

PNEUS IN NATUR UND TECHNIK

PNEUS IN NATURE AND TECHNICS

Diese Arbeit entstand am Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart,
unter Leitung von Frei Otto,
im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 64 Weitgespannte Flächentragwerke,
der Deutschen Forschungsgemeinschaft,
in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Biologen aus verschiedenen Fachrichtungen.

This work is originated from the Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart,
under the direction of Frei Otto,
within the scope of the Sonderforschungsbereich SFB 64 Wide Span Surface Structures,
of the Deutsche Forschungsgemeinschaft, •
in collaboration with biologists of different disciplines.

KLAUS BACH , JÜRGEN BEREITER - HAHN , • WOLFGANG F. GUTMANN ,
JOHANN - GERHARD HELMCKE , WERNER NACHTIGALL , FREI OTTO ,
ROBERTO RACCANELLO , EDA SCHAUR , RAINER SCHILL

Leitung der

EDA SCHAUR ,
KLAUS BACH , ROBERTO RACCANELLO , BERTHOLD BURKHARDT , THOMAS BRAUN

-	ENSTEHUNG DER ARBEIT AM IL	•	Kräfte und Spannungen	45
j			Grenze der Belastbarkeit	46
i	VORWORT.		Andere Belastungen	47
c			Unvorhersehbare Belastungen	47
7-	Frei Otto			
-	ZUM KOLLOQUIUM	11	Eda Schaur, Klaus Bach	
-	- Vorab	12	BILDER VON PNEUS	
-	- Die Arbeit am. Thema	12	IN NATUR UND TECHNIK	48
	Die Partner dieses Kolloquiums	12	- Hülle-Füllung-Medium	50
	Die Entstehung dieses Gesprächs	14	Grundformen	52
	Ein Tabu	18	Voluminöse Formen auf Flächen	54
			- Kissen	60
			- Segel	64
			- Schläuche	68
			- Einschnürungen	72
			- Netze	78
			Versponnungen	82
			Verstrebungen	86
			- Additionen	88
			Eigengewichtseinflüsse	96
			- Falten	102
			- Unterdruck	108
			Bewegungssysteme	112
			- Versteifungen	116
			Komplexe Systeme	124
			- Belastbarkeit	129
			Seifenblasenexperimente	132
	TEIL 1			
	DAS KONSTRUKTIONSSYSTEM PNEU	20		
	Frei Otto			
	EINFÜHRUNG UND BEGRIFFE	22		
	Frei Otto			
	DAS KONSTRUKTIONSSYSTEM PNEU	23		
	- Hülle - Füllung - Medium	23		
	-• Tragfähigkeit	23		
	- Hülle	23		
	- Füllung	25		
	Konstruktionsform	26		
	Dimensionen	26		
	Oberfläche	26		
	Geometrische Grundformen	27		
	Auf Flächen sitzende voluminöse	28		
	Formen			
	Kissen	28		
	Segel	28		
	Schläuche	28		
	Einschnürungen	29		
	Netze	30		
	Druckringe	30		
	Innere Versponnungen	30		
	Innere Verstrebungen	30		
	Additionsformen	31		
	Eigengewichtseinflüsse	34		
	Falten	37		
	Instabilität	40		
	Unterdruckpneus	40		
	Pneumatische Bewegungssysteme	42		
	Herstellungsverfahren	43		
	Erstarrungen,	43		
	Versteifung der Hülle	43		
	Unterdruck Versteifungen	44		
			TEIL 2	
			PNEUS IN DER LEBENDEN NATUR	
			UND IHRE EVOLUTION	136
			Johann-Gerhard Helmcke	
			DER BIOLOGISCHE PNEU - Sein Ursprung, seine	
			formbildende Bedeutung, seine funktionellen mor-	
			phologischen Abwandlungen während der Stammes-	
			und Individualentwicklung der Organismen	138
			Im Anfang wor der Pneu	138
			- Pneu 2. Ordnung: Die Zelle	139
			Pneu 3. Ordnung: Das Gewebe	141
			Pneu 4. und 5. Ordnung: Die Organe	
			und Körper der Pflanzen	143
			Pneu 4. und 5. Ordnung: Die Organe	
			und Körner der Tiere	147
			Entwurf eines möglichen Stammboumes funk-	
			tioneller Gestalten mit dem Pneu als Ausgangs-	
			form	150

1	4	Kräfte und Spannungen	45	J. Bereiter-Hahn	
		Grenze der Belastbarkeit	46	DIE ZELLE, EIN PNEU ?	152
	5	Andere Belastungen	47	Die Zellmembran als biegeunsteife Membrane	152
		Unvorhersehbare Belastungen	47	"Rindenplasma" als biegeunsteife Membrane	155
	11	Eda Schaur, Klaus Bach		- Seeigel	155
	12	BILDER VON PNEUS		- Bewegung des Wechseltierchens	
	12	IN NATUR UND TECHNIK	48	(Amoeba proteus)	156
iums	12	- Hülle-Füllung-Medium	50		
pröchs	14	- Grundformen	52	Rainer Schill	
	18	- Voluminöse Formen auf Flächen	54	PNEUMATISCHE KONSTRUKTIONEN	
		- Kissen	60	IN DER BOTANIK	158
		- Segel	64	- Einleitung	158
		- Schlauche	68	Diskussion und Beispiele	158
\ PNEU	20	- Einschnürungen	72	- Ausblick	162
		- Netze	78		
		Verspannungen	82	Wolfgang F. Gutmann	
	22	Verstrebungen	86	BIOTECHNISCHE ANALYSE	
		- Additionen	88	NIEDERER VIELZELLER	164
		- Eigengewichtseinflüsse	96	Einleitung	164
\ PNEU	23	- Falten	102	Die Konstruktionsgesetze des Hydroskeletts	165
	23.	Unterdruck	108	- Die Muskeln und ihre Eigenheiten	165
	23-	- Bewegungssysteme	112	- Muskel - Bindegewebs - Verband	165
	23	- Versteifungen	116	Füllung, Volumenkonstanz und Muskeln	165
	25	Komplexe Systeme	124	• Die Anordnung der Kollagenfasern	166
	26	- Belastbarkeit	129	Das stammesgeschichtliche Modell für die	
	26	Seifenblasenexperimente	132	Entstehung der Schlauchkonstruktion	168
	26			Die Konstruktionstypen	170
lformen'	27			Gitterkonstruktionen	170
: voluminöse	28			Schlouchkonstruktionen	171
		TEIL 2		Der Längsmuskelschlauch	171
	28	PNEUS IN DER LEBENDEN NATUR		Der längsversteifte Schlauch	172
	28	UND IHRE EVOLUTION	136	Der unsegmentierte Ring-Längs-Muskel-	
				Muskelschlauch	172
	29	Johann-Gerhard Helmcke		Die segmentale Hydrpskelett-Konstruktion	173
	30	DER BIOLOGISCHE PNEU - Sein Ursprung, seine		Pseudometamerie	174
	30	formbildende Bedeutung, seine funktionellen mor-		Tentakel Systeme	174
	30	phologischen Abwandlungen während der Stammes-		Konstruktion und Leistung	175
	30	und Individualentwicklung der Organismen	138	Versteifungen	177
	31	Im Anfang war der Pneu	138	- Anmerkungen zur Diskussion	180,
se	34	- Pneu-2. Ordnung: Die Zelle	139		
	37	Pneu 3. Ordnung: Das Gewebe	141	Werner Nachtigall	
	•40	Pneu 4. und 5. Ordnung: Die Organe		"PNEUS" -BEISPIELE AUS DER ZOOLOGIE	182
	40	und Körper der Pflanzen	143	Systeme mit formbildenden Abschluß-	
ungssysteme	42	Pneu 4. und 5. Ordnung: Die Organe		membranen	182
	43	und Körner der Tiere	147	Systeme mit zusätzlichen formbildenden	
	43	Entwurf eines möglichen Stammbaumes funk-		Außenstrukturen	183
e	43	tioneller Gestalten mit dem Pneu als Ausgangs-		- Formstabilität durch erhöhten Innendruck	184
igen	44	form	150		

Formänderung durch Änderung der Oberflächeneigenschaften	185	Zugringe bei zellgefüllten Pneus	207.	- Rohrsysteme - Pneus im Pneus
Formänderung durch Volumenvergrößerung	185	Behälter, Hohlkörper	207	- Innere Verspannung
Druckbetriebene Schwell- und Ausfahr- einrichtungen	186	Rohrsysteme	207	- Weiche Systeme
Rasche Reaktionssysteme: Springspinnen	188	Komplexe Systeme mit motorischen Elementen	208	- Druckverfestigung
Membranhüllte Einzelsysteme	190	Druckverfestigung	208	- Wachstum trotz
Mehrkomponentensysteme	191	Druckverfestigung innerhalb der Zelle	208	- Wachstum am Rand
		Druckverfestigung außerhalb der Zelle	209	- Auspressungen - Ausknospung - Flucht
Frei Otto	*	Das Versteifen ganzer Organismen	209	Knochenwachstum
ZUR EVOLUTION DER FORMENWELT DER LEBENDEN NATUR	192	Wachstum trotz Verfestigung	209	- Komplexe Objekte
- Vorbemerkung	194	Anbau	210	- Gestorbene Körper
- Formenwelt	194	Randwachstum	210	- Bauten der Tiere
Die Formenwelt der nicht lebenden Natur	194	Auspressung	210	- Tafel
Die Formenwelt der lebenden Natur	195	Ausknospung	2.11	
Die Formenwelt der Technik	195	Flucht	2.11	
- Die ersten Formen der lebenden Natur	196	Knochenwachstum	212	
Zusammenhänge	196	Komplexe Objekte mit Druck- • Verfestigungen	212	AUTOREN
Ausgangsförm	196	Komplexe pflanzliche Strukturen	213	LITERATUR
Nebel	197	Komplexe tierische Strukturen	213	STICHWORTVERZEICHNIS
Luftbläschen im Wasser	197	Komplexe Bewegungssysteme	213	
Öltröpfchen: im Wasser	197	Schalentiere	213	OFFENE FRAGEN
Luftblase	198	Tiere mit Innenskelett	213	
Wasserblase mit Lufthaut	198	Bewegungsformen von Tieren	214	VERSCHIEDENES
Mikrosphäre	198	Ausscheidungen	214	- Dank für Mitarbeit - Teilnehmer des
- Übergänge zu den Formen der lebenden Natur	199	- Gestorbene Körper, produzierte Stoffe	215	
- Mikrohülle	199	- Bauten der Tiere	215	
Knospungen	201	Anmerkungen zur Formenwelt der menschlichen Technik	215	
Formgruppe der Mikrohüllen	201			
- Die Formen der lebenden Natur	202			
Biologische Zelle	202			
Zellinhalt	204	Frei Otto, Eda Schaur, Roberto Raccanello		
Zellverbände	204	BILDER ZUR EVOLUTION		
Zellteilung	204	- Wasserpneus	218	
Kolonien	204	- Mikrohülle und Knospungen	226	
Feste Verbände	204	- Fossile Zellen	230	
Zugverfestigung	205	- Die Zelle	232-	
Motorische Systeme	205	- Zellteilung	2 3 6	
Pneumatische Systeme	205	- Kolonien	240	
Muskel	206	- Verbände	242	
Weiche komplexe Zellsysteme*	206	- Zugverfestigung	244	
Zellgefüllte Pneus	206	- Bewegungssysteme	246	
Zellgefüllte Pneus im Pneus	206	- Hohlkörper	250	

- Rohrsysteme	252
- Pneus im Pneu	254 „
- Innere Verspannungen	258
- Weiche Systeme	260
- Druckverfestigungen	262
- Wachstum trotz Verfestigung	264
- Anbau	266
- Wachstum am Rande	274
- Auspressungen	276
- Ausknospung	278
- Flucht	284
Knochenwachstum	292
- Komplexe Objekte	298
- Gestorbene Körper	304
- Bauten der Tiere	306
- Tafel	309

FOREWORD

Frei Otto

THE COLLOQUIUM

Introduction

- The work of the theme
- The participants of this colloquium
- Origin of the dialog
- A taboo

PARTEI

THE STRUCTURAL SYSTEM PNEU

Frei Otto

INTRODUCTION AND TERMS

Frei Otto

THE STRUCTURAL SYSTEM PNEU

- Envelope - Filling - Medium
- Loading Capacity
- Envelope
- Filling
- Structural Form
 - Dimensions'
 - Surface
 - Basic Geometrical forms
 - Voluminous forms resting on surfaces
 - Cushions
 - Sails
 - Tubes
 - Constrictians
 - Nets
 - Pressure rings
 - Inner bracings
 - Inner struttings
 - Compound forms
 - Influences of dead weight
 - Folds
 - Instability
 - Pneus with negative pressure
 - Pneumatic motion Systems
- Manufacturing processes
- Solidifications
 - Stiffening of the envelope
 - Stiffening under negative pressure

AUTOREN	312
LITERATUR	315
STICHWORTVERZEICHNIS	318
OFFENE FRAGEN	328
VERSCHIEDENES	
Dank für Mitarbeit und Unterstützung	311
Teilnehmer des Kolloquiums	10

- Forces and Stresses	45	J. Bereiter-Hahn	
Limit of loading capacity	46	IS THE CELL A PNEU ?	152
Other Stresses	47	- The cell membrane as a non-rigid	
Unexpected stresses	47	membrane of a pneu	152
		- "Cortical plasmo" as a non-rigid membrane	155
11 Eda Schaur, Klaus Bach		- Sea urdin egg	155
13 PICTURES OF PNEUS IN NATURE		- Movements of the amoeba (Amoeba proteus)	156
13 ANDTECHNICS	4 9		
13 Envelope - Filling - Medium	50	Rainer Schill	
15 - Basic forms	52	PNEUMATIC STRUCTURES IN BOTANY	158
19 - Voluminous forms and surfaces	54	- Introduction	158
- Cushions	60	- Discussion and Examples	158
" - Saris	6 4	- Outlook	162
- Tubes	68		
20 - Constrictions	72	Wolfgang Friedrich Güfmann	
- Nets	78	BIOTECHNICAL ANALYSIS OF LOWER	
- Brocings	82	METAZOAN SYSTEMS	164
22 - Struttings	86	Introduction	164*
- Compound forms	88	- The laws of construction of the	
- Dead weight influence	96	hydrostatic skeletons	165
23 - Folds	102	- The muscles and their characteristics	165
23 - Negative pressure	108	- Assembly of muscular connective tissues	165
23 - Motion Systems	112	Filling, volume stability and muscles	165
23 - Stiffenings	116	- The arrangement of Collagen fibres	166
25 - Complex Systems	124	- The phylogenetic model for the appearance	
26 - Loading capacity	128	of tube construction	168
26 - Soap bubble experiments	132	- Types of structures	170
26		Lattice structures	170
27		Tubular structures	171
		The longitudinal muscle tube	171
28 PART 2		The longitudinally stiffened tube	172
28 PNEUS IN LIVING NATURE AND		The unsegmented circumferential	
29 THEIR EVOLUTION	136	muscle tube	172
29		The segmental hydrostatic skeleton	
29 Johann-Gerhard Helmcke		structure	173
30 THE BIOLOGICAL PNEU - Its origin, Forming		Pseudometameric segmentation	174
30 significance, and Functional Morphological		Tentacle Systems.*	174
30 Variations during the phylogenetic and		- Structure and Performance	175
30 individual Development	138	- Stiffenings	177
31 - At the Beginning there was the pneu	138	- Remarks on the discussion	180
34 - The Pneu of the 2nd Order: The cell	139		
37 - The Pneu of the 3rd Order: The tissue.	141	Werner Nachtigall	
40 - Pneus of the 4th and 5th Orders:		"PNEUS" - EXAMPLES FROM ZOOLOGY	182
40 The Organs and Bodies of Plants	143	- Systems with form-giving Terminal	
42 - Pneus of the 4th and 5th Orders:		Membranes	182
43 Organs and Bodies of Animals	147	- Systems with additional form-giving	
43 Outline of a possible Genealogy of		external structures	183
43 functional Shapes with the Pneu as		- Stability of form through increased	
44 initial Form	151	inner pressure	184

Form changes through the change of surface characteristics	185	Tension rings in celi-filled pneus	207	- Growth despite /Addition
Form changes through increase in volume	185	Containers, hollow bodies	207	- Edge growth
Pressure driven swelling and extension equipment	186	Tube Systems	207	• - Ejection-
Fast reaction Systems: jumping spiders	188	Complex Systems with motor elements	208	- Budding
Membrane enveloped individual Systems	190.	Compression reinforcements	208	- Moull
Multiple component Systems	191	Compression reinforcements inside the cell	208	- Growth of bone
		Compression reinforcement* outside the cell	209	• - Complex object
		The stiffening of entire organisms	209	- Dead bodies
Frei Otto		Growth despite hardening	209,.	- Animal structur
ON THE EVOLUTION OF THE WORLD OF FORMS OF LIVING NATURE	192	Addition	210	- Plate
- Preface	194"	Edge growth	210	
- World of forms	194	Ejection	210	AUTHORS
The world of forms of non living nature	194	Budding	211	LITERATURE
The world of forms of living nature	195	Moult	212	
The world of forms of technics	195	Growth of bones	212	SUBJECT INDEX
The First Foms if Living Nature	196	Complex objects with reinforcement:		
Relationships	196	Complex plant structures	213	OPEN QUESTIONS
Original form	196	Complex animal structures	213	
Fog	197	Complex motion Systems	213	MISCELLANEOUS
Air bubble in water	197	Shells	213	Thanks for the
Oil drop in water	197	Inner skeletons	213	Colloquium pa
Air bubble	198	Foms of Motion	214	
Water bubblewith a skin made of air (antibubble)	198	Secretions	214	
Microsphere	198	- Dead Bodies, producs of living cells	215	
• -. Transition to the forms of living nature	199	Building structures of Animals	215	
Microshell	199	Remarks on the world of human Technology	215	
Budding	201	Frei Otto, Edo Schaur, Roberto Raccanello		
Group of forms of microshells	201	PICTURES TO EVOLUTION	216	
- The Foms of Living Nature	202	- Water pneus	218	
Biological cell	202	- Microshell and buds	226	
- "• • The Cell Content	204	- Fossil cells	230	
Cell ossociations	204	- Cell	232	
Cell Division.	204	Cell division	236	
Colonies	204	- Colonies	240	
- • • Solid associations	204	- Associations	242	
Tensile reinforcement	205	- Tensile reinforcement	244	
Motor Systems	205	- Motion Systems	246	
• • • Pneumatic Systems	205	Hollow bodies	250	
Muscle	206	- Tube Systems	252	
Soft Complex Cell Systems	206	- Pneus within a pneu	254	
Cell-filled pneus	206	Inner bracings	258	
Cell-filled pneus within a pneu	206	- Soft Systems	260	
		- Pressure reinforcements	262	

		Tension rings in cell-filled pneus	207	Growth despite hardening.	264
	185	Containers, hollow bodies	207	Addition	266
	185	Tube Systems	207	Edge growth	274
	186	Complex Systems with motor elements	208	Ejections	27c
	188		208	Budding	278
	190	Compression reinforcements	208	Moult	284
	191	Compression reinforcements inside the cell	208	Growth of bones	292
		Compression reinforcement* outside the cell	209	Complex objects	298
		The stiffening of entire organisms	209	Dead bodies	304
	192	Growth despite hardening	209	Animal structures	306
	194	Addition	210	Plate	309
	194	Edge growth	2 10		
I		Ejection	210	AUTHORS	312
ure	194	Budding	211	LITERATURE	315
	195	Moult	212		
	195	Growth of bones	212	SUBJECT INDEX	323
	196	Complex objects with reinforcement:			
	196	Complex plant structures	213	OPEN QUESTIONS	331
	196	Complex animal structures	213		
	197	Complex motion Systems	213	MISCELLANEOUS	
	197	Shells	213	Thanks for the cooperation and support	311
	197	Inner skeletons	2 13	Colloquium participants	10
	198	Forms of Motion	214		
of		Secretions	214		
	198	- Dead Bodies, products of living cells	215		
	198	- Building structures of Animals	215		
5	199	Remarks on the world of human Technology	2 15		
	199				
	201	Frei Otto, Eda Schaur, Roberto Raccanello			
shells	201	PICTURES TO EVOLUTION	216		
	202	- Water pneus	218		
	202	- Microshell and buds	226		
	204	- Fossil cells	230		
	204	- Cell	232		
	204	- Cell division	236		
	204	- Colonies	240		
	204	- Associations	242		
	205	Tensile reinforcement	244		
	205	Motion Systems	246		
	205	- Hollow bodies	250		
	206	- Tube Systems	252		
	206	Pneus within a pneu	254		
	206	- Inner bracings	258		
i a		- Soft Systems	260		
	206	- Pressure reinforcements	262		