

# FORTSCHRITTLICHE VISUALISIERUNGSMETHODEN IM INGENIEURWESEN

DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DES DOKTORGRADES  
DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

AN DER  
FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEURWESEN  
DER  
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ

VORGELEGT VON  
GERNOT OPIESSNIG

JULI 2000

*ERSTBEGUTACHTER*  
O.UNIV.-PROF. DIPL.-ING. DR. TECHN. GERNOT BEER  
INSTITUT FÜR BAUSTATIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

*ZWEITBEGUTACHTER*  
PROF. DR.-ING. STEFAN M. HOLZER  
INSTITUT FÜR INFORMATIONSVERARBEITUNG IM KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU  
UNIVERSITÄT STUTTGART

**BIBLIOTHEK**  
für Statik, Stahlbau  
und Werkstoffmechanik  
TU-Darmstadt, FB 13  
Alexanderstraße 7  
64283 Darmstadt

**BIBLIOTHEK**  
Konstruktiver Ingenieurbau  
TU Darmstadt, FB 13  
Petersenstraße 12  
64287 Darmstadt

# INHALT

---

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
----------	------------------------	----------

---

1.1	MOTIVATION – AUFGABENSTELLUNG .....	1
-----	-------------------------------------	---

1.2	GRUNDSÄTZLICHE GEDANKEN ZUM THEMA „VISUALISIERUNG“ .....	2
-----	--	---

1.3	GLIEDERUNG .....	7
-----	------------------	---

---

<b>2</b>	<b>STATE OF THE ART .....</b>	<b>9</b>
----------	-------------------------------	----------

---

2.1	ÜBERBLICK ÜBER DIE VORHANDENEN SYSTEME .....	9
-----	--	---

2.2	WAS IST VERBESSERUNGSWÜRDIG? .....	16
-----	------------------------------------	----

---

<b>3</b>	<b>WELCHE DATEN SOLLEN VISUALISIERT WERDEN?.....</b>	<b>18</b>
----------	--	-----------

---

3.1	ALLGEMEINE BETRACHTUNGEN .....	18
-----	--------------------------------	----

3.2	DATEN VON NUMERISCHEN BERECHNUNGEN .....	19
-----	--	----

3.2.1	Ergebnisdaten.....	20
-------	--------------------	----

3.2.1.1	<i>Verformungen</i> .....	20
---------	---------------------------	----

3.2.1.2	<i>Spannungen</i> .....	20
---------	-------------------------	----

---

**4 DIE DATENBASIS ..... 25**

---

<b>4.1 MÖGLICHKEITEN DER TOPOLOGISCHEN MODELLIERUNG.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.1 Direkte Darstellungsschemata – Volumenmodellierung.....</b>	<b>25</b>
4.1.1.1 Normzellen-Aufzählschema.....	25
4.1.1.2 Zellzerlegungsschema.....	25
4.1.1.3 Oktalbäume (Octrees).....	26
4.1.1.4 CSG-Schema.....	27
4.1.1.5 Primitiven-Instantiierung.....	27
4.1.1.6 Verschiebegeometrieschema.....	27
4.1.1.7 Interpolationsschema.....	28
<b>4.1.2 Indirekte Darstellungsschemata: Kanten- und Oberflächenmodellierung .....</b>	<b>28</b>
4.1.2.1 Drahtmodellschema.....	28
4.1.2.2 Oberflächendarstellung.....	28
<b>4.1.3 Hybridschema.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 EIGENSCHAFTEN VON DATEN AUS NUMERISCHEN BERECHNUNGEN .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.1 Geometriedaten für Berechnungen mit Finiten Elementen .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2 Geometriedaten für Berechnungen mit Randelementen .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 GEOMETRIEDATENKONVERSION BEFE-TVS .....</b>	<b>31</b>
4.3.1 Allgemeines .....	31
4.3.2 Reduktion der Elementordnung .....	32
4.3.3 Sichtbarkeit.....	32

<b>4.4</b>	<b>ERGEBNISDATEN.....</b>	<b>36</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Spezielle Eigenschaften von FE-Daten – Resultierende Probleme... 36</b>	<b>36</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Global Smoothing Algorithmus.....</b>	<b>39</b>
4.4.2.1	<i>Prinzipielle Anforderungen an den Algorithmus.....</i>	40
4.4.2.2	<i>Auswahl des Rechenverfahrens.....</i>	41
4.4.2.3	<i>Parameterstudien.....</i>	44
4.4.2.4	<i>Anwendung.....</i>	52
4.4.2.5	<i>Optimierungsstrategien.....</i>	54
<b>4.4.3</b>	<b>Interfacedatenformat .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5</b>	<b>MEBERGEBNISSE.....</b>	<b>57</b>
<b>4.6</b>	<b>GENERIERUNG EINES 3D-MODELLS AUS 2D-DATEN – VERSCHNEIDUNGEN ....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.1</b>	<b>Geologische Erkundungen.....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Die Tunnelgeometrie .....</b>	<b>60</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Geologische Informationen aus Ortsbrustbildern .....</b>	<b>63</b>

---

## 5 PHOTOREALISTISCHE VISUALISIERUNG GEOMETRISCHER OBJEKTE .. 64

---

5.1	GRUNDLEGENDES ÜBER OPENGL .....	64
5.2	PROJEKTION .....	65
5.2.1	Perspektivische (Zentral-) Projektion .....	65
5.2.2	Rechtwinklige (Parallel-) Projektion .....	66
5.3	VOM NETZ ZUM DREIDIMENSIONALEN BILD – SICHTBARKEIT .....	66
5.3.1	Dreidimensionales Clipping am Sichtvolumen .....	67
5.3.2	Elimination verdeckter Flächen .....	67
5.4	FARBMODELLE .....	69
5.4.1	Allgemeines .....	96
5.4.2	RGB-Modell .....	71
5.4.3	CMY-Modell .....	71
5.4.4	CMYK-Modell .....	72
5.4.5	YIQ-Modell .....	72
5.4.6	HSV-Modell .....	73
5.4.7	HLS-Modell .....	73
5.4.8	CNS-Modell .....	73
5.5	BELEUCHTUNGSMODELLE .....	74
5.5.1	Ambientes Licht .....	74
5.5.2	Punktförmiges Licht bei diffuser Reflexion .....	74
5.5.3	Spiegelnde Reflexion .....	74
5.5.4	Realisierung von Lichteffekten .....	75
5.6	TEXTUREN .....	78

5.7	VERBESSERUNG DER DARSTELLUNGSQUALITÄT .....	81
5.7.1	Interpolation bei Elementen mit quadratischem Verformungsansatz .....	81
5.7.2	Berechnung zusätzlicher Oberflächenpunkte .....	83
5.7.3	Verzerrung der Geometrie .....	84
5.7.4	Optimierung der Bildrefreshrate .....	84
5.8	2D-SCHNITTE .....	85
5.9	ANIMATIONEN .....	87

---

## 6 ECHTZEITNAVIGATION IN GEOMETRISCHEN MODELLEN .....

---

6.1	DAS USER INTERFACE .....	88
6.1.1	Die Bedienungselemente.....	88
6.2	NAVIGATION MIT DEM SPACEBALL .....	90
6.2.1	Koordinatentransformation .....	91
6.2.2	Ballistische Koordinatentransformation .....	92
6.3	STEREO VIEWING.....	93
6.3.1	Hardwarekomponenten zum dreidimensionalen Sehen .....	93
6.4	HEADTRACKING.....	95
6.5	CAVE.....	96

---

**7 DARSTELLUNG VON SIMULATIONS- ODER MEBDATEN..... 98**

---

<b>7.1</b>	<b>SKALARE OBERFLÄCHENRESULTATE .....</b>	<b>98</b>
<b>7.2</b>	<b>RESULTATSKALIERUNG .....</b>	<b>101</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Definition des darzustellenden Wertebereiches .....</b>	<b>101</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Verstärkung/Abschwächung.....</b>	<b>102</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Nichtlineare Skalierung .....</b>	<b>103</b>
<b>7.3</b>	<b>INNERE RESULTATE.....</b>	<b>105</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Nebeldarstellung von Skalarwerten.....</b>	<b>106</b>
<i>7.3.1.1</i>	<i>Idee.....</i>	<i>106</i>
<i>7.3.1.2</i>	<i>Realisierung.....</i>	<i>107</i>
<i>7.3.1.3</i>	<i>Theoretische Grundlagen.....</i>	<i>110</i>
<i>7.3.1.4</i>	<i>Realisierung.....</i>	<i>111</i>
<b>7.3.2</b>	<b>Darstellung von vektoriellen Größen .....</b>	<b>112</b>
<b>7.3.3</b>	<b>Darstellung von tensoriellen Größen .....</b>	<b>115</b>
<b>7.4</b>	<b>2D-SCHNITTE VON 3D-RESULTATEN.....</b>	<b>115</b>
<b>7.4.1</b>	<b>Projektion von Skalarwerten in eine beliebige Ebene .....</b>	<b>115</b>
<b>7.4.2</b>	<b>Projektion von vektoriellen Größen in eine beliebige Ebene.....</b>	<b>127</b>
<b>7.4.3</b>	<b>Interface Tractions .....</b>	<b>118</b>

---

**8 ZUSAMMENFASSUNG ..... 119**

---

---

**9 ZUKUNFTSAUSSICHTEN..... 122**

---

---

**10 LITERATUR ..... 123**

---

## ANHANG

---

<b>A ENTWICKLUNGSUMGEBUNG .....</b>	<b>129</b>
-------------------------------------	------------

---

<b>A.1 VERWENDETE HARDWARE – STÄRKEN UND SCHWÄCHEN.....</b>	<b>129</b>
<b>A.2 SOFTWARE DEVELOPER TOOLS .....</b>	<b>132</b>
<b>A.2.1 RapidApp.....</b>	<b>133</b>
<b>A.2.2 Debugger und Performance Analyser – ProDev/WorkShop.....</b>	<b>137</b>

---

<b>B ELEMENTTYPEN .....</b>	<b>140</b>
-----------------------------	------------

---

<b>B.1 FORMFUNKTIONEN .....</b>	<b>140</b>
<b>B.2 LINEARES VIERECKELEMENT .....</b>	<b>143</b>
<b>B.3 PARABOLISCHES VIERECKELEMENT .....</b>	<b>145</b>
<b>B.4 INFINITES ELEMENT.....</b>	<b>148</b>
<b>B.5 LINEARES BRICK ELEMENT .....</b>	<b>149</b>
<b>B.6 PARABOLISCHES BRICK ELEMEMENT.....</b>	<b>151</b>
<b>B.7 INFINITES BRICK ELEMENT .....</b>	<b>152</b>
<b>B.8 SHELL ELEMENT .....</b>	<b>153</b>
<b>B.9 JOINT ELEMENT .....</b>	<b>153</b>

---

<b>C BILDER .....</b>	<b>154</b>
-----------------------	------------

---