Identifikation der Materialeigenschaften von weiblichem Brustgewebe zur Sport-BH Optimierung

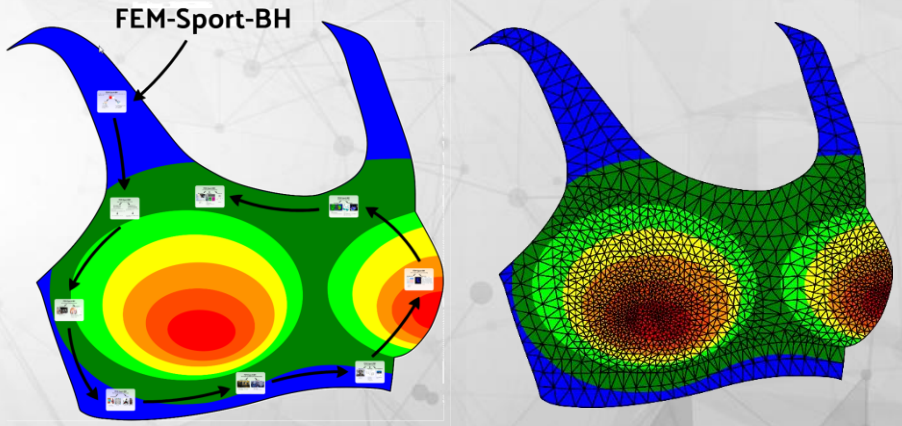
Institut für Sportwissenschaft, Universität Wien
Haßmann M., Stöger S.

CAE Simulation & Solutions Maschinenbau Ingenieurdienstleistungen GmbH
Krach W., Dastl J.

MSC Software Conference

Fachkonferenz für Simulation und Berechnung

24. – 26. Oktober 2017 in Berlin



Forschungsprojekt

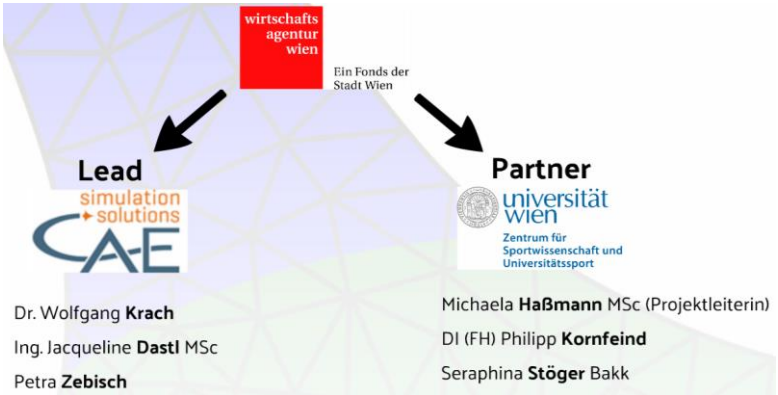
- Uni Wien
- CAE
- Unterstützt von Wirtschaftsagentur Wien

- **Problemstellung**
  - Fettleibigkeit
  - 1/5 aller Frauen keinen Sport wegen Brustbewegung und Schmerzen
  - Diskrepanz Komfort / Stützwirkung

  - 80% tragen falschen BH (!)

Hinweis:

- Anonymisierte Bilder von Oberkörperscan
- Bilder/Video von Brüsten



Forschungsprojekt

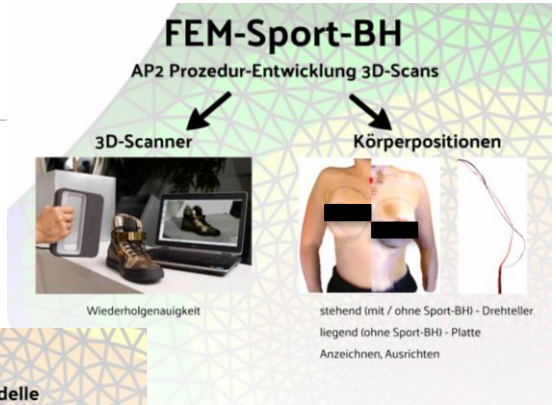
- Ausgangssituation:
  - KEINE Geometriedaten
  - KEINE Materialdaten
  - Evalusierungskonzept

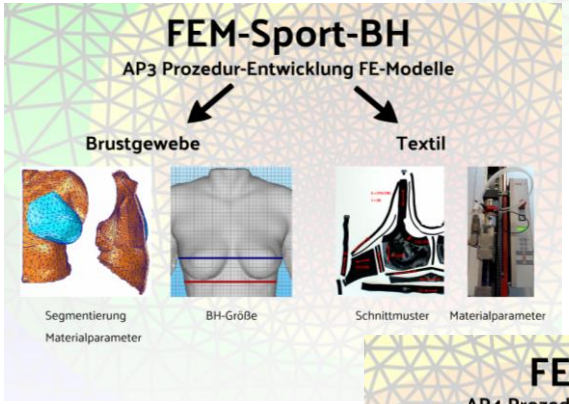
- Datenermittlung 3D-Scans
- Prozedurentwicklung FE-Modelle
- Prozedurentwicklung 3D-Bewegungsanalyse

- Abstimmung Industriepartner

- Probandinnenaquise
- Testdurchführung
- FE-Simulationen

- Dissemination

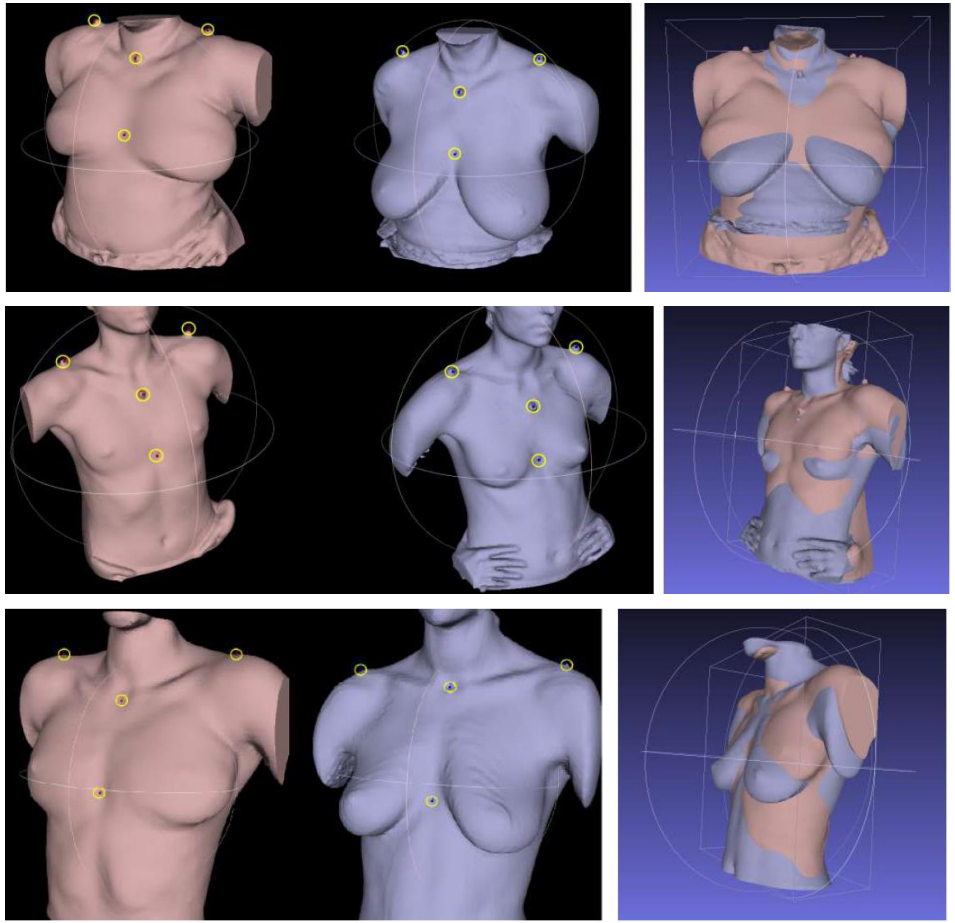




Scan Prozedur

- **Scan Setup**
- **Liegend**
- **Stehend**
- **Markierung Brustmarker**
- **Hintergrund = Raster**

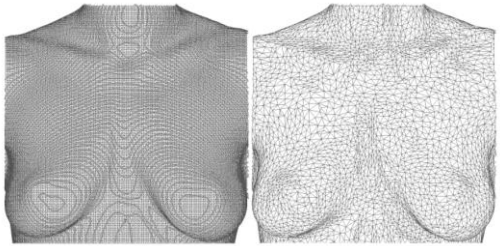
- **Ausrichtung Scans liegend/stehend**
- **PP1 / PP2 / PP3**
- **Schlüsselbeine / Brustbein**
  - Problem Höhe Schultern
- **Brustbein / Nabel**
  - W.o.

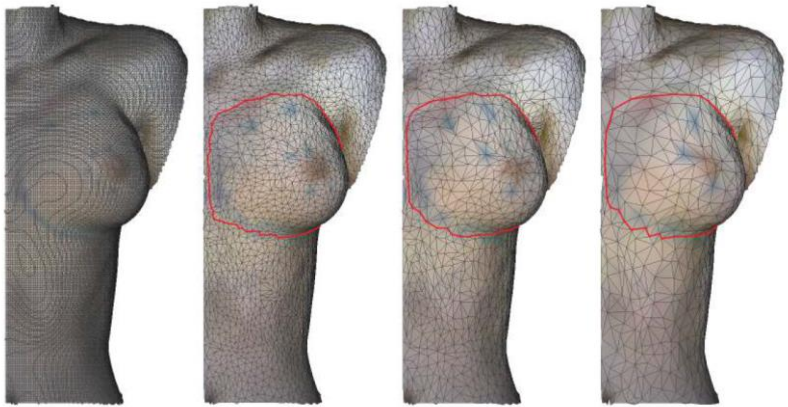


FE Modell Oberkörper

- Modell Drehteller_ohne und Liegend
- Löcher schließen

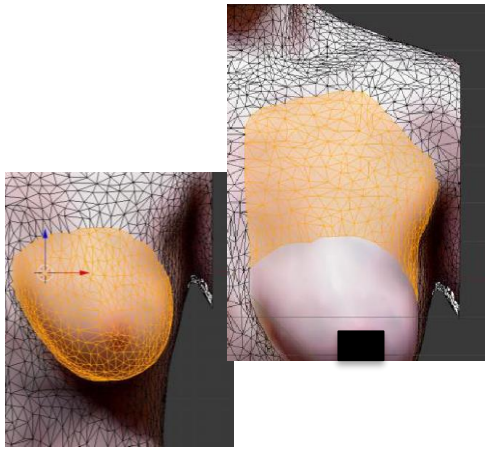
- **Reduktion Netzfeinheit**
  - Von 190.000 bis 250.000
  - ca. 20.000 Elemente



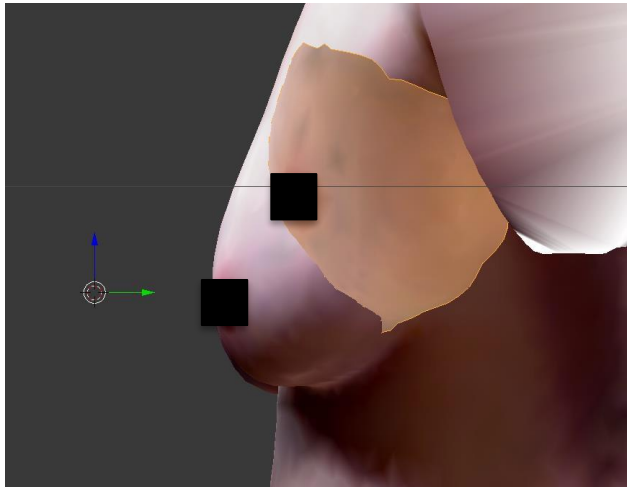


45000 / 6000 / 3000 / 1500

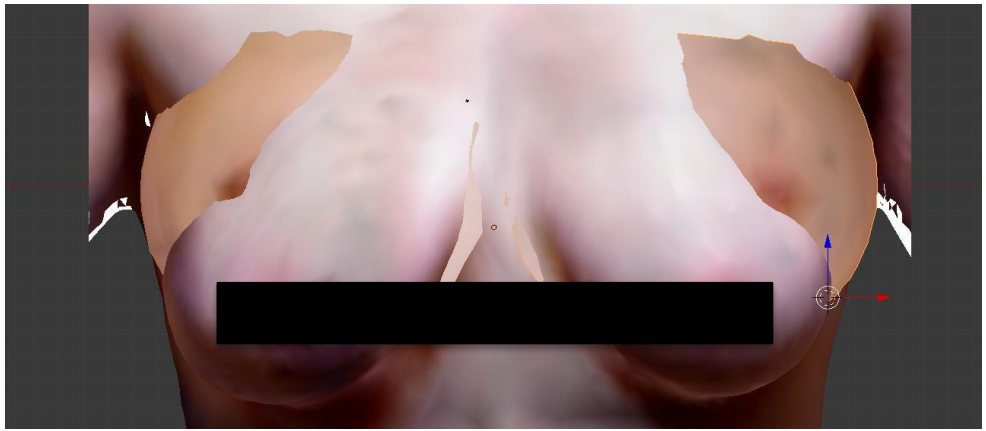
- **Selektieren von Brust/Muskel**
  - Brust, Muskel und ev. Fett lateral selektieren
  - Nach Markierungen bei Scan
  - Nach Erfahrung (!)



FE Modell Oberkörper



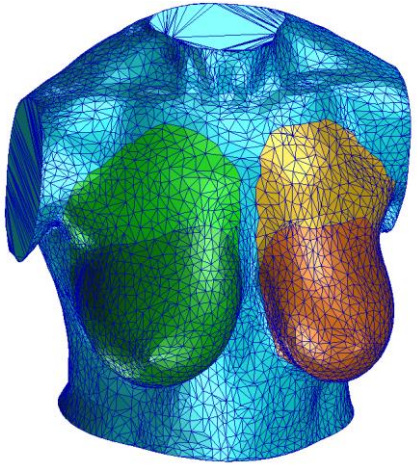
- **Überlagerung liegend/stehend**
  - Zusätzlich Brust aus Liegend für Brustfalte
  - Ansicht seitlich -> vertikale Verschiebung an seitlicher Brustfalte ausrichten
  - Ansicht von vorne -> horizontale Verschiebung an Mitte ausrichten

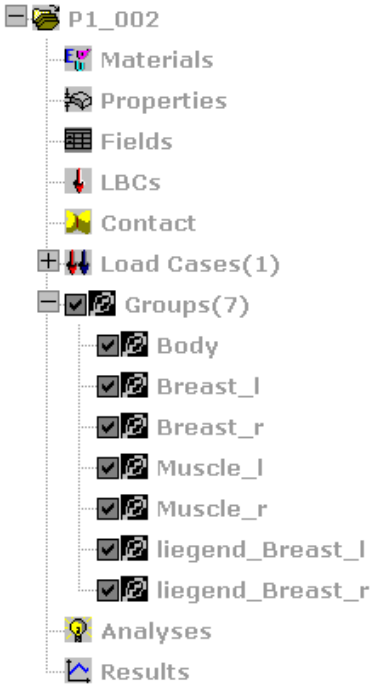


- **Export einzelner patches**
  - Breast_li
  - …

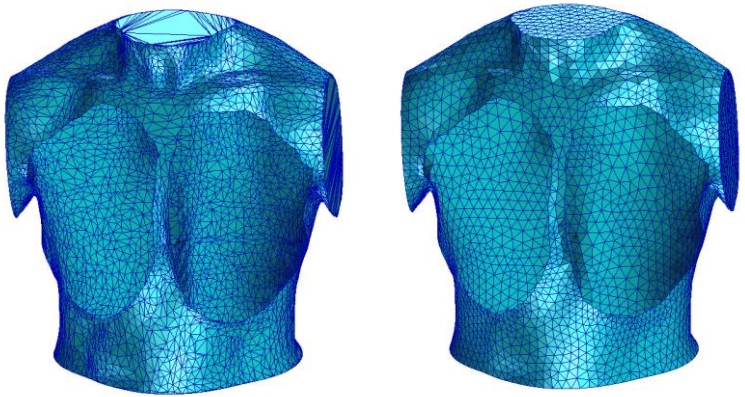
FE Modell I - FE-Modell

- .stl importieren



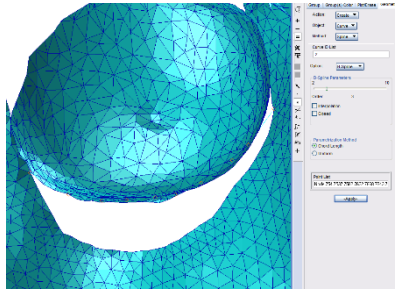


- Gruppenweise remeshing

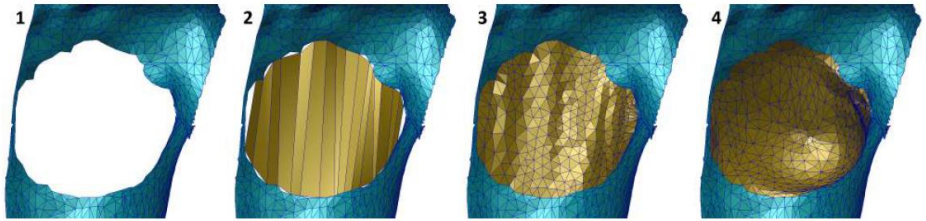


FE Modell I - FE-Modell

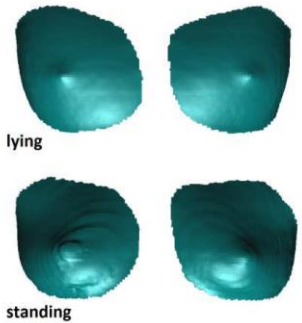
- **Unterbrustkante aus Brust_liegend übernehmen**



- **Brustwand füllen**



- **Brust und Muskelvolumen festlegen**
  - Volumenprüfung
  - PP2 160cm³ = 160ml
  - PP3 310-390cm³ = 310-390ml



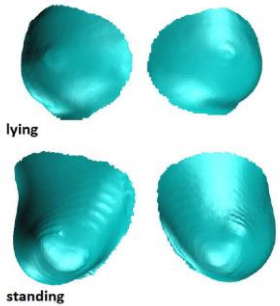


Table 7: Comparison of segmented breasts, values given in $[cm^3]$

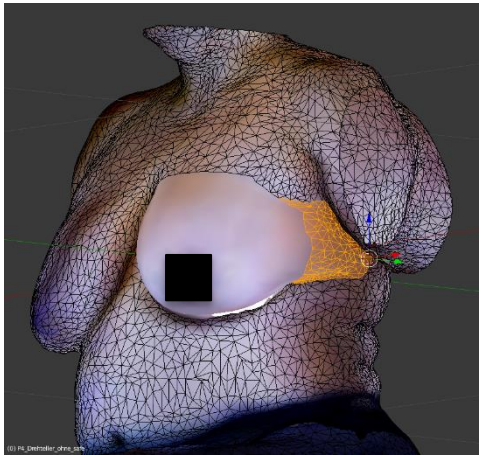
PP2	Volume of Left Breast	Volume of Right Breast
Lying	163	144
Standing	160	160
Difference	-2%	10%

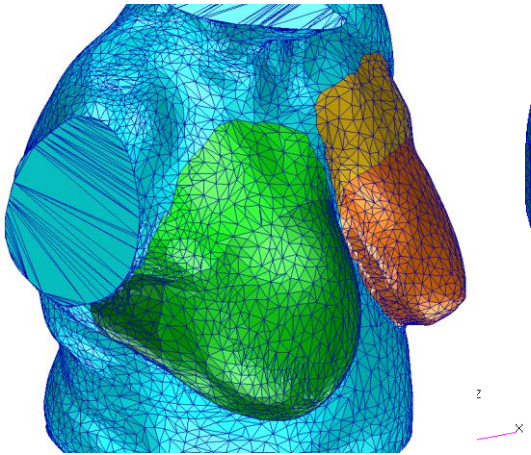
Table 8: Comparison of segmented breasts, values given in $[cm^3]$

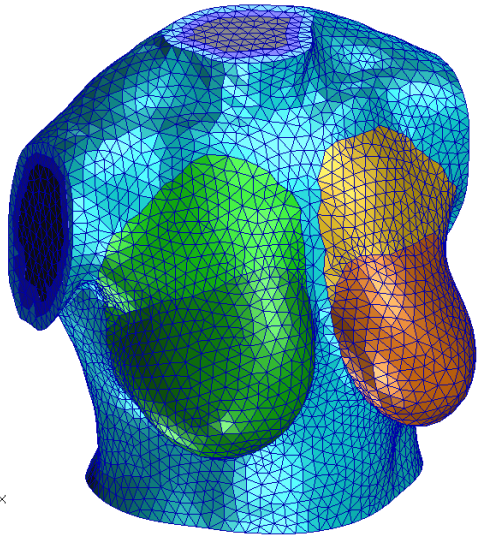
PP2	Volume of Left Breast	Volume of Right Breast
Lying	306	312
Standing	391	389
Difference	22%	20%

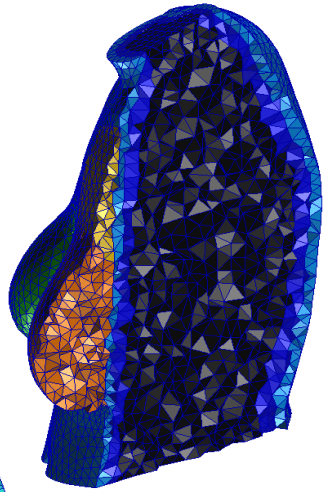
FE Modell I – P1, P4, P6, P18

- **Ausgerichtetes Blender-File**
  - Modell Drehteller_ohne und Liegend
  - Löcher schließen
  - Netz gröber (ca. 4000 Elemente pro Viertel)
  - Brust, Muskel und eventuell Fett lateral selektieren
  - Zusätzliche Brust aus Liegend für Brustfalte



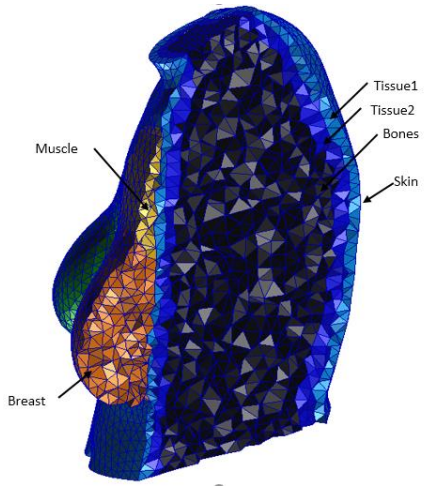






FE Modell Materialdaten E-Moduli

- Stahl 210.000 N/mm²
- Alu 70.000 N/mm²
- Kunststoffe 2.500 N/mm²
- Elastomer ~200 N/mm²
- Silikon 10 N/mm²
- menschliche Haut 0,018 N/mm²
- Muskel bzw. Fettgewebe 0,001 N/mm²



Group	E-Modul [N/mm²]	Poissonzahl [-]	Dichte [t/mm³]
Breast	0.001	0.495	10e-10
Muscle	0.002	0.495	10e-10
Tissue_1	0.01	0.495	10e-10
Tissue_2	0.02	0.495	10e-10
Bones	10 000	0.3	10e-10
Skin (t=2mm)	0.0188	0.49	10e-10

FE-Modell

- **Berechnung Halbmodell**
- **Brust = 1 Volumen mit E = 1kPa bzw. Varianz**
  - keine Haut
  - keine Trennung Fett / Muskel

- Brustbewegung liegend /Stehend
- Nastran SOL400
- linear elastisches Materialverhalten

- Oberkante bewegt sich fast so viel wie Brustwarze !

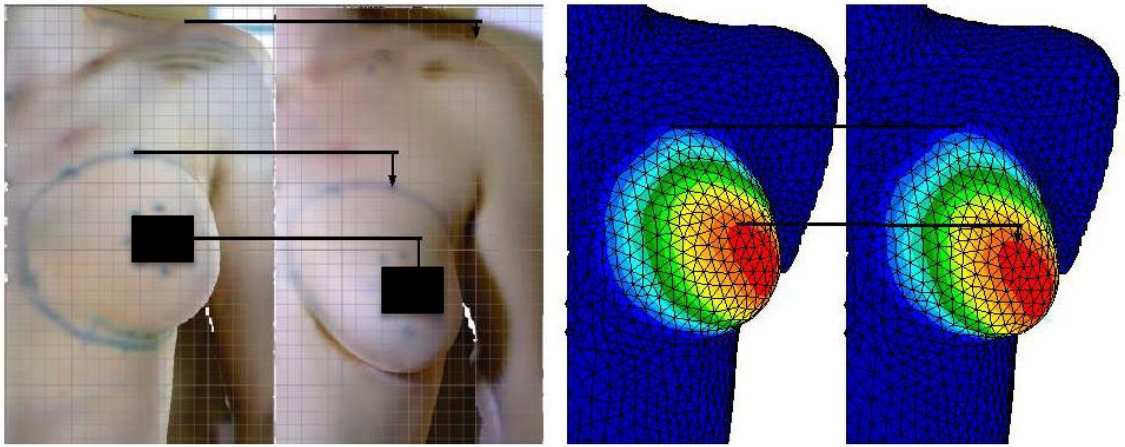
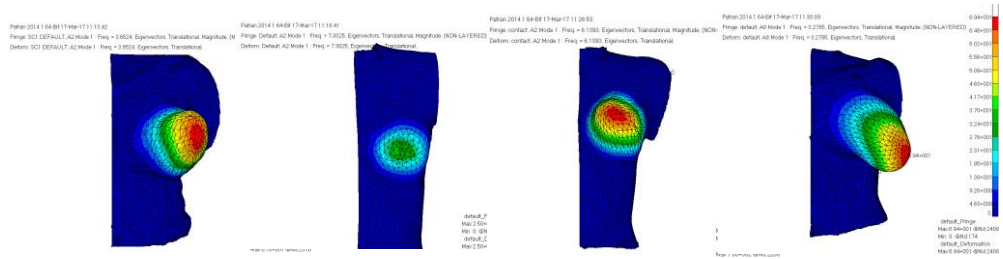


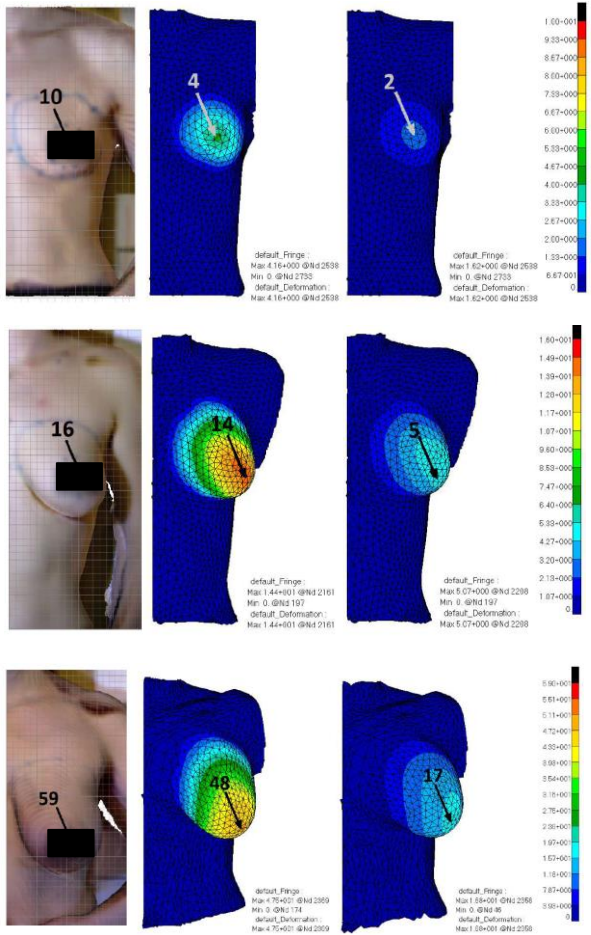
Figure 68: Comparison of the movement of the breast's outlines

FE-Modell

- **Berechnung Halbmodelle PP1 – PP4**
- **linear elastisch vs. hyperelastisch (Ogden 2)**
- **Eigenfrequenzen**

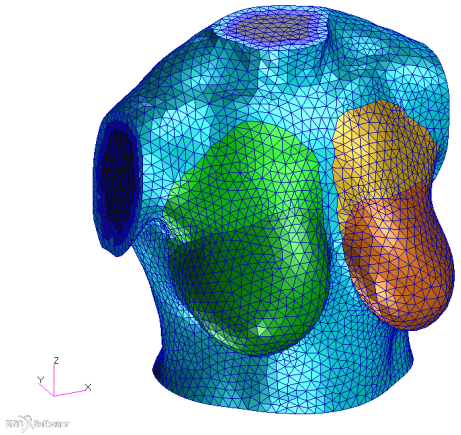
Probandin	Eigenfrequenz berechnet	BH Größe gemessen
PP1	3,65 Hz	85 E
PP2	7,30 Hz	75 AA
PP3	6,16 Hz	75 B
PP4	3,28 Hz	80 C

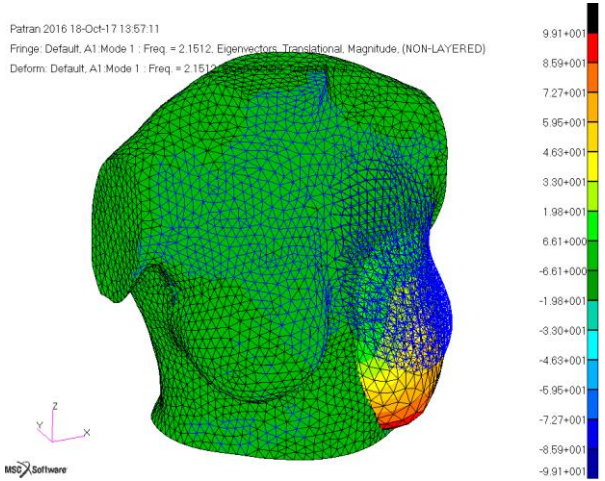


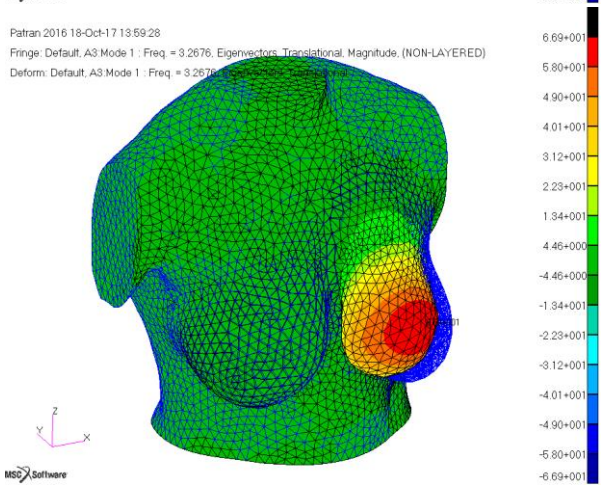


Eigenfrequenz Brust

- **FEM Berechnung P1**





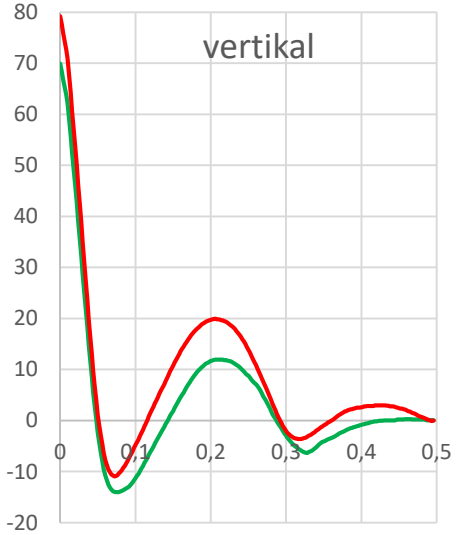


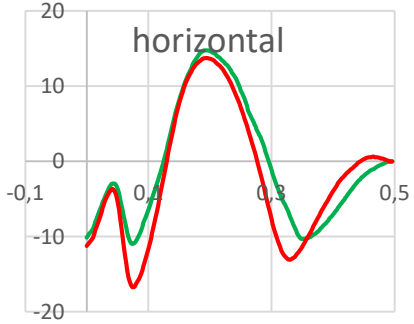
Probandin	Eigenfrequenz berechnet	BH Größe gemessen
P1	2,15 Hz	80 D
P1	3,26 Hz	80 D

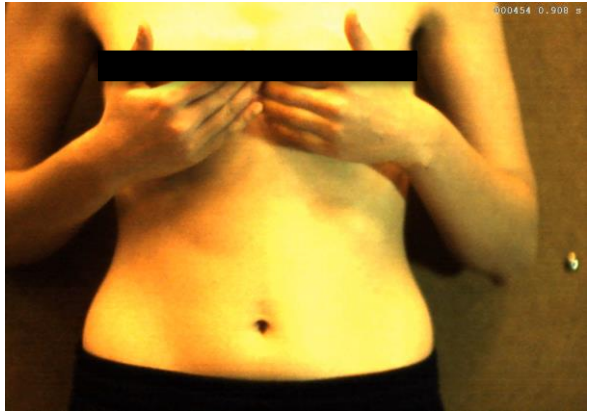
3D Bewegungsanalyse

- **Highspeed Ausschwingen**
  - VIDEO
- **Schwingamplitude = diagonal**
  - Schräg (45°) nach außen oben
  - Schräg ??
- **Dämpfung**
  - Beispiel P4

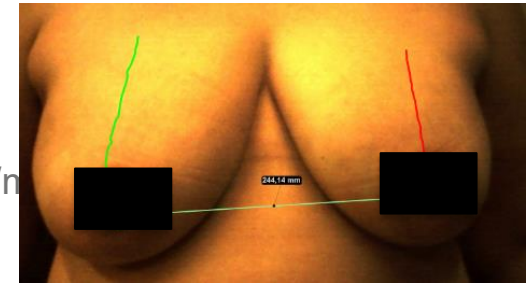
  - Vertikal
    - -10mm / +20mm links
    - -13mm / +12mm rechts



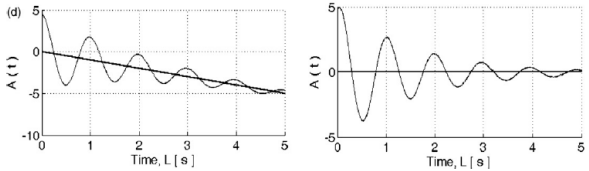




AP6 Test-Durchführung und Auswertung



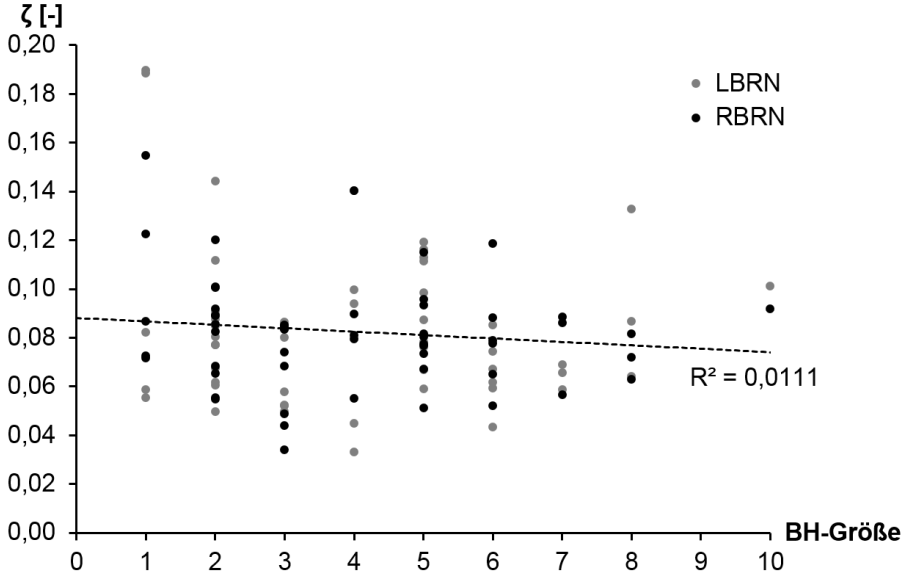
- **Dämpfung und Eigenfrequenz (Haßmann, 2017)**
  - Matlab R2014a
  - Fitting Exponentialfunktion $A \cdot e^{-\delta \cdot t}$ → Abklingkonstante δ [1/m
  - logarithmisches Dekrement $\vartheta = \delta \cdot \frac{T}{2}$ [-]



- **Dämpfungsgrad $\zeta = \frac{\vartheta}{\sqrt{(2\pi)^2+\vartheta^2}}$ [-]**

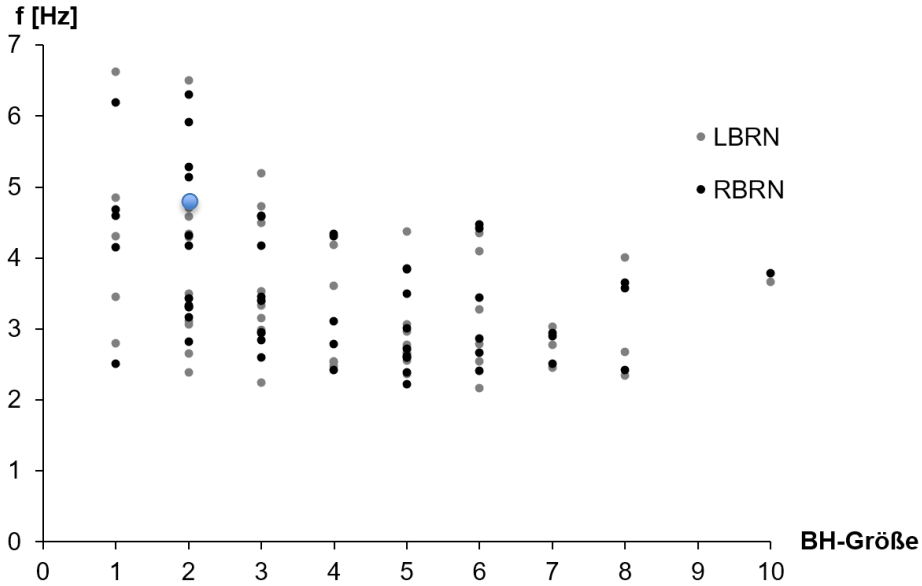
  = 0,082 ± 0,028
  - Nicht signifikant
  - kein Zusammenhang mit BH-Größe

  - Dämpfung unabhängig von Brustgröße
    => jede Brust benötigt Unterstützung



AP6 Test-Durchführung und Auswertung

- **Eigenfrequenz**
  - 3,51 ± 1,00 Hz (2,16 bis 6,61 Hz)
  - IBM SPSS 23
  - signifikant negative Korrelation (τ = -0,301; $p < 0{,}001$)
  - Wurzelfunktion
  - 4,87 Hz (Chen et al. 2013)
  - Liegt genau im Bereich der erzwungenen Anregung beim Laufen!
  - Annäherung durch $\omega_d = \sqrt{c/m - \delta^2}$ möglich?



AP6 Test-Durchführung und Auswertung

- **Eigenfrequenz Vergleich**
  - 59 + 5 Probandinnen
  - Korrelation Brustvolumina – BH-Größen
    - Normgrößen BH nicht aussagekräftig
    - Brustvolumen relevant nicht Brustumfang
  - Berechnete Frequenzen 5% - 25% über Messungen
  - Eigenfrequenz $\omega = \sqrt{K/m}$

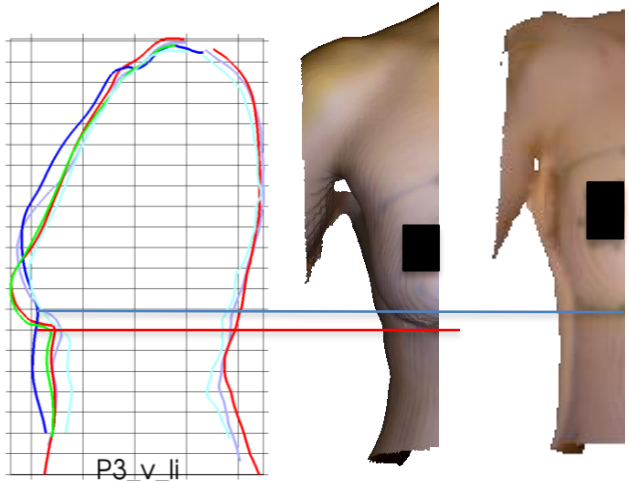
mitschwingende Masse zu gering?

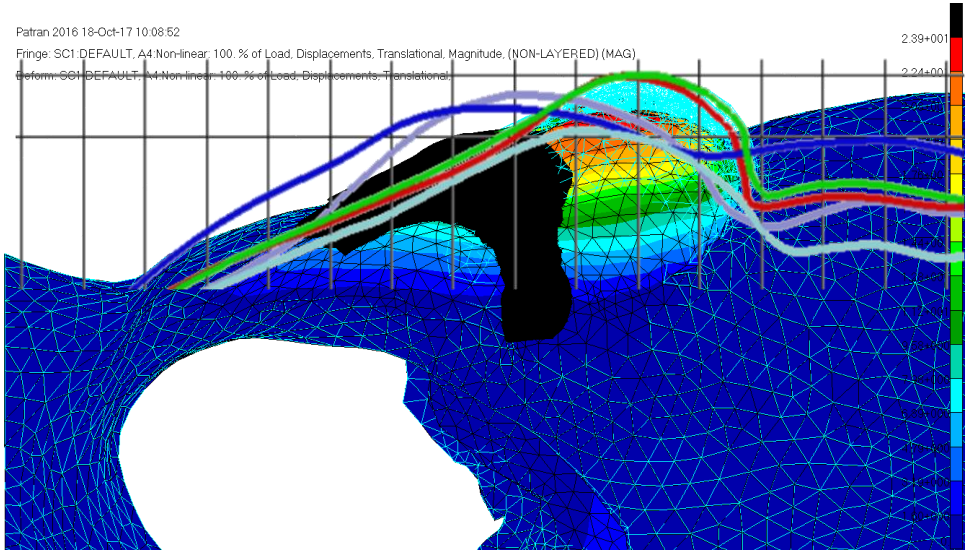
Bearbeitet von	Probandin	Alter	BH-Größe (angegeben)		Unterbrustweite u [cm]	Brustweite b [cm]	BH-Größe (Norm)		BH getragen	Brustvolumen_re [dm3]	Brustvolumen_li [dm3]	Muskelvolumen_re [dm3]	Muskelvolumen_li [dm3]	Freq_re Patran ohne BF mit Haut [Hz]	Freq_li Patran ohne BF mit Haut [Hz]	Freq_re gemessen [Hz]	Freq_li gemessen [Hz]	Abweichung_re [%]	Abweichung_li [%]
JD	P1	29	75-80	D	75	93	75	C	80D	0,70	0,73	0,21	0,25	3,78	3,72	4,31	3,61	14%	-3%
	P2	28	80	B	78	92	80	A	80B									#DIV/0!	#DIV/0!
MH	P3	37	85	B	77,5	89,5	75	A	80C	0,39	0,38	0,14	0,20	4,28	5,09			-100%	-100%
JD	P4	49	95	D	102	125	100	F	95E	1,35	1,13	0,43	0,25	3,21	3,48	3,66	4,01	14%	15%
MH	P5	25	80	B	74,5	88	75	A	80B	0,35	0,33	0,08	0,07	5,01	5,12	4,17	4,33	-17%	-15%
JD	P6	46	75	B	80	87	80	AA	80B	0,13	0,13	0,09	0,11	9,75	9,52	6,30	6,50	-35%	-32%
MH	P7	52	80	D	86	105	85	D	85E	0,88	0,95	0,37	0,38	3,14	3,03	2,87	2,78	-9%	-8%
MH	P8	32	75	B	76	85	75	AA	75B	0,22	0,23	0,13	0,14	6,80	6,83	6,19	6,61	-9%	-3%
MH	P9	22	75	C	75	84	75	AA	75B	0,26	0,29	0,10	0,13	6,14	5,57	4,69	4,85	-24%	-13%
CL	P10	46	85	C	82	100	80	C	85D	0,98	0,93	0,24	0,22	3,09	3,04	2,61	2,74	-16%	-10%
MH	P11	44	80	C	79	94	80	B	80C	0,48	0,47	0,16	0,16	3,89	3,92	2,96	3,40	-24%	-13%
MH	P12	40	75	C	80	94	80	A	80C	0,45	0,45	0,11	0,13	4,23	4,02	4,59	4,49	9%	12%
MH	P13	46	80	B	82	96	80	A	80B	0,48	0,55	0,30	0,20	3,76	3,74	3,43	3,50	-9%	-7%
MH	P14	33	75	C	83	93	85	AA	80B	0,44	0,44	0,13	0,15	4,89	4,84	3,34	3,43	-32%	-29%
	P15	61	80	B	77	90	75	A	80B									#DIV/0!	#DIV/0!
MH	P16	20	?	?	73	87	75	A	75B	0,37	0,34	0,10	0,07	4,15	4,76	4,15	3,46	0%	-27%
MH	P17	50	75	E	78	98	80	D	75E	0,82	0,88	0,21	0,20	3,42	3,35	2,43	2,53	-29%	-24%
JD	P18	19	75	GG	74	100	75	G	80F	0,90	1,04	0,24	0,19	3,07	2,83	2,40	2,16	-22%	-24%
MH	P19	25	75	F/G	75	96	75	E	75F							2,61	2,98	#DIV/0!	#DIV/0!
MH	P20	46	90	D	95	110	95	B	95C							3,44	3,27	#DIV/0!	#DIV/0!
JD	P21	67	85	C	88	107	85	D	85D							3,01	2,77	#DIV/0!	#DIV/0!
CL	P22	33	80	C	74	91	75	C	75C							5,14	4,70	#DIV/0!	#DIV/0!

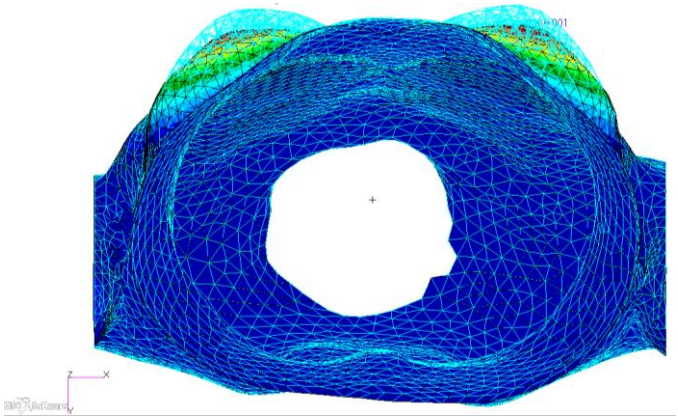
Verschiebungen der Brust

- **Verformung stehend – liegend**
- zur Seite / nach oben
- Verformung Brustkorb
- Schulterbewegung

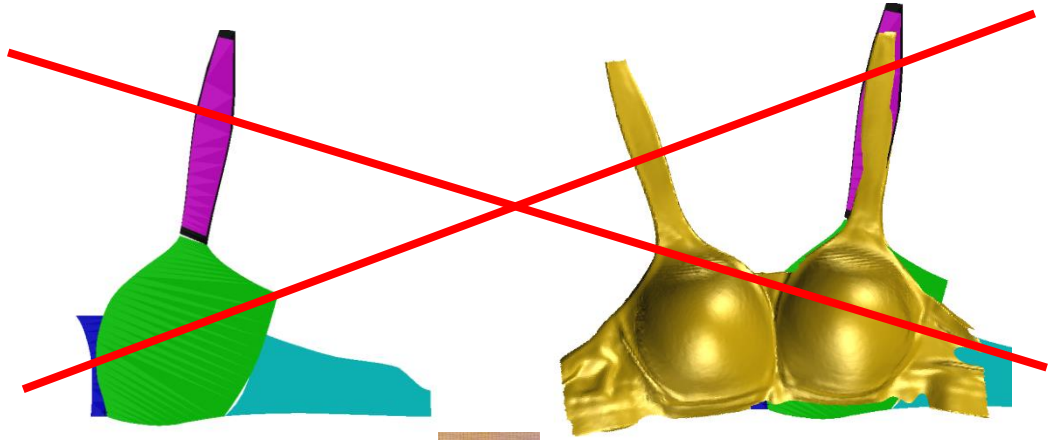
Drehteller stehend
Liegend
Stehend
Drehteller Anita-BH
Drehteller Odlo1-BH
Drehteller Odlo2-BH







FE-Model BRA

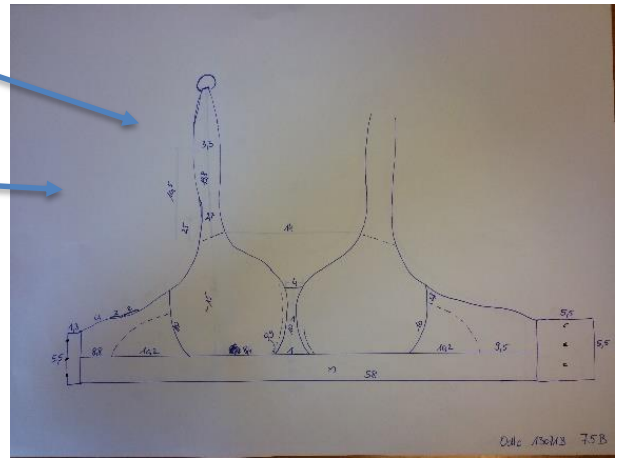


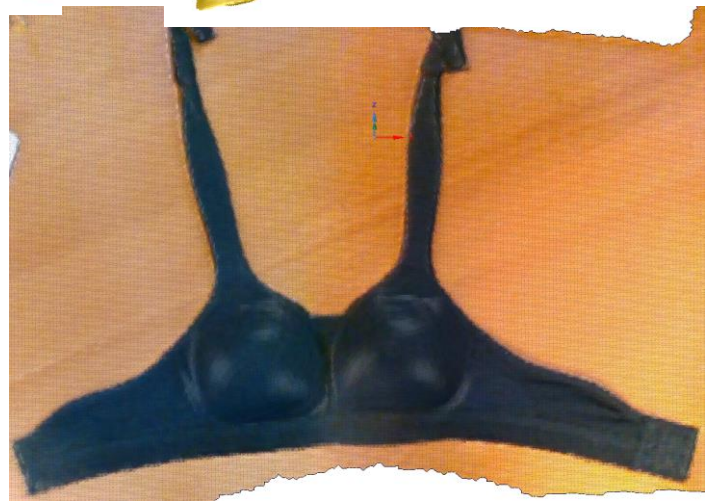
- **Schnittmuster**
  - nicht zielführend
  - Überlappungen!

- **Vermessungen**

- **Scandaten**

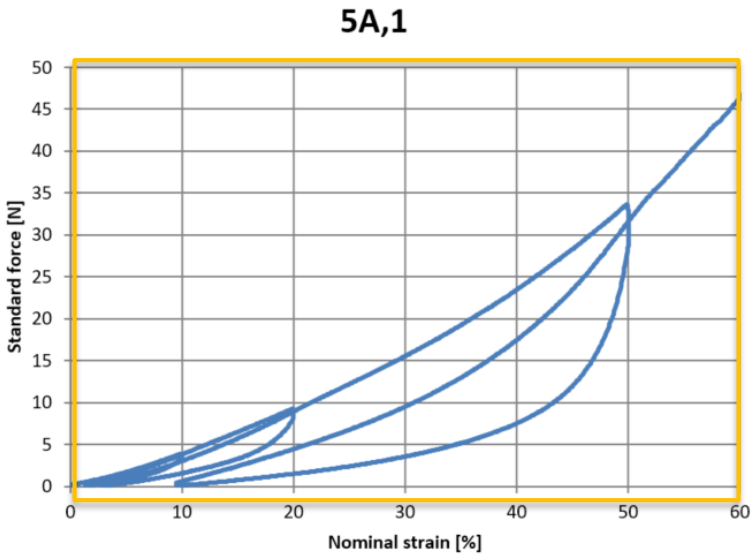
- **CAD Modell parametriesiert**

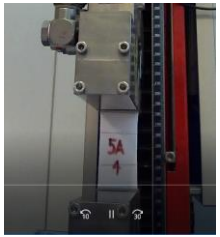


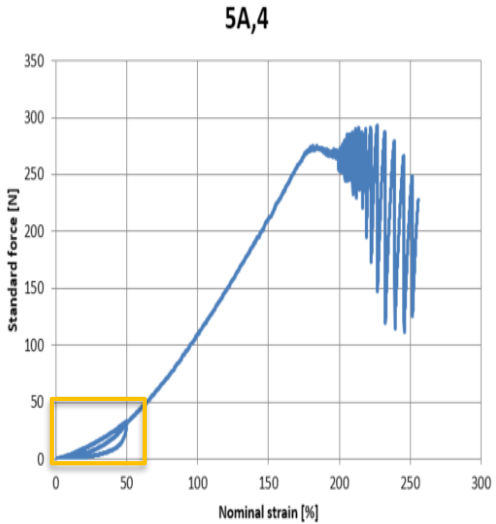


FE-Model BRA material data

- **Tensile tests**
  - 10% / 20% / 50% Loop
  - Tensile test until failure
  - Sample 5 = CUP

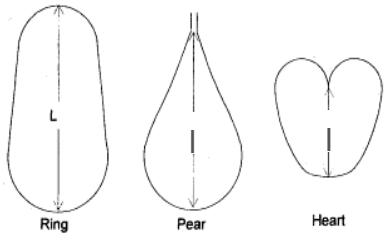


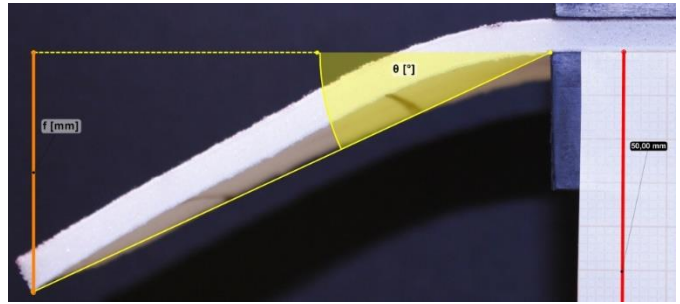


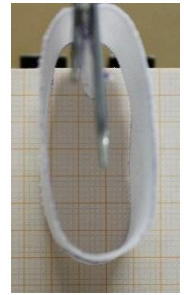


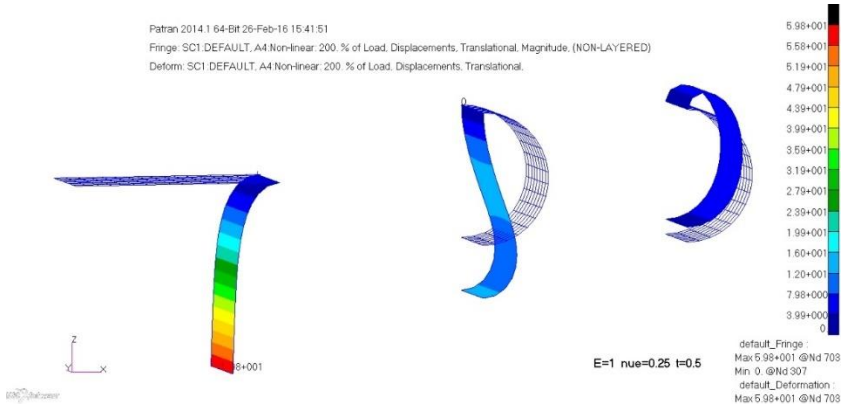
FE-Model BRA material data

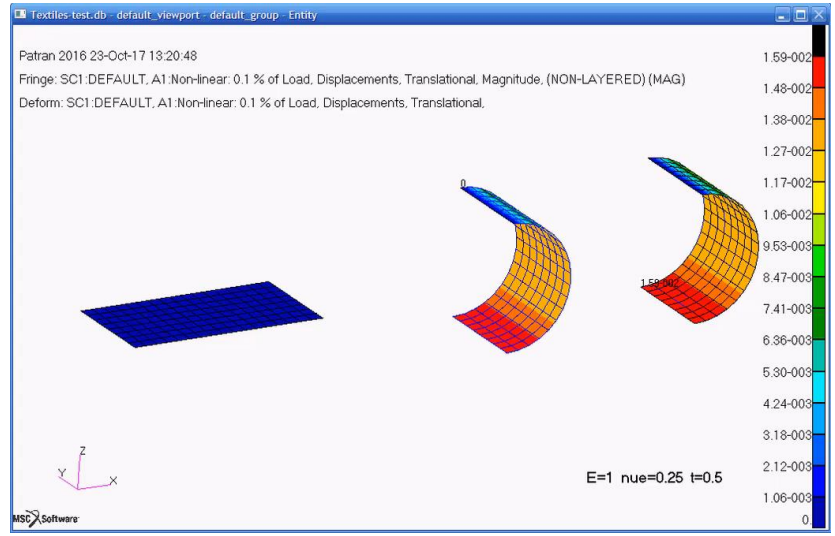
- **Bending tests**
  - Cantilever test
  - Hanging loop tests
    - Ring loop
    - Pear Loop
    - Heart Loop
    - …





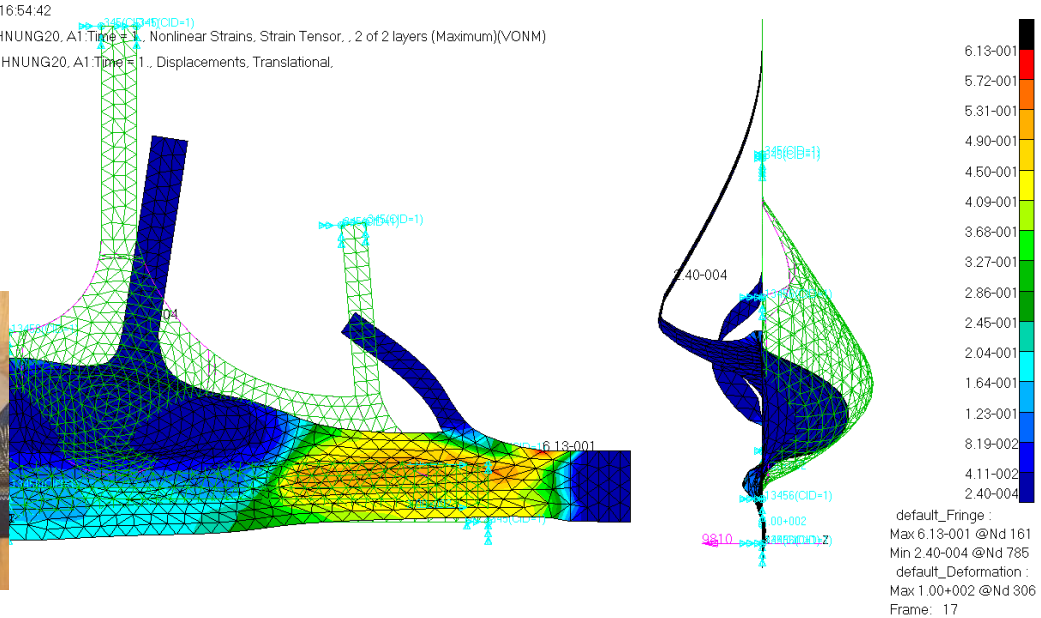




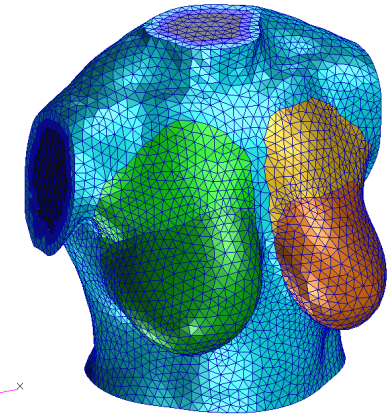


Berechnung FE-Modelle

- **Brustvolumen und -form**
- BH-Modell
  - Geometrie

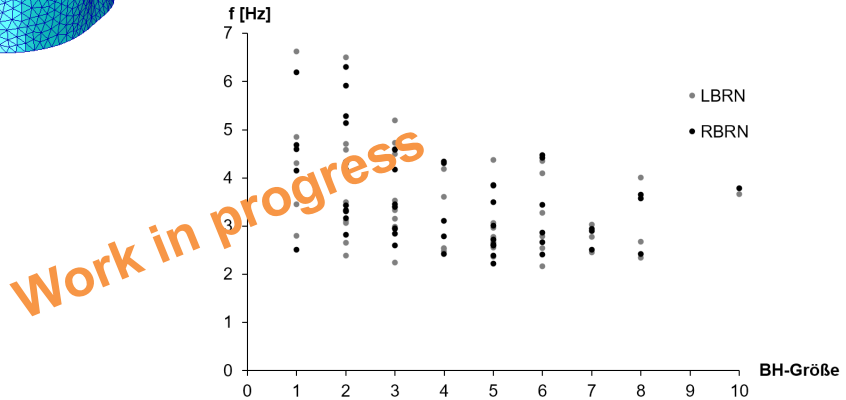


Zusammenfassung



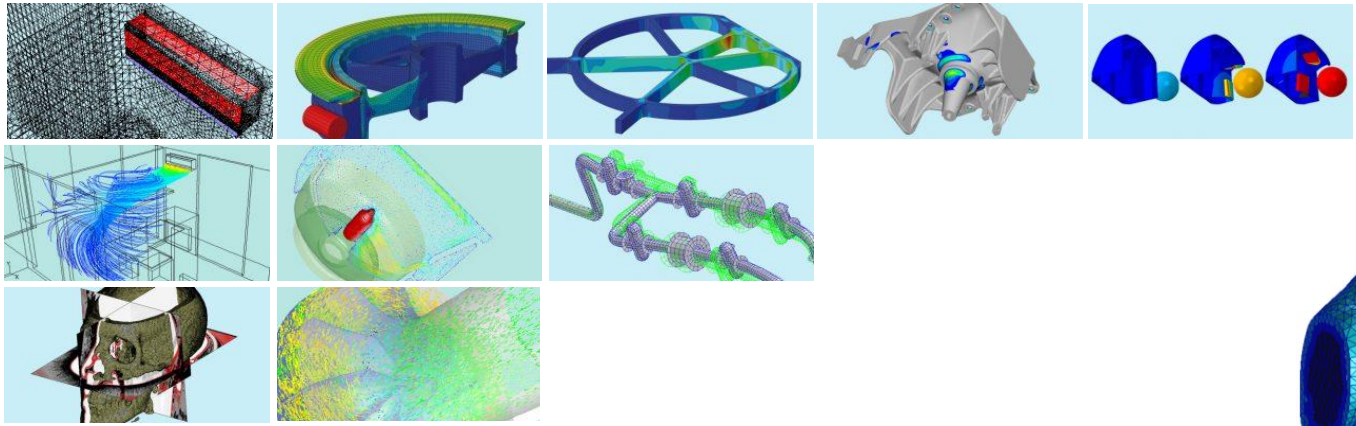
- **Geometrieermittlung**
  - 3D-Scandaten
  - Oberflächenrückführung (Blender)

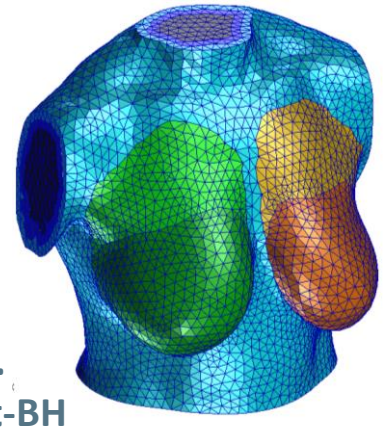
- **FE-Modellierung**
  - Linear elastisch
  - Hyperelastisch (Ogden2)
  - FLUID ???
  - Verifikation über Eigenfrequenzberechnungen



- **Ausblick**
  - Gesamtmodell Oberkörper
  - BH-Modell an Probandinnen
  - Druckverteilung zwischen BH und Oberkörper zur Ermittlung der Passform

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit





Dr. Wolfgang Krach
CAE Simulation & Solutions
Pitkagasse 2/1/16, A-1210 Wien
Tel.: +43 1 974 89 91 Fax: DW 99
E-mail:krach@cae-sim-sol.at
www.cae-sim-sol.at

Michaela Haßmann, MSc.
Projektleiterin FEM-Sport-BH
Institut für Sportwissenschaft, Universität Wien
Auf der Schmelz 6a, A-1150 Wien
Tel.: +43 1 4277 48883
E-mail:michaela.hassmann@univie.ac.at