

# IL 33

# RADIOLARIEN RADIOLARIA

## Schalen in Natur und Technik II Shells in Nature and Technics II

Johann-Gerhard Helmcke:

**DIE RADIOLARIEN IM STEREOSKOPISCHEN BILD  
RADIOLARIA IN STEREOSCOPIC MICROGRAPHS**

Klaus Bach:

**PROZESSE DER FORMBILDUNG**

Erklärung der Formbildung natürlicher Konstruktionen  
mit Hilfe analoger Modellversuche  
am Beispiel einiger Radiolarien-Skelette

**PROCESSES OF FORM GENERATION**

Explanation of the Form Generation of Natural Structures  
Using Analogous Model Experiments  
Carried out on some Radiolaria Skeletons

Mit Beiträgen von /  
with Contributions by:

Joachim Haupt, Ulrich Kull, Frei Otto

Vorwort von Frei Otto	8	<b>TEIL 1</b>	149
Probleme der Gestaltbildung von Ulrich Kull	12		
Zur Entstehung der Arbeit von Klaus Bach	14	<b>ZIELE UND METHODEN DER ARBEIT</b>	150
Joachim Haupt			
<b>RADIOLARIEN - ZOOLOGISCH BETRACHTET</b>	16	<b>1.1. Das Problem</b>	150
Johann-Gerhard Helmcke		<b>1.2. Warum setzen sich Architekten mit diesem Problem auseinander?</b>	152
<b>DIE RADIOLARIEN IM STEREOSKOPISCHEN BILD</b>	27		
Einführung	28	<b>1.3. Der einzuschlagende Weg</b>	153
Zur Aufnahmemethode und zur Interpretation der REM-Stereobilder	30	1. Praktische Grundlagen, Materialien	154
Benutzungshinweise zum Stereosichtgerät	32	2. Theoretische Grundlagen	157
Stereoskopie	34	<b>1.4. Die Methoden der Untersuchung</b>	158
<b>Elemente</b>	38	1. Analogie	158
- Haut	38	2. Modelle	159
- Gekammerte Haut	42	2.1. Analoge Modelle	159
- Muster geordnet	44	3. Selbstbildung	160
- Muster ungeordnet	48	4. Fazit aus den Methoden der Untersuchung und ihre Übertragung auf das Problem	161
- Fehlstellen	52		
- Falten	56	<b>1.5. Zusammenfassende Darstellung grundlegender Erklärungsmodelle</b>	162
- Stege	58		
- Rippen	64		
- Stachel	66		
- Röhren	76	<b>1.5. 1. Pneu</b>	162
- Leisten	82	1.1. Formbildung und Gesetzmäßigkeiten	163
- Kapsel	86	der Wasserpneus	164
- Netze mit Dreiecksmaschen	90	1. Tropfen	164
- Netze mit Quadratmaschen	96	2. Blasen und Mikrosphären	164
- Netze mit Fünf- und Sechseckmaschen	98	in Kugel- und Halbkugelform	164
- Schleierartiger Belag	100	3. Zylinderblase	166
<b>Formen</b>	102	4. Blasenadditionen	166
- Kugel, Blase	102	4.1. 1-dim. Blasenreihen	166
- Konzentrische Schalen	106	4.2. 2-dim. Blasenpackung	167
- Halbschalen	110	4.3. 3-dim. Blasenpackung	168
- Blasenanlagerung	116		
- Bügel	120	<b>1.5. 2. Membranspannungen</b>	170
- Polyeder	122	1. Oberflächenspannung	170
- Schäume	124	von Flüssigkeiten	170
<b>Verformungen</b>	126	2. Oberflächenspannung	171
- Eindellungen	126	von Flüssigkeitslamellen	171
- Ausbeulungen	130	3. Randwinkel und Haftspannung	172
- Kegel	136	von Flüssigkeiten	172
Bizarre Formen	140		
Klaus Bach		<b>1.5. 3. Elastische Membranen, Faserstrukturen, Fasernetze</b>	172
<b>PROZESSE DER FORMBILDUNG</b>		1. Wasserpneus mit elastischen Membranen	172
<b>Erklärung</b>		1.1. Pneus mit elastischen fließenden Membranen	172
der Formbildung natürlicher Konstruktionen mit Hilfe analoger Modellversuche am Beispiel einiger Radiolarien-Skelette	145	1.2. Pneus mit elastischen nicht fließenden Membranen	174
Einführung	146	2. Wasserpneus mit Faser- und Fadenstrukturen	176
Zusammenfassung, Danksagung	147	3. Wasserpneus mit Fasernetzen	178

3.1. Darstellung von Fasernetzen mit Netzmodellen	179	<b>Kapitel 1</b>	
1. Flächige Netze	179	<b>BESCHREIBUNG VON GESAMTFORMEN</b>	
1.1. Federnetze	180	<b>EINIGER RADIOLARIEN-SKELETTE UND ERKLÄRUNG IHRER FORMBILDUNG</b>	
1.2. Sechseckmaschen-Netze	180	<b>MITTELS ANALOGER MODELLE</b>	204
2. Räumliche Netze	181		
2.1. Offene Netze	181	<b>1. Einzelformen</b>	204
2.2. Geschlossene Netze	181	1. Kugeln	204
		1.1. Konzentrische Kugeln	204
1.5. 4. Erhärtungen von Pneus	182	Analoge Modelle	206
1. Übersicht	182	1.2. Deformierte Kugeln	207
2.1. Modelle zur Erhärtung des Pneuinneren	183	Analoge Modelle	208
1. Packungsmodelle	183	<b>2. Additionsformen</b>	212
2. Gußmodelle mit Pnehuhüllen	183	<b>2.1. Skelette aus mineralisierten Blasenpackungen</b>	212
2.2. Modelle zur Erhärtung der Zwickel	184	1. Eindimensional gereimte Blasen	212
1. Ausguß von Packungen	184	Analoge Modelle	214
		2. Zweidimensional angeordnete Blasen	215
1.6. Analogien in der lebenden Natur	185	Analoge Modelle	216
1. Überblick	185	3. Dreidimensionale Blasenpackungen	220
2. Formbildungsprozesse in der lebenden Natur	185	Analoge Modelle	220
3. Erhärtungsprozesse bei Radiolarien	187	1. Packungen aus vier Blasen	220
4. Warum Kristallisation verhindert wird	188	1.1.-1.6. Sechs mögl.Kombinationen	221
		<b>2.2. Skelettgerüste aus mineralisierten flüssigen Kanten</b>	226
1.7. Radiolarien, was sind das?	190	Zusammenfassung	226
1. Radiolarien aus biologischer Sicht	190	Analoge Modelle	226
1.1. Einteilung	190	1. Packungen aus drei Blasen	227
2. Weitere Einzelheiten	193	2. Packungen aus vier Blasen	228
3. Die Hartsubstanz der Skelette	195	3. Packungen aus fünf Blasen	228
4. Modelle zum Verständnis des zeitlichen Ablaufs der Skelett-Entstehung	196	4. Packungen aus sechs Blasen	229
4.1. Modelle gleichzeitiger Entstehung	196	5. Packungen aus sieben Blasen	230
1.1. Blasenmodell	196	6. Packungen aus mehr als sieben Blsn.	232
1.2. Fasermmodell	197	7. Packungen aus Schaumblasen	234
4.2. Modell zeitlichen Nacheinanders	197	<b>2.3. Weitere Modelle zur Entstehung von Skelettgerüsten</b>	239
1. Wachstumsmodell	197	1. Netzmodelle	239
1.8. Das eigene Experimentieren	197	2. Stabwerksmodelle	239
1. Allgemein	197	3. Gußmodelle	240
2. Speziell	198	4. Fasermmodelle	240
		Fazit	242
1.9. Fazit	198	<b>Kapitel 2</b>	243
		<b>BESCHREIBUNG</b>	
<b>TEIL 2</b>	201	<b>VON STRUKTURFORMEN UND STRUKTURELEMENTEN EINIGER RADIOLARIEN-SKELETTE UND ERKLÄRUNG IHRER FORMBILDUNG MITTELS ANALOGER MODELLE</b>	244
<b>ERKLÄRUNG DER FORMBILDUNG EINIGER RADIOLARIEN-SKELETTE MIT HILFE ANALOGER MODELLVERSUCHE</b>	202	<b>1. Einige Strukturformen von Skelett-oberflächen</b>	244
Zusammenfassung	202	1. Geschlossene Schalen	246
		2. Schalen mit Löchern, Lochschalen	246
		Analoge Modelle	248
		Fazit	251
		<b>1. 2.1. Lochoberflächen</b>	252
		1. Ungleichmäßig verteilte Löcher	252
		1.1. Unregelmäßige Lochformen	252
		1.2. Regelmäßige Lochformen	253
		2. Gleichmäßig verteilte Löcher	256
		2.1. Kreisrunde und sechseckige Lochformen	256
		3. Zusammengesetzte Lochformen	261
		<b>1. 2.2. Netz- und Gitteroberflächen</b>	264
		1. Maschenformen	264
		2. Wachstumsmodell zur Erklärung der Maschenstrukturen	266
		3. Dreiecks- und Quadratmaschen - ganz oder teilweise geplant?	267
		<b>2. Einige Strukturelemente von Skelett-oberflächen</b>	271
		1. Stachel	271
		Analoge Modelle	271
		1.1. Stacheln als 'ehemalige' Bläschenstege (1. These)	272
		1.2. 'Gezogene' Stacheln (2. These)	274
		1.3. Wachstum von Nadeln (3. These)	276
		2. Schlaufen	277
		<b>Kapitel 3</b>	279
		<b>BESCHREIBUNG VON GESTALT UND STRUKTURFORM DES CALLIMITRA-SKELETTS UND ERKLÄRUNG SEINER FORMBILDUNG MITTELS ANALOGER MODELLE</b>	280
		Analoge Modelle	282
		1. Analyse zur Geometrie der Skelette	285
		2. Vier Gedankenmodelle zur Erklärung von Skelettform und Skelettstruktur	290
		<b>TEIL 3</b>	293
		<b>GRUNDLEGENDE MATERIALIEN</b>	294
		1. Zur Geschichte analoger Modelle, insonderheit der Seifenhautmodelle	294
		2. Zur Geschichte des Fasermmodells	300
		<b>TEIL 4</b>	
		<b>ANHANG</b>	303
		Literatur	304
		Fußnoten, Anmerkungen	307
		Lebenslauf	314
		Quellenverzeichnis der Abbildungen	315

Preface by Frei Otto	8	<b>PART 1</b>	149
Problems of Morphogenesis by Ulrich Kull	12		
Origin and Progress of the Work by K. Bach	14	<b>OBJECTIVES AND METHODS OF THIS WORK</b>	150
<b>Joachim Haupt</b>			
<b>RADIOLARIA - FROM THE VIEWPOINT OF ZOOLOGY</b>	16	<b>1.1. The Problem</b>	150
<b>Johann-Gerhard Helmcke</b>		<b>1.2. Why are Architects Interested in this Problem?</b>	152
<b>RADIOLARIA IN STEREOSCOPIC MICROGRAPHS</b>	27		
<b>Introduction</b>	28	<b>1.3. Proposed Course</b>	153
<b>SEM Stereo Micrographs -</b>		1. Practical Requirements, Materials	154
<b>Photographing Technique and Interpretation</b>	30	2. Theoretical Foundations	157
<b>Using the Stereoscopic Viewer</b>	32		
<b>Stereoscopy</b>	34	<b>1.4. Methods of Investigation</b>	158
<b>Elements</b>	38	1. Analogy	158
- Skin	38	2. Models	159
- Chambered Skin	42	2.1. Analogous Models	159
- Regular Patterns	44	3. Self-Generation	160
- Irregular Patterns	48	4. Conclusion Drawn from the Methods of Investigation and Application to the Problem	161
- Imperfections	52		
- Folds	56	<b>1.5. Synopsis of Basic Models</b>	162
- Struts	58		
- Ribs	64	<b>1.5. 1. Pneumatics</b>	162
- Spines	66	1.1. Form Generation and Laws Applying to Hydropneumatics	163
- Tubes	76	1. Droplets	164
- Ridges	82	2. Bubbles and Microspheres in Spherical and Hemispherical Form	164
- Capsule	86	3. Cylindrical Bubbles	166
- Nets with Triangular Meshes	90	4. Agglomerations of Bubbles	166
- Nets with Quadrangular Meshes	96	4.1. 1-dim. Rows of Bubbles	166
- Nets with Pentagonal and Hexagonal Meshes	98	4.2. 2-dim. Bubble Clusters	167
- Veil Like Incrustation	100	4.3. 3-dim. Bubble Clusters	168
<b>Forms</b>	102	<b>1.5. 2. Membrane Stresses</b>	170
- Sphere, Bubble	102	1. Surface Tension of Liquids	170
- Concentric Shells	106	2. Surface Tension of Liquid Films	171
- Hemispheres	110	3. Edge Angels and Adhesive Forces of Liquids	172
- Agglomeration of Bubbles	116		
- Bows	120	<b>1.5. 3. Elastic Membranes, Fibre Structures and Fibre Nets</b>	172
- Polyhedron	122	1. Hydro Pneumatics with Elastic Membranes	172
- Foams	124	1.2. Pneumatics with Elastic Fluid Membranes	172
<b>Deformations</b>	126	1.2. Pneumatics with Elastic Non-Flowing Membranes	174
- Indentations	126	2. Hydro Pneumatics with Fibre and Thread Structures	176
- Bulges	130	3. Hydro Pneumatics with Fibre Nets	178
- Cone	136		
<b>Bizarre Forms</b>	140		
<b>Klaus Bach</b>			
<b>PROCESSES OF FORM GENERATION</b>			
<b>Explanation of the Form Generation of Natural Structures Using Analogous Model Experiments Carried out on some Radiolaria-Skeletons</b>	145		
<b>Introduction</b>	146		
<b>Summary, Acknowledgements</b>	148		

3.1. Demonstration of Fibre Nets		<b>Chapter 1</b>		<b>1. 2.1. Perforated Surfaces</b>	252
Using Net Models	179	<b>DESCRIPTION OF</b>		1. Unevenly Distributed Holes	252
1. 2-dimensional Nets	179	<b>OVERALL FORMS OF SOME RADIOLARIA SKELETONS</b>		1.1. Irregular Hole Forms	252
1.1. Spring Nets	180	<b>AND EXPLANATION THEIR FORM GENERATION</b>		1.2. Regular Hole Forms	253
1.2. Hexagonal Mesh Fabric Nets	180	<b>BY MEANS OF ANALOGOUS MODELS</b>	204	2. Evenly Distributed Holes	256
2. Spatial Nets	181			2.1. Circular, Hexagonal Holes	256
2.1. Open Nets	181	<b>1. Single Forms</b>	204	3. Composite Hole Forms	261
2.2. Closed Nets	181	1. Spheres	204	<b>1. 2.2. Net and Grid Surfaces</b>	264
		1.1. Concentric Spheres	204	1. Mesh Forms	264
		Analogous Models	206	2. Growth Model Explaining	
<b>1.5. 4. Induration of Pneumatics</b>	182	1.2. Deformed Spheres	207	Mesh Structures	266
1. Synopsis	182	Analogous Models	208	3. Triangular and Square Meshes	
2.1. Models Designed to Produce				- Partially or Wholly Planned?	267
Induration of the Interior	183	<b>2. Additional Forms</b>	212		
1. Cluster Models	183	1. 1-dimensionally Agglomerated Bubbles	212	<b>2. Some Structural Elements of Skeleton</b>	
2. Cast Models Using Pneumatic		Analogous Models	214	<b>Surfaces</b>	271
Envelopes	183	2. 2-dimensionally Arranged Bubbles	215	1. Spines	271
2.2. Models Designed to Produce Indu-		Analogous Models	215	Analogous Models	271
ration of Interstitial Spaces	184	3. 3-dimensional Bubble Clusters	220	1.1. Spines as 'Former' Bubble Struts	
1. Casting the Intersitial of		Analogous Models	220	(First Theory)	272
Clusters	184	1. Clusters Comprising Four Bubbles	220	1.2. 'Drawn' Spines (Second Theory)	274
		1.1.-1.6. Six Possible Combinations	221	1.3. Growth of Needles (Third Theory)	276
				2. Loops	277
<b>1.6. Analogies in Living Nature</b>	185	<b>2.2. Skeletal Forms Consisting of Minera-</b>			
1. Synopsis	185	<b>lised Liquid Edges</b>	226		
2. Form-giving Processes in Living		Summary	226	<b>Chapter 3</b>	279
Nature	185	Analogous Models	226	<b>DESCRIPTION OF FORM AND STRUCTURE</b>	
3. Induration Processes in Radiolaria	187	1. Clusters Comprising Three Bubbles	227	<b>OF THE CALLIMITRA SKELETON</b>	
4. Why Crystallisation is Prevented	188	2. Clusters Comprising Four Bubbles	228	<b>AND EXPLANATION OF ITS FORM GENERATION</b>	
		3. Clusters Comprising Five Bubbles	228	<b>BY MEANS OF ANALOGOUS MODELS</b>	280
<b>1.7. What are Radiolaria?</b>	190	4. Clusters Comprising Six Bubbles	229	Analogous Models	282
1. Radiolaria from the Biologist's		5. Clusters Comprising Seven Bubbles	230	1. Analysis of the Geometry of Callimitra	
Standpoint	190	6. - more then Seven Bubbles	232	Skeletons	285
1.1. Classification	190	7. Clusters out of Foam Bubbles	234	2. Four Theoretical Models Explaining Form	
2. Further Details	193			and Structure of the Skeleton	290
3. The Hard Skeleton Substance	195	<b>2.3. Further Models Illustrating the</b>			
4. Models Explaining the Gradual		<b>Generation of Skeletons</b>	239	<b>PART 3</b>	293
Generation of Skeletons	196	1. Net Models	239	<b>BASIC MATERIALS</b>	294
4.1. Models of Simultaneous Generation	196	2. Models Consisting of Rods	239	1. On the History of Analogous Models,	
1. Bubble Model	196	3. Cast Models	240	Especially Soap Film Models	294
2. Fibre Model	197	4. Fibre Models	240	2. On the History of the Fibre Model	300
4.2. Model of Sequential Generation	197	Conclusion	242		
1. Growth Model	197			<b>PART 4</b>	
<b>1.8. Our Own Experiments</b>	197	<b>Chapter 2</b>	243	<b>APPENDIX -</b>	303
1. General Experiments	197	<b>DESCRIPTION</b>		Literature	304
2. Special Experiments	198	<b>OF STRUCTURAL FORMS AND STRUCTURAL ELEMENTS</b>		Footnotes, Comments	307
<b>1.9. Conclusion</b>	198	<b>OF SOME RADIOLARIA SKELETONS</b>		Biography	314
		<b>AND EXPLANATION OF THEIR FORM GENERATION</b>		Figure Index	315
<b>PART 2</b>	201	<b>BY MEANS OF ANALOGOUS MODELS</b>	244		
<b>EXPLANATION</b>		<b>1. Some Structural Forms of Skeleton</b>			
<b>OF THE FORMATION OF SOME RADIOLARIA SKELETONS</b>		<b>Surfaces</b>	244		
<b>USING</b>		1. Closed Shells	246		
<b>ANALOGOUS MODEL EXPERIMENTS</b>	202	2. Shells with Holes, Perforated Shells	246		
Summary	202	Analogous Models	248		
		Conclusion	251		