

# IL 24

Frei Otto

## PRINZIP LEICHTBAU LIGHTWEIGHT PRINCIPLE

bearbeitet von / presented by:

FRIEDER KLENK

mit weiteren Beiträgen von / with further contributions by:

ROLF REINER, EBERHARD HAUG

An den Untersuchungen zum IL 24 'Prinzip Leichtbau' waren beinahe alle Mitarbeiter des Instituts für Leichte Flächentragwerke (IL) zwischen 1964 und 1994 beteiligt, besonders über: /

Almost all fellow workers at the Institute for Lightweight Structures (IL) between 1964 and 1994 in some way participated in the investigations leading to IL 24 'Lightweight Principle', but in particular:

BERTHOLD BURKHARDT  
SWITBERT GREINER  
JÜRGEN W. HENNICKE  
FRIEDER KLENK

GERNOT MINKE  
ILSE SCHMALL  
HARRY VOIGT  
URSULA WUCHERER

und viele  
Architekturstudenten /  
an many students of  
architectural design

VORWORT

Anmerkungen zur Entstehung dieser Arbeit

Kf 24/052<sup>7</sup>

WAS IST LEICHT?

4

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Einführung                         | 11 |
| Schwer und Leicht                  | 14 |
| Masse und Gewicht                  | 14 |
| Groß und leicht - klein und schwer | 15 |
| Die nützliche Leichtigkeit         | 16 |
| Das absolute Gewicht               | 17 |
| Das Längengewicht                  | 17 |
| Das Flächengewicht                 | 17 |
| Die Dichte                         | 18 |
| Die Kraft                          | 19 |
| Der Druck                          | 20 |
| Die Belastung                      | 20 |
| Eigengewicht                       | 22 |
| Bruchlast                          | 23 |
| Beanspruchung                      | 24 |
| Spannung                           | 25 |
| Stabilität                         | 26 |
| Festigkeit                         | 26 |
| Unsichtbar gleich leicht?          | 30 |
| Fest und zugleich leicht?          | 31 |
| Statik                             | 32 |

DAS RELATIV LEICHTE

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Der Transport von Massen und Kräften | 38 |
| Hindernisse                          | 41 |
| Der maximale Tra                     | 43 |
| Der Verformungs-Tra                  | 43 |
| Der Eigengewichts-Tra                | 43 |
| Der Nutzlast-Tra                     | 44 |
| Der äußere und der innere Tra        | 44 |

BIC und  $\lambda$

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Über den Bic                     | 46 |
| Zum Namen 'Bic'                  | 48 |
| Die verschiedenen Bic            | 50 |
| Der Normalbic                    | 51 |
| Ähnlichkeit                      | 53 |
| Proportionen                     | 54 |
| Schlankheit                      | 54 |
| Material und Bic                 | 59 |
| Überblick                        | 60 |
| Das Bic- $\lambda$ -Diagramm     | 62 |
| Nutzlast-Bic                     | 62 |
| Kosten                           | 63 |
| Eigengewichtsbic und Grenzgrößen | 65 |
| Der Verformungsbic               | 68 |
| Verkehrsbic                      | 69 |
| Verbrauchte Biomasse             | 73 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Der Bic von Energieträgern     | 76 |
| Biomassebic                    | 77 |
| Biomasse je Masse              | 78 |
| Energie je Energie             | 78 |
| Zeit und Bewegung              | 79 |
| Leistungsgewicht von           | 81 |
| Motoren und Fahrzeugen         |    |
| Der totale Masseverbrauch      | 81 |
| bei Verkehrssystemen           |    |
| Lebensdauer                    | 82 |
| Elektrische Leitfähigkeit      | 83 |
| Wärme                          | 83 |
| Wärmedämmung                   | 83 |
| Schall                         | 84 |
| Beschleunigung und Sprungkraft | 84 |
| Kosten und Biomasse            | 85 |
| Energie und Volkswirtschaft    | 86 |

DAS BIC- $\lambda$ -DIAGRAMM

|  |    |
|--|----|
| Das große Bic- $\lambda$ -Diagramm     | 90 |
| Schwächen und Stärken dieses Diagramms | 92 |
| Untersuchungen zur Bestimmung des Bic  | 93 |

DER ZUGBELASTETE BEREICH

|   |     |
|---|-----|
| Zugbelastete Stäbe                                  | 96  |
| Der gezogene Holzstab                               | 98  |
| Belastungsgrenzen bei lebenden Objekten             | 101 |
| Zugbeanspruchung durch Eigengewicht, Reisslänge     | 103 |
| Zugbeanspruchte Flächen unter einachsiger Belastung | 105 |
| Flächen unter zweiachsiger Belastung                | 106 |
| Einzelprogramme: ZUG                                | 108 |
| Verformungsbic                                      | 116 |

DER DRUCKBELASTETE BEREICH

|   |     |
|---|-----|
| Der Bic bei Druckbelastung                    | 120 |
| Einachsiger Druck                             | 120 |
| Plumpe Objekte unter der Materialprüfmaschine | 122 |
| Die Untersuchung mit dem Druckrahmen          | 123 |
| Grenzhöhen                                    | 125 |
| Einzelprogramme: DRUCK                        | 126 |

DER BIEGEBELASTETE BEREICH

|   |     |
|---|-----|
| Der Bic bei Biegung   | 136 |
| Tra und Bic bei Biegung   | 138 |
| Der eingespannte Stab   | 139 |
| Versuchsdurchführung  | 139 |
| Biegung einseitig eingespannter Stäbe unter gleichmäßig verteilter Last | 140 |
| Einzelprogramme: BIEGUNG  | 141 |
| Biegebelastete Pneus  | 142 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Verschiedene Materialbic | 143 |
| Der Bic von Brücken      | 144 |
| Der Bic im Verkehr       | 146 |

LEICHTER MACHEN

|  |     |
|--|-----|
| Technik des Menschen                                   | 152 |
| Das Werden technischer Produkte                        | 154 |
| Erfindung, Entwicklung, Erprobung                      | 155 |
| Materialentwicklung                                    | 156 |
| Formbarkeit  | 161 |
| Verstärken und Ausmagern                               | 162 |
| Fügen  | 163 |
| Rechnerische Optimierung                               | 164 |
| Das Optimieren mit Hilfe von Trajektorien              | 166 |
| Die Optimierung mit Bic und Tra                        | 167 |
| Formoptimierung  | 168 |
| Das Modell   | 170 |
| Das Planen   | 171 |
| Vielfunktionales                                       | 172 |
| Das Vermeiden  | 173 |
| Das Optimieren von und mit Wegenetzen                  | 174 |
| Abiotische Selbstbildungsprozesse in Natur und Technik | 175 |
| Leichtbau in der lebenden Natur                        | 183 |
| Natürliche Pneus                                       | 187 |
| Leichtbau in der toten Natur                           | 191 |
| Leichtbau in der Technik der Tiere                     | 192 |
| Zum Vorbild Natur                                      | 193 |
| Das Prinzip Leichtbau in der Geschichte                | 198 |

KONSTRUIEREN UND OPTIMIEREN MIT TRA UND BIC

|  |     |
|--|-----|
| Das Optimieren mit TRA und BIC                       | 202 |
| Die Masse einer Konstruktion                         | 202 |
| Die Optimierung von Wegenetzen                       | 204 |
| Wegesysteme  | 206 |
| Das generative minimalisierte Umwegesystem           | 210 |
| Das Optimieren von einfachen Stabwerkskonstruktionen | 211 |
| Die Optimierung von Stäben unter Lasten              | 214 |
| Der $T_r$ -Wert ebener Fachwerke                     | 222 |
| Der Balken unter Gleichlast                          | 224 |
| Lasten in einer 'Schlucht'                           | 226 |
| Pneus  | 228 |
| Umkehrkonstruktionen                                 | 241 |
| Minimalflächen und Minimalnetze                      | 243 |

ANHANG

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>Rolf Reiner</b>                    |     |
| Der Bic von Atomen und Molekülen      | 255 |
| <b>Eberhard Haug</b>                  |     |
| Aufwandsermittlung von Konstruktionen | 267 |

|   |    |  |     |  |     |
|---|----|--|-----|--|-----|
| PREFACE                                 |    | The bio-mass Bic   | 77  | The Bic of bridges   | 144 |
| Remarks on how this work came about     | 7  | Bio mass per mass  | 78  | Bic in traffic   | 146 |
| WHAT IS LIGHTWEIGHT?                    |    | Energy per Energy  | 78  |  |     |
| Introduction                            | 11 | Time and movement  | 79  | TO MAKE THINGS LIGHTER                                       |     |
| Heavy and lightweight                   | 14 | Performance weight of engines and vehicles                             | 81  | Man-made technology  | 152 |
| Mass and weight                         | 14 | Total mass consumption in traffic systems                              | 81  | The emergence of technical products                          | 154 |
| Large and lightweight                   | 15 | Life span  | 82  | Invention, development, testing                              | 155 |
| It is useful to be light                | 16 | Electric conductivity  | 83  | Material development   | 156 |
| Absolute weight                         | 17 | Heat   | 83  | Formability  | 161 |
| Longitudinal weight                     | 17 | Thermal insulation   | 83  | Reinforcing and slimming                                     | 162 |
| Weight per unit area                    | 17 | Sound  | 84  | Joining  | 163 |
| Density                                 | 18 | Acceleration and take-off power  | 84  | Arithmetical optimisation                                    | 164 |
| Force                                   | 18 | Costs and bio mass   | 85  | Optimisation with the help of trajectories                   | 166 |
| The Compression                         | 20 | Energy and national economy  | 86  | Optimisation via Bic and Tra                                 | 167 |
| The Load                                | 20 |  |     | Optimising of form   | 168 |
| Dead Load                               | 22 | THE BIC- $\lambda$ -DIAGRAM  |     | The model  | 170 |
| Failure Load                            | 23 | The major Bic- $\lambda$ -Diagram                                      | 90  | Planning   | 171 |
| Stresses                                | 24 | Weaknesses and strengths of the diagram                                | 92  | Multi-functionals  | 172 |
| Stress                                  | 25 | Investigations for determining the Bic                                 | 93  | Avoidance  | 173 |
| Stability                               | 25 |  |     | Optimising of and by road networks                           | 174 |
| Strength                                | 26 | THE SPHERE OF TENSILE LOADS  |     | Abiotic automatic forming processes in nature and technology | 175 |
| Invisible = Lightweight                 | 30 | Tensile-loaded sticks  | 96  | Lightweight constr. in living nature                         | 183 |
| Solid and at the same time lightweight? | 31 | The pulled wooden stick  | 99  | Natural Pneus  | 187 |
| Statics                                 | 32 | Load limits in living objects  | 101 | Lightweight constr. in inanimate nature                      | 191 |
| THE RELATIVE LIGHTWEIGHT                |    | Tensile Stresses by dead load, tearing length                          | 103 | Lightweight constructions in the techniques of animals       | 192 |
| Transportation of Masses and Forces     | 38 | Tensile-Stressed surfaces under one-axial loads                        | 105 | On nature, the model   | 193 |
| Obstacles                               | 41 | Surfaces under two-axial loads   | 106 | The lightweight principle in history                         | 198 |
| Maximum Tra                             | 43 | Single diagrams: TENSILE STRESS  | 108 | CONSTRUCTIONAL DESIGNING AND OPTIMISING WITH TRA AND BIC     |     |
| Deforming Tra                           | 43 | Deformation Bic  | 116 | To optimise with Tra and Bic                                 | 202 |
| Dead-Load Tra                           | 43 | COMPRESSIVE-LOADED SPHERE  |     | The mass of a construction                                   | 202 |
| Live-Load Tra                           | 44 | The Bic at compressive load  | 120 | Optimisation of road networks                                | 204 |
| Outer and Inner Tra                     | 44 | One-axial compression  | 120 | Road systems   | 206 |
| BIC and $\lambda$                       |    | Plump objects in the material testing machine                          | 122 | The generative minimalised detour system                     | 210 |
| Notes about the Bic                     | 46 | Tests with the compression frame                                       | 123 | Optimisation of simple bar constructions                     | 211 |
| The term 'Bic'                          | 48 | Maximum height   | 125 | The optimisation of bars under load                          | 214 |
| The different Bic-values                | 50 | Single diagrams: COMPRESSION   | 126 | The $T_r$ -value of even timbering constr.                   | 222 |
| The normal Bic                          | 51 | THE BENDING-LOADED SPHERE  |     | The beam under a continuous load                             | 224 |
| Similarity                              | 53 | The Bic in bending   | 136 | Loads in a 'Gorge'   | 226 |
| Proportions                             | 54 | Tra and Bic in bending   | 138 | Pneus  | 228 |
| Slenderness                             | 54 | The fitted stick   | 139 | Reverse constructions  | 241 |
| Material and Bic                        | 59 | The experiment   | 139 | Minimal surfaces and minimal networks                        | 243 |
| An overview                             | 60 | Bending of unilaterally fitted sticks under an evenly distributed load | 140 | ANNEX  |     |
| The Bic- $\lambda$ -Diagram             | 62 | Single diagrams: BENDING LOAD  | 141 | <b>Rolf Reiner</b>   |     |
| The life-load Bic                       | 62 | Bending-loaded pneus   | 142 | The Bic of Atoms and Molecules                               | 255 |
| Costs                                   | 63 | Bic values of different materials                                      | 143 | <b>Eberhard Haug</b>   |     |
| Dead-load Bic and ultimate values       | 65 |  |     | Determining the input for constructions                      | 267 |
| The deformation Bic                     | 68 |  |     |  |     |
| The traffic Bic                         | 69 |  |     |  |     |
| Consumed bio mass                       | 73 |  |     |  |     |
| The Bic of energy sources               | 76 |  |     |  |     |