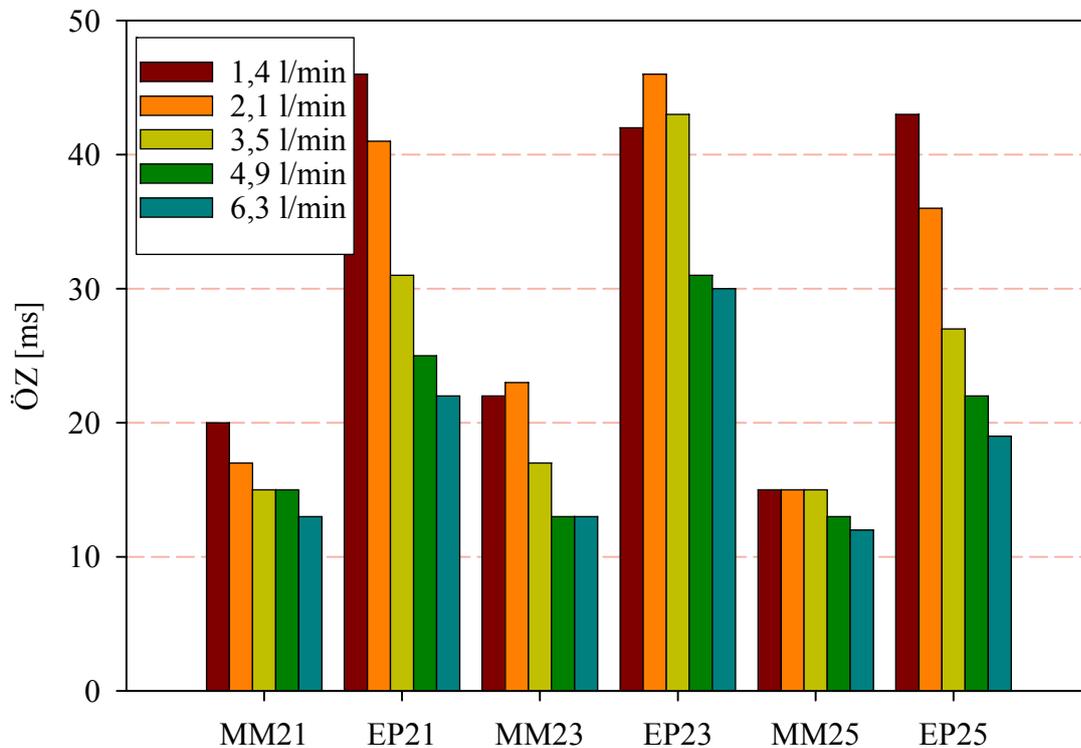


Abb.20 Mittelwerte der Öffnungszeiten aller Klappengrößen bei verschiedenen HMV

In Abb.20 ist die Flussabhängigkeit der Öffnungszeiten für alle Klappengrößen dargestellt.

Im direkten Vergleich der Öffnungszeiten aller untersuchten Klappengrößen fällt auf, dass die Öffnungszeiten vom Klappentyp abhängig sind und nicht von den Klappengrößen.

Die Öffnungszeiten der MM-Klappen reichen von 20 ms (1,4 l / min) bis 13 ms (6,3 l / min) für die MM 21 und 15 ms (1,4 l / min) bis 12 ms (6,3 l / min) für die MM 25.

Für die Perikardklappen ergeben sich Öffnungszeiten von 46 ms (1,4 l / min) bis 22 ms (6,3 l / min) für die EP 21 und 43 ms (1,4 l / min) und 19 ms (6,3 l / min) für die EP 25.

Die Öffnungszeiten nehmen mit zunehmendem HMV ab.

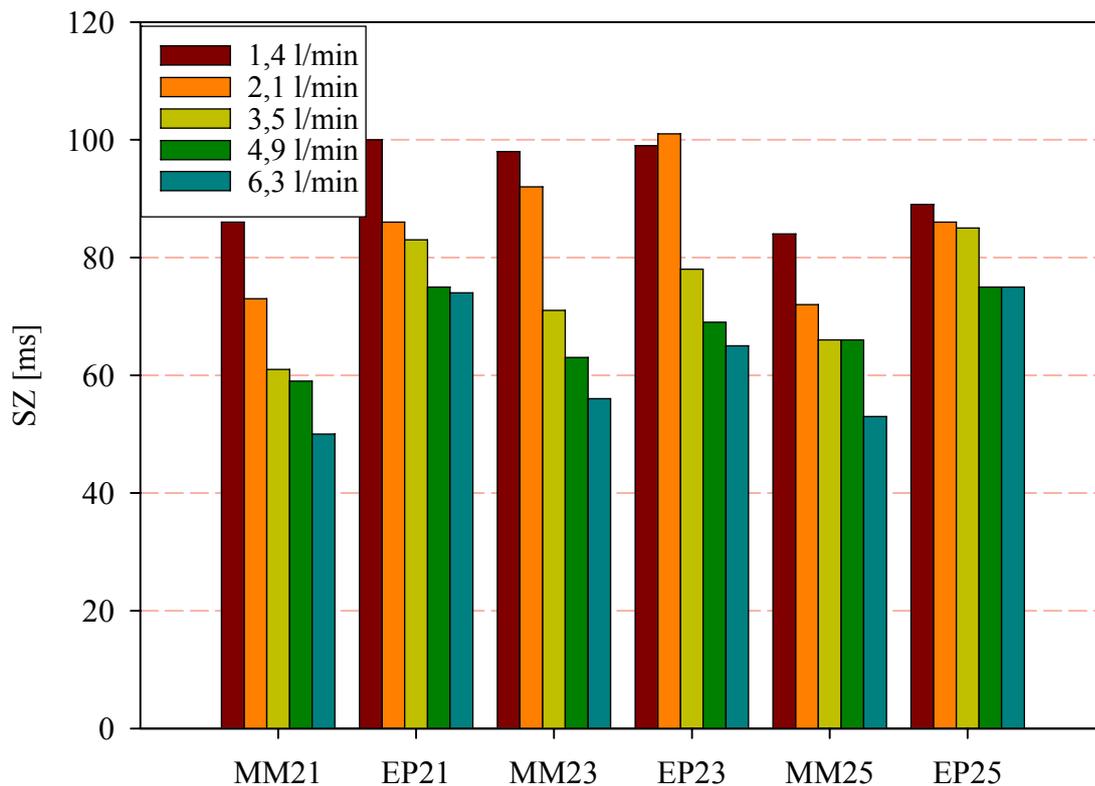


Abb. 21 Mittelwerte der Schließzeiten aller Klappengrößen für beide Klappentypen

Die Schließzeiten sind in allen Fällen länger als die Öffnungszeiten und in charakteristischer Weise flussabhängig. Im höheren Flussbereich verkürzen sich die Schließzeiten.

Die Schweineklappen schließen in allen Flussbereichen etwas schneller als die Perikardklappen (MM21/ EP21: 86 ms/ 100 ms (1,4 l / min), 59 ms/ 75 ms (4,9 l / min), 50 ms/ 74 ms (6,3 l / min)). Dies gilt für alle Klappengrößen.