

# Konstruktionssystematik zur Entwicklung hochfester, lokal angepasster Strukturen mit Hilfe des Finite Elemente Design

Bessling, S.; Echtermeyer, P.; Stahr, K.

*Dem Konstrukteur steht eine Vielzahl von Werkstoffen zur Funktionserfüllung zur Verfügung. In einfachen Anwendungsfällen ist es häufig ausreichend, das gesamte Bauteil „monolithisch“ aus einem Werkstoff herzustellen. Konkurrierende, teilweise widersprüchliche Anforderungen an ein Bauteil erschweren jedoch häufig die Werkstoffauswahl. Zudem gelten bestimmte Anforderungen zum Teil nur für lokal begrenzte Bereiche eines Bauteiles. Somit ist eine funktionsorientierte Anwendung unterschiedlicher Werkstoffe erforderlich, die Bestandteil der Strategie des Multi-Material-Designs ist. Das Potenzial unterschiedlicher Werkstoffe lässt sich in der Praxis am effektivsten nutzen, wenn diesbezügliches Wissen dem Konstrukteur bereits frühzeitig im Konstruktionsprozess zur Verfügung steht*



*A multiplicity of materials is available to the technical designer for the function fulfilment. In simple applications it is mostly sufficient to design the entire construction unit „monolithically“ of a single material. Competitive, partial contradictory requirements to a construction unit often makes the selection of materials even more difficult. Besides certain requirements are only partially valid for locally limited ranges of a construction unit. Thus a function-oriented application of different materials is necessary, which is a fundamental part of the multi-material-design-strategy. The potential of different materials can be used in practice most effectively if relevant knowledge is already available to the technical designer in an early phase of the construction process.*

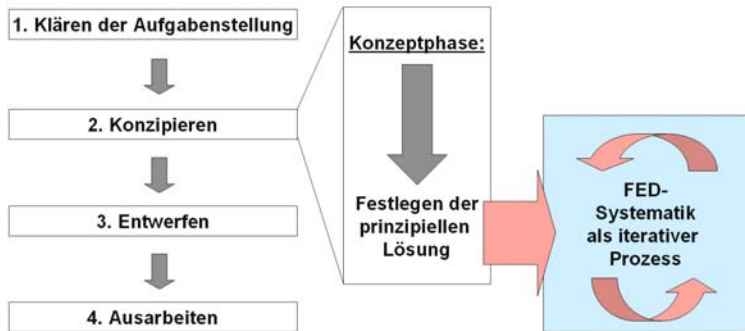
## 1 Einleitung

Insbesondere lokal eigenschaftsveränderte Werkstoffe erfordern eine enge Kopplung von Werkstoffauswahl, Konstruktion und Fertigung zur vollständigen Ausnutzung ihres Potenzials. Durch die derzeit relativ späte Berücksichtigung von Werkstoff und Fertigungsverfahren in konstruktionsmethodischen Vorgehensweisen nach bspw. VDI 2221 /6/, Roth /7/, Pahl /8/, Koller /9/ und Rodenacker /10/ kann das Werkstoffpotenzial oftmals nicht optimal ausgenutzt werden.

Durch die Auswahl von Werkstoffen und Werkstoffpaarungen aufgrund lokaler Beanspruchungen innerhalb eines Multi-Material-Designs, können innerhalb einer Konstruktion große Kosten-Gewichtseinsparungs-Effekte realisiert werden /1/. Hierfür sind jedoch systematische Ansätze erforderlich, die eine ganzheitliche Betrachtung von Konstruktion, Werkstoffeigenschaften und Fertigung gewährleisten /2/. Bisher sind keine Ansätze aus der Literatur bekannt, bei der diese Aspekte gleichzeitig in einer Konstruktionssystematik berücksichtigt werden.

Mit Hilfe des „Finite Elemente Design“ (FED) wurde ein konstruktions-systematisches Vorgehen zur Entwicklung hochfester, lokal angepasster Strukturen entwickelt, /3/. Die gesamte Bauteilstruktur wird hierbei in lokal abgegrenzte (finite) Teilstrukturen (Elemente) zerlegt, die hinsichtlich Ihrer Anforderungen eingeteilt werden. Anders als bei der „Finite-Elemente-Methode“ (FEM) erfolgt keine numerische Bestimmung von Bauteilbeanspruchungen, vielmehr die bestmögliche Identifizierung eines Werkstoffes sowie Fertigungsverfahrens unter Berücksichtigung der lokalen Anforderungen an die finiten Elemente.

Ausgangspunkt für die FED-Konstruktionssystematik ist die zweite Phase des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221. Die innerhalb der Konzeptphase definierte prinzipielle Lösung bildet die Grundlage für eine FED-Konstruktionssystematik, die als iterativer Prozess parallel zum konstruktions-systematischen Ablaufplan erfolgt, **Bild 1**.



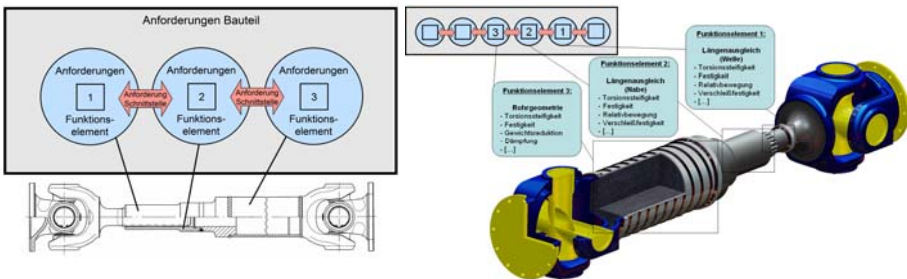
**Bild 1** Einbindung der FED-Systematik in die Konzeptphase nach VDI 2221

## 2 FED-Konstruktionssystematik

Grundbestandteil der FED-Konstruktionssystematik ist die Differenzierung der prinzipiellen Lösung in Bereiche verschiedener Funktionen. Aus diesen Funktionen werden im weiteren Verlauf Anforderungen abgeleitet. Diese können auf das gesamte Bauteil, aber auch auf Funktionselemente und Schnittstellen, wie sie innerhalb der FED-Konstruktionssystematik definiert werden, bezogen sein.

### 2.1 Bauteilstrukturierung

Die Betrachtung orts aufgelöster Anforderungen zur Zuordnung orts aufgelöster Werkstoffeigenschaften erfordert eine Strukturierung des gesamten Bauteils. Ausgehend vom Bauteil erfolgt eine Differenzierung in Funktionselemente und Schnittstellen. Funktionselemente stellen hierbei Bereiche des Bauteils dar, die durch spezifische Anforderungen gekennzeichnet sind. Schnittstellen dienen dazu, den Zusammenhang der Funktionselemente zueinander zu beschreiben.



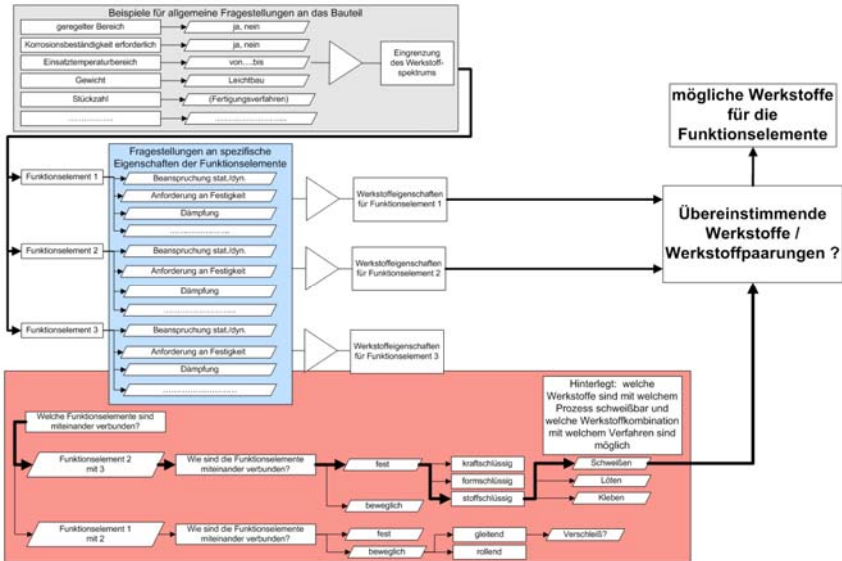
**Bild 2** Strukturierung der Lösungsvariante in Gesamtbauteil, Funktionselemente und Schnittstellen

Ein Ausschnitt des Gesamtbauteils ist in diesem Fall in die Funktionselemente 1, 2 und 3 eingeteilt, jedes Funktionselement für sich ist dabei durch spezifische Anforderungen gekennzeichnet. Die zu gewährleistende Relativbewegung des Längenausgleiches (Funktionselemente 1 und 2) wird durch eine Schnittstelle beschrieben. Mit der Schnittstelle werden beispielsweise Anforderungen an den Verschleiß und die damit verbundenen orts aufgelösten notwendigen Werkstoffeigenschaften dargestellt. Die Betrachtung der Schnittstelle zwischen Funktionselement 2 und 3 bedingt eine stoffschlüssige Verbindung.

Hier werden innerhalb der Schnittstellendefinition Werkstoffeigenschaften betrachtet, die im engen Zusammenhang mit dem Fügeprozess und den daraus resultierenden Verbindungseigenschaften stehen.

### 2.2 Werkstoffauswahl

Die zuvor beschriebene Bauteilstrukturierung in Funktionselemente und Schnittstellen bietet Grundlage für die Werkstoffauswahl innerhalb der FED-Konstruktionssystematik. Mit Hilfe gezielter Fragestellungen an das gesamte Bauteil, die Funktionselemente sowie Schnittstellen werden ortsaufgelöste Anforderungsmatrizen definiert. **Bild 3** stellt den Ablauf der Werkstoffauswahl anhand gezielter Fragestellungen schematisch dar. Den Anforderungsmatrizen können indirekt aber auch direkt notwendige Werkstoffeigenschaften zugeordnet werden. Aus den für die einzelnen Bereiche ermittelten notwendigen Werkstoffeigenschaften erfolgt die Einschränkung des gesamten Werkstoffspektrums. Die Fragestellungen an das gesamte Bauteil sind allgemeiner Art und folgen beispielsweise aus den Restriktionen der Anforderungsliste (z.B. Temperatureinsatzbereich).



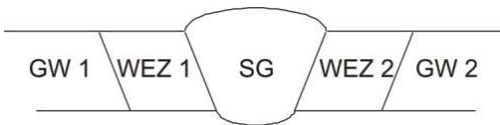
**Bild 3** Schematischer Ablauf der FED-Konstruktionssystematik /4/

Einzelne Funktionselemente sind durch ihre spezifischen Anforderungen nur begrenzt beschreibbar. Erhöht sich der Detaillierungsgrad eines Funktionselementes, so sind nur wenige unterschiedliche Fragestellungen formulierbar um eine Werkstoffauswahl zu konkretisieren. Erst die Schnittstellenbetrachtung der Funktionselemente erlaubt eine weitere weitaus größere Einschränkung potentieller Werkstoffe.

Mit Hilfe gezielter Fragestellungen werden über die Schnittstellen die Zusammenhänge der Funktionselemente festgelegt. So sind die Funktionselemente 2 und 3 beispielsweise durch den stoffschlüssigen Prozess des Schweißens verbunden. In diesem Zusammenhang ist in der FED-Konstruktionssystematik hinterlegt, mit welchem Prozess und Prozessparametern welche Eigenschaften erzielt werden können.

### 3 Orstaufgelöste Werkstoffeigenschaften

Aus der Untergliederung des Bauteils in Funktionselemente und Schnittstellen ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten zur ortsaufgelösten Betrachtung von Werkstoffeigenschaften. Anhand ausgewählter geschweißter Mischverbindungen werden Untersuchungen durchgeführt die zur Ermittlung von ortsaufgelösten Werkstoffeigenschaften dienen. Zur lokal aufgelösten Betrachtung wird die Schweißnaht in ein Mehr-Zonen-Modell untergliedert, **Bild 4**.



**Bild 4** 5-Zonen-Modell einer Schmelzschweißverbindung

Innerhalb des 5-Zonen-Modells sind die Bereiche Grundwerkstoff (GW) 1 und 2, Wärmeeinflusszone (WEZ) 1 und 2 und das Schweißgut (SG) dargestellt. Im ersten Schritt wurden zunächst nur die Eigenschaften Gefüge, Härte und Dehnungsverhalten betrachtet und ortsaufgelöst den Bereichen zugeordnet.

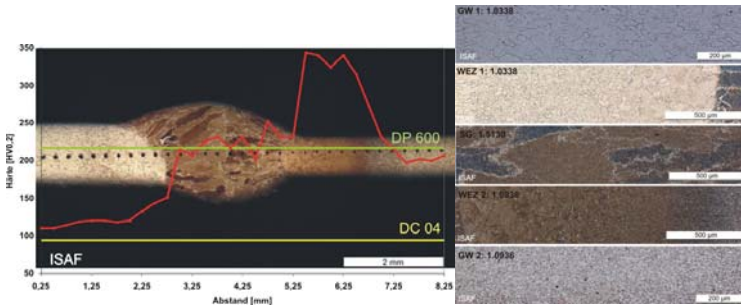
## **4 Betrachtete Werkstoffe und Gerätetechnik zur Bestimmung ortsaufgelöster Werkstoffeigenschaften**

Die Ermittlung von ortsaufgelösten Werkstoffeigenschaften erfolgte zunächst an ausgewählten Platinen aus den Werkstoffpaarungen 1.0338 (DC04) und 1.0936 (DP600). Die Blechdicken wurden mit 1,5 mm (1.0338) und 1 mm (1.0936) ausgewählt. Verschweißt wurden die Platinen mit einem handelsüblichen Schweißzusatzwerkstoff 1.5130 (SG3) mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm. Geschweißt wurde mit einem MSG Schweißgerät und einem Schutzgasgemisch aus 85% Argon und 15% Kohlendioxid. Zur Charakterisierung der Verbindungszone mit ihren spezifischen Eigenschaften wurden Härteverläufe über dem Schweißnahtbereich sowie lichtmikroskopische Gefügeanalysen an Schliffproben durchgeführt. Mit Hilfe der laseroptischen Dehnungsmessung (ESPI) wurde das Dehnungsverhalten im Schweißnahtbereich an gefügten Flachzugproben mit Quernähten ermittelt. Am Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren steht hierfür ein laseroptischer Dehnungssensor vom Typ Q-100 der Dantec Dynamics GmbH zur Verfügung. Der Messbereich wird mit infraroter Laserstrahlung beleuchtet. Die von der Objekt-oberfläche reflektierten Lichtwellen führen zur Ausbildung eines so genannten Speckle-Muster, das von einer hochauflösenden Kamera aufgenommen wird. Infolge der Verformung der Flachzugprobe während des Zugversuches und der daraus folgenden Änderung der Oberfläche treten Unterschiede am Speckle-Muster auf, die wiederum Rückschluss auf die Dehnungen quantitativ ermöglichen, /5/. Durch den aufeinanderfolgenden Vergleich von verformtem Zustand zu dem vorhergehenden Zustand bildet sich ein Verformungsfeld über dem untersuchten Messbereich aus. Ziel dieser Untersuchungen ist die ortsaufgelöste Beschreibung des Elastizitätsmoduls auf Grundlage der ortsaufgelösten Dehnung.

### **4.1 Untersuchungsergebnisse**

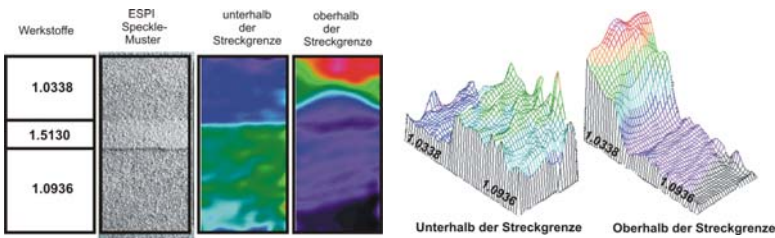
Die ortsaufgelöste Charakterisierung der Verbindungszone mit ihren charakteristischen Eigenschaften erfolgt durch den Härteverlauf und die Gefügeanalyse. Mit Hilfe der lichtmikroskopischen Aufnahmen im Zusammenhang mit dem Härteverlauf ist die Einteilung der Schweißnaht in das oben erwähnte 5-Zonen-Modell möglich.

In Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe, Schweißzusatzwerkstoffe und Prozessparameter stellt sich je nach Zone ein anderes Eigenschaftsprofil ein, **Bild 5**.



**Bild 5** Härteprofil und Gefügebestandteile der Werkstoffpaarung 1.0338-1.0936 mit dem Schweißzusatzwerkstoff 1.5130

Charakteristisch für die Werkstoffpaarung 1.0338-1.0936 ist das in **Bild 6** dargestellte Härtemaximum im wärmebeeinflussten Bereich des 1.0936. Das Schweißgut 1.5130 erreicht ähnliche Härtewerte wie der Grundwerkstoff 1.0936. Mit zunehmendem Abstand von der Schweißnaht sinkt das Härteprofil des 1.0338 auf Grundwerkstoffniveau ab. Ausgehend von der lichtmikroskopischen Analyse werden die Gefügebestandteile der Schweißverbindung sowie der Grundwerkstoffe als weitere Werkstoffeigenschaften dem 5-Zonen-Modell zugeordnet. Der Grundwerkstoff 1 (1.0338) ist geprägt von seiner ferritischen Gefügestruktur. Der wärmebeeinflusste Bereich des 1.0338 zeigt ähnlich wie andere niedriglegierte Stähle ein ferritisches Feinkorngefüge, was in Richtung der Schweißnaht in eine Grobkornzone übergeht. Die perlitische Gusstruktur ist typisch für das Schweißgut des 1.5130. Ähnlich wie die Wärmeeinflusszone des 1.0338 grenzt an das Schweißgut im Bereich der Wärmeeinflusszone des 1.0936 ein grobkörniges Gefüge, welches mit zunehmendem Abstand feinere Struktur annimmt. Die Gefügebestandteile sind hier martensitisch mit Bestandteilen von Zwischenstufe. Der Grundwerkstoff 2 zeigt ein ferritisches Gefüge mit inselförmig angeordnetem Martensit, was wiederum spezifisch für den Dualphasenstahl 1.0936 ist.



**Bild 6** Qualitativer Dehnungsverlauf 2D-Darstellung \ 3D Darstellung

Eine weitere Möglichkeit der ortsaufgelösten Betrachtung von Werkstoffeigenschaften bietet die laseroptische Dehnungsmessung mittels ESPI. Untersucht wurde zunächst das qualitative Dehnungsverhalten der Schweißverbindung oberhalb sowie unterhalb der Streckgrenze des niedrigfesten Werkstoffbereichs. **Bild 6** rechts stellt den qualitativen Dehnungsverlauf der untersuchten Werkstoffpaarung dar. Unterhalb der Streckgrenze des niedrigfesten Werkstoffs ist eine gleichmäßige Dehnung im Grundwerkstoff 1.0338 (1,5 mm) erkennbar. Die Schweißnaht (1,5 mm) verhält sich ähnlich wie der Grundwerkstoff 1.0936 (1 mm). Wird die Auswertung der ESPI Messergebnisse oberhalb der Streckgrenze des niedrigfesten Werkstoffs durchgeführt, so ist im Bereich des Grundwerkstoffs 1.0338 eine zunehmende Dehnung zu erkennen. Besonders deutlich sind hier die Scherbänder bei etwa 45° zur Zugrichtung zu identifizieren. Nahezu die gesamte Verformung der Werkstoffkombination und auch der Bruch erfolgen im niedrigfesten Werkstoff 1.0338. Gut zu erkennen ist das unterschiedliche Dehnungsverhalten der verschweißten Grundwerkstoffe im Zusammenhang mit der Schweißnaht.

Bei der Auswertung der ESPI Messergebnisse muss die unterschiedliche Blechdicke der verschweißten Platinen beachtet werden, vgl. **Bild 6**. Entgegen **Bild 5** wurde die Schweißnaht zusätzlich auf eine Dicke von 1,5 mm abgearbeitet. Dies gewährleistet einen gleichmäßigen Dehnungsverlauf über die Schweißnaht.

## 5 Zusammenfassung

Die Berücksichtigung lokal eigenschaftseingestellter Materialien im Zusammenhang mit fertigungstechnischen Randbedingungen kann im Bereich des systematischen Konstruierens nur Anwendung finden, wenn hierfür ein konstruktionsmethodisches Vorgehen vorhanden ist. Mit Hilfe des Finite Elemente Design soll die Möglichkeit gegeben werden, durch ortsaufgelöste Anforderungsmatrizen im Zusammenhang mit ortsaufgelösten Werkstoffeigenschaften die Potenziale örtlich eigenschaftsveränderter Werkstoffe gezielt auszunutzen. Durch die Einteilung des Bauteiles in Funktionselemente, mit definierbaren Anforderungen und der Bestimmung von Schnittstellen, die den Zusammenhang der Funktionselemente beschreiben, ist eine Möglichkeit gefunden, Rückschlüsse auf erforderliche ortsaufgelöste Werkstoffeigenschaften zu ziehen. Die beispielhafte Betrachtung und Untersuchung geschweißter Werkstoffkombinationen bietet hierfür modellhaft die Möglichkeit, gezielte Werkstoffeigenschaften sowohl metallurgisch als auch physikalisch und chemisch innerhalb des FED-Systems zu integrieren und zu verarbeiten. Der hohe Grad an kom-



plexer Information durch eine Vielzahl von Werkstoffen und daraus resultierenden Werkstoffeigenschaften bedingt eine softwaretechnische Unterstützung der FED-Systematik. Mit der Integration und Umsetzung von orts aufgelösten Werkstoffeigenschaften der anderen Teilprojekte des SFB 675 soll dem Konstrukteur in der Zukunft eine umfangreiche Konstruktionssystematik im Form des Finite Elemente Design zur Verfügung stehen, die das Potenzial von Werkstoff und Fertigungstechnologie optimal berücksichtigt.

Die Autoren möchten ihren Forschungskollegen des SFB 675 sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ihren Dank für die Unterstützung aussprechen.

## **6 Literatur**

- /1/ Meschut, G.; Goede, M.: Neue Werkstoff- und Bauweisenkonzepte im Fahrzeugbau – Herausforderungen für thermische und wärmearme Fügeverfahren; Fügen im Fahrzeugbau; Bb. 9. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 29. – 30.06.2004; S.37 – 48
- /2/ Fritzsche, C.; Schmidt, M.: Hochfrequenzschweißen – Stand und Anwendungen. Konferenz Einzelbericht DVS-Berichte, Band 213, 2001, Seite 87-92, DVS Verlag Düsseldorf
- /3/ Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wesling, V.: Design strategies for the development of high strength coupling elements from requirement optimized composite materials, Creation of High-Strength Structures and Joints by Setting up Local Material Properties, trans tech publications, Stafa-Zurich, 2007
- /4/ Lohrengel, A.; Bessling, S.; Stahr, K.; Wesling, V.; Echtermeyer, P.: Finite Elemente Design (FED) – a new approach for material and manufacturing based design rules, Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2009), The Internet, 2009, Whittles Publishing (Scotland) (2009)
- /5/ Schwetje, T.: Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Konturbauteilen. Clausthal-Zellerfeld, Technische Universität, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Diss., 2002
- /6/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf, 1993

- /7/ Roth, K.: Gliederung und Rahmen einer neuen Maschinen-, Geräte-Konstruktionslehre. *Feinwerktechnik* 72 (1968) S. 521 - 528
- /8/ Pahl, G., Beitz, W.: *Konstruktionslehre*, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer 1997
- /9/ Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer 1998
- /10/ Rodenacker, W.G.: *Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher Bd. 27*, 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer 1991  
Dietz, P.; Mitarbeiter, X.: *Institutsmitteilung Nr. 16*, IMW Clausthal 1990