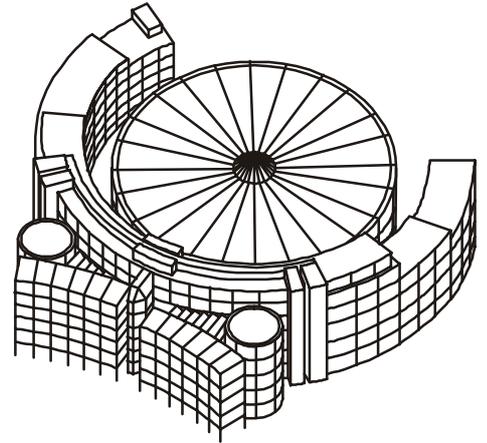


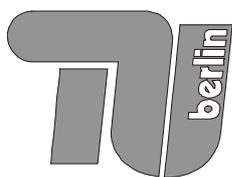
*Berichte aus dem  
Produktionstechnischen  
Zentrum Berlin*

---



**Michael Ising**

**System zur sicherheitsgerechten  
Konstruktion von Werkzeug-  
maschinen**



*Technische Universität Berlin*

# **System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Michael Ising  
aus Plettenberg

Von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. D. Severin  
Berichter: Prof. em. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. G. Spur  
Berichter: Prof. Dr.-Ing. E. Uhlmann  
Berichter: Prof. Dr.-Ing. B. Viehweger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 30.04.2001

Berlin 2001

D 83



**Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann  
Prof. em. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. Günter Spur**

---

**Michael Ising**

**System zur sicherheitsgerechten  
Konstruktion von Werkzeug-  
maschinen**

Produktionstechnisches Zentrum Berlin (PTZ)



**Fraunhofer**

Institut  
Produktionsanlagen und  
Konstruktionstechnik



Institut für  
Werkzeugmaschinen und  
Fabrikbetrieb  
Technische Universität Berlin

Berlin 2001  
D 83

---

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Ising, Michael:**

System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen / Michael Ising.

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, IWF TU Berlin. - Berlin: IWF TUB, 2001

(Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss. 2001

ISBN 3-8167-5890-8

Für die Dokumentation:

Arbeitssicherheit - Werkzeugmaschinen - Konstruktionssystem - Wissensbasis - Aufprallsimulation

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder von Teilen daraus, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© IWF/TU Berlin 2001

Gesamtherstellung: Druckhaus Berlin-Mitte GmbH, Berlin

Printed in Germany

## Vorwort der Herausgeber

Während des Konstruktionsprozesses müssen neben funktionsgerechten Anforderungen auch effektive und den neusten gesetzlichen Richtlinien entsprechende Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz des Bedienpersonals berücksichtigt werden. Der Entwicklungs- und Kostenaufwand für eine sicherheitsgerechte Lösung kann reduziert werden, wenn dem Konstrukteur in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses rechnerunterstützte Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein neues Konzept zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten zu entwickeln und dieses am Beispiel der Werkzeugmaschine prototypisch in Form eines integrierten Rechnersystems umzusetzen. Wesentliche neue Merkmale des informationstechnischen Ansatzes sind die Wiederverwendung von Vorgehensweisen aus bereits abgeschlossenen, sicherheitstechnisch optimierten Prozessen, die Bewertung der Bauteilsicherheit unmittelbar nach der Gestaltung eines sicherheitsrelevanten Bauteils sowie die Beseitigung von Gestaltungsdefiziten basierend auf einer weitestgehend automatisierten Optimierung des Prozeßablaufplans.

Die Funktionalität des entwickelten Systems wird am Beispiel einer sicherheitsgerechten Drehmaschinenkonstruktion demonstriert. Die Bereitstellung von Informationen über Gefährdungen sowie von Hinweisen zur sicherheitsgerechten Dimensionierung und Gestaltung der Maschinenbaugruppen und -teile erfolgt dabei durch eine im Rahmen der Arbeit entwickelte Wissensbasis *Maschinensicherheit*.

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung an Werkzeugmaschinen besitzt die trennende Schutzeinrichtung. Um den Produktentwickler bereits in frühen Phasen des Konstruktionsprozesses bei der sicherheitsgerechten Auslegung der Maschinenschutzeinrichtung zu unterstützen, wird die Aufprallfestigkeit der Schutzwand- und Sichtscheibenmaterialien mit der Finite-Elemente-Methode ermittelt. Eine Verifizierung der FE-Berechnungsergebnisse erfolgte durch experimentelle Beschußuntersuchungen.

Durch den Einsatz dieses Systems in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses werden Voraussetzungen geschaffen, potentielle Gefährdungen bereits am virtuellen Prototyp zu erkennen und durch Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik zu beseitigen.

Berlin, im Juni 2001

Günter Spur      Eckart Uhlmann



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor em. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. G. Spur, dem ehemaligen Direktor des Instituts, für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung sowie seinen fachlichen Rat, mit dem er diese Arbeit begleitet hat. Herrn Professor Dr.-Ing. E. Uhlmann, dem Leiter des Fachgebietes Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, danke ich für das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse, die eingehende Durchsicht und die sich daraus ergebenden Anregungen. Herrn Professor Dr.-Ing. B. Viehweger, Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung am Institut für Produktionsforschung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, danke ich gleichermaßen für die kritische Durchsicht der Arbeit und die Übernahme der Berichterstattung. Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. D. Severin vom Institut für Maschinenkonstruktion, Fachgebiet Fördertechnik und Getriebetechnik, der Technischen Universität Berlin für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuß.

Allen Freunden und Kollegen im Produktionstechnischen Zentrum Berlin danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren. Ein besonderer Dank gilt dabei den Kollegen des Fachgebietes Werkzeugmaschinen für ihre stete Hilfsbereitschaft und Unterstützung.

Des weiteren danke ich Frau Dr. Ute Forstmann für die Durchsicht des Manuskriptes und die damit verbundenen Anregungen bei der Fertigstellung der Arbeit. Ein Dank gilt auch meinen studentischen Mitarbeitern sowie Studien- und Diplomarbeitern, die durch ihr Engagement und ihre Motivation zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Den Herren Daniel Jant, Hao Nguyen und Matthias Seiferth gebührt mein Dank für die programmiertechnische Umsetzung meiner Ideen, den Herren Lutz Andersch, Jan Günther, Christian Solf und Siqi Wu für die Durchführung der FE-Berechnungen.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern dafür, daß sie mir die Möglichkeit gaben, meinen beruflichen Werdegang nach eigenen Interessen zu gestalten. Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Sabine und meinem Sohn Maximilian, deren Geduld und liebevolle Unterstützung Voraussetzung für die Fertigstellung dieser Arbeit waren.



# System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>0 Formel- und Kurzzeichen.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Stand der Erkenntnisse .....</b>	<b>9</b>
2.1 Sicherheitstechnik.....	9
2.1.1 Begriffe und Definitionen.....	9
2.1.2 Arbeitssicherheit an Werkzeugmaschinen .....	11
2.1.3 Trennende Schutzeinrichtungen .....	15
2.2 Produktentwicklung.....	24
2.2.1 Definition der Produktentwicklung.....	24
2.2.2 Optimierung der Produktentwicklung .....	30
2.2.3 Konstruktionsumgebungen und -systeme .....	34
2.3 Sicherheitsgerechte Produktentwicklung .....	41
2.3.1 Methodische Ansätze.....	41
2.3.2 Bewertung der Sicherheitsgerechtheit .....	43
2.4 Sicherheitstechnische Hilfsmittel .....	48
2.4.1 Hilfsmittel zur sicherheitsgerechten Produktentwicklung.....	48
2.4.2 Modellierung von Stoßvorgängen .....	50
<b>3 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte.....</b>	<b>53</b>

<b>4</b>	<b>Anforderungen an eine sicherheitsintegrierte Prozeß- und Produktgestaltung .....</b>	<b>56</b>
4.1	Methodische Anforderungen.....	56
4.2	Informationstechnische Anforderungen .....	58
<b>5</b>	<b>Entwurf eines Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten.....</b>	<b>61</b>
5.1	Begriffe und Definitionen.....	61
5.2	Rahmenkonzept.....	62
5.3	Basisfunktionen der Prozeß- und Produktgestaltung.....	64
5.3.1	Prozeßgestaltung .....	64
5.3.2	Produktgestaltung .....	68
5.4	Funktionen zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten.....	70
5.4.1	Prozeß- und Produktgestaltung.....	70
5.4.2	Produktbewertung .....	75
5.4.3	Prozeß- und Produktoptimierung .....	81
<b>6</b>	<b>Aufbau einer Wissensbasis <i>Maschinensicherheit</i>.....</b>	<b>83</b>
6.1	Allgemeines .....	83
6.2	Anforderungen .....	83
6.3	Strukturieren der Wissensbasis .....	84
6.4	Wissensrepräsentation .....	85
6.5	Realisierung.....	87
6.5.1	Allgemeines.....	87
6.5.2	Wissensbaustein <i>Gefahren</i> .....	88
6.5.3	Wissensbaustein <i>Sicherheitsmaßnahmen</i> .....	90

<b>7</b>	<b>Realisierung eines Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten .....</b>	<b>101</b>
7.1	Allgemeines .....	101
7.2	Prototypaufbau .....	101
7.3	Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Prozessen .....	103
7.3.1	Prozeßplanung.....	104
7.3.2	Prozeßgestaltung .....	107
7.3.3	Prozeßsteuerung und -überwachung .....	110
7.4	Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Produkten.....	110
7.4.1	Produktplanung und -gestaltung .....	110
7.4.2	Produktbewertung .....	111
7.5	Modul zur sicherheitsintegrierten Optimierung von Prozessen und Produkten .....	116
<b>8</b>	<b>Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“.....</b>	<b>121</b>
8.1	Allgemeines .....	121
8.2	Grundlagen der Methode der Finiten Elemente .....	125
8.3	Aufbau des FE-Modells „Sichtfenster“ .....	126
8.3.1	Elementierung und Netzgenerierung.....	126
8.3.2	Materialmodell .....	127
8.3.3	Rand- und Anfangswertbedingungen .....	130
8.4	Ergebnisse der Simulationsrechnungen .....	130
8.4.1	Beurteilung des Einflusses einzelner Prüfparameter .....	130
8.4.1.1	Einfluß der Einspannungsart .....	130
8.4.1.2	Einfluß der Einspanntiefe .....	140
8.4.1.3	Einfluß der Projektilform .....	142

8.4.1.4	Einfluß des Projektilaufreffwinkels .....	148
8.4.1.5	Einfluß des Projektilaufreffpunktes .....	152
8.4.1.6	Fazit.....	156
8.4.2	Worst-Case-Aufprallsimulation .....	157
8.4.3	Vergleich Polycarbonat - Stahl.....	161
8.5	Fazit.....	164
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>167</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>171</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>196</b>
11.1	ASCII-Textdatei <i>Auswahllisten</i> .....	196
11.2	ASCII-Textdatei <i>Reihenfolgebeziehungen</i> .....	198

## 0 Formel- und Kurzzeichen

### Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
A	-	Materialparameter
b	mm	Beultiefe
$b_{\text{bleib}}$	mm	bleibende Beultiefe
$b_{\text{max}}$	mm	maximale Beultiefe
C	-	Materialparameter
C	-	Dämpfungsmatrix
D	mm	Durchmesser
$D_p$	mm	Partikeldurchmesser
$D_s$	mm	Kontaktkreisdurchmesser
$D_{\text{sp}}$	mm	Spannfutterdurchmesser
d	mm	Dicke
$d_{\text{Gl}}$	mm	Sicherheitsglasdicke
$d_{\text{Sch}}$	mm	Sichtscheibendicke
E	$\text{N/mm}^2$	Elastizitätsmodul
E	Nm	Aufprallenergie
$E_d$	Nm	Durchschußenergie
$E_{\text{kin}}$	Nm	kinetische Energie
$E_{\text{krit}}$	Nm	kritische Aufprallenergie
$F_S$	N	Stoßkraft
$F_{S\text{max}}$	N	maximale Stoßkraft
K	-	Steifigkeitsmatrix
$K_M$	DM	Materialkosten
l	mm	Länge
M	-	Massenmatrix
m	kg	Masse
$m_{\text{AB}}$	kg	Masse einer Aufsatzbacke

---

$m_P$	kg	Projektilmasse
$n$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
$n_{\text{max}}$	$\text{min}^{-1}$	maximal zulässige Spann Futterdrehzahl
$p_m$	$\text{N/mm}^2$	mittlerer Druck in der Stoßstelle
$R$	-	Ruhegrad
$R_e$	$\text{N/mm}^2$	Streckgrenze, allgemein
$R_{eH}$	$\text{N/mm}^2$	obere Streckgrenze
$R_{eL}$	$\text{N/mm}^2$	untere Streckgrenze
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	Zugfestigkeit
$R_p$	$\text{N/mm}^2$	Proportionalitätsgrenze, allgemein
$R_{p0,2}$	$\text{N/mm}^2$	Proportionalitätsgrenze bei 0,2 % bleibender Dehnung
$S_D$	-	Sicherheit gegen Dauerbruch
$t$	s	Zeit
$t_E$	mm	Einspanntiefe
$t_{E \text{ Kleb}}$	mm	Einspanntiefe Klebverbindung
$t_{E \text{ Klemm}}$	mm	Einspanntiefe Klemmverbindung
$t_{E \text{ Schraub}}$	mm	Einspanntiefe Schraubverbindung
$t_s$	s	Stoßzeit
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v_{\text{max}}$	m/s	maximale Beschußgeschwindigkeit
$v_P$	m/s	Projektilgeschwindigkeit
$v_{P0}$	m/s	Anfangsgeschwindigkeit des Projektils
$v_u$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
$\alpha$	-	Dämpfungskoeffizient der Massenmatrix M
$\alpha_p$	Grad	Projektilaufreffwinkel
$\beta$	-	Dämpfungskoeffizient der Steifigkeitsmatrix K
$\dot{\gamma}_{pl}$	$\text{s}^{-1}$	plastische Verzerrungsgeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_o$	$\text{s}^{-1}$	Verzerrungsgeschwindigkeit bei Fließbeginn
$\varepsilon$	-	Dehnung im einachsigen Zustand, allgemein

$\varepsilon_{pl}$	-	plastische Dehnung im einachsigen Fall
$\dot{\varepsilon}$	$s^{-1}$	Dehnungsgeschwindigkeit, allgemein
$\dot{\varepsilon}_o$	$s^{-1}$	Dehnungsgeschwindigkeit bei Fließbeginn
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	$s^{-1}$	mittlere plastische Dehnungsgeschwindigkeit
$\Delta x_{Kleb}$	mm	Verschiebung der geklebten Sichtscheibe
$\Delta x_{Klemm}$	mm	Verschiebung der geklemmten Sichtscheibe
$\Delta z$	mm	Wegdifferenz
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\sigma$	$N/mm^2$	einachsige mechanische Spannung, allgemein
$\sigma_{AG}$	$N/mm^2$	Ausschlagfestigkeit
$\sigma_a$	$N/mm^2$	athermischer Spannungsanteil
$\sigma_d$	$N/mm^2$	geschwindigkeitsgedämpfter Spannungsanteil
$\sigma_F$	$N/mm^2$	Fließgrenze
$\sigma_f$	$N/mm^2$	Fließspannung
$\sigma_{fo}$	$N/mm^2$	Fließspannung bei Fließbeginn
$\sigma_t$	$N/mm^2$	thermisch aktivierter Spannungsanteil
$\sigma_v$	$N/mm^2$	Vergleichsspannung nach VON MISES
$\sigma_{va}$	$N/mm^2$	Ausschlag der Vergleichsspannung
$\sigma_w$	$N/mm^2$	Zug-Druck-Wechselfestigkeit
$\tau_f$	$N/mm^2$	Schubspannung bei Fließbeginn
$\tau_{fo}$	$N/mm^2$	Schubfließspannung bei Fließbeginn

## Kurzzeichen

Zeichen	Erläuterung
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CA	Computer Aided
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering

CAX	Computer Aided Systeme
CE	Concurrent Engineering
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EDM	Engineering Data Management
EDMS	Engineering Data Management System
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm
FE, FEM	Finite Elemente, Finite Elemente Methode
HSC	High Speed Cutting
IDEFO	Integration Definition for Function Modeling
IT	Informationstechnologien
PC	Polycarbonat
PDF	Portable Data Format
PDM	Product Data Management
PDMS	Product Data Management System
PMMA	Polymethylmethacrylat
prEN	Europäische Vornorm
SE	Simultaneous Engineering
SFB	Sonderforschungsbereich
SHPB	Split-Hopkinson-Pressure-Bar
St	Stahl
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WFM	Workflow Management
WFMS	Workflow Management System

## 1 Einleitung

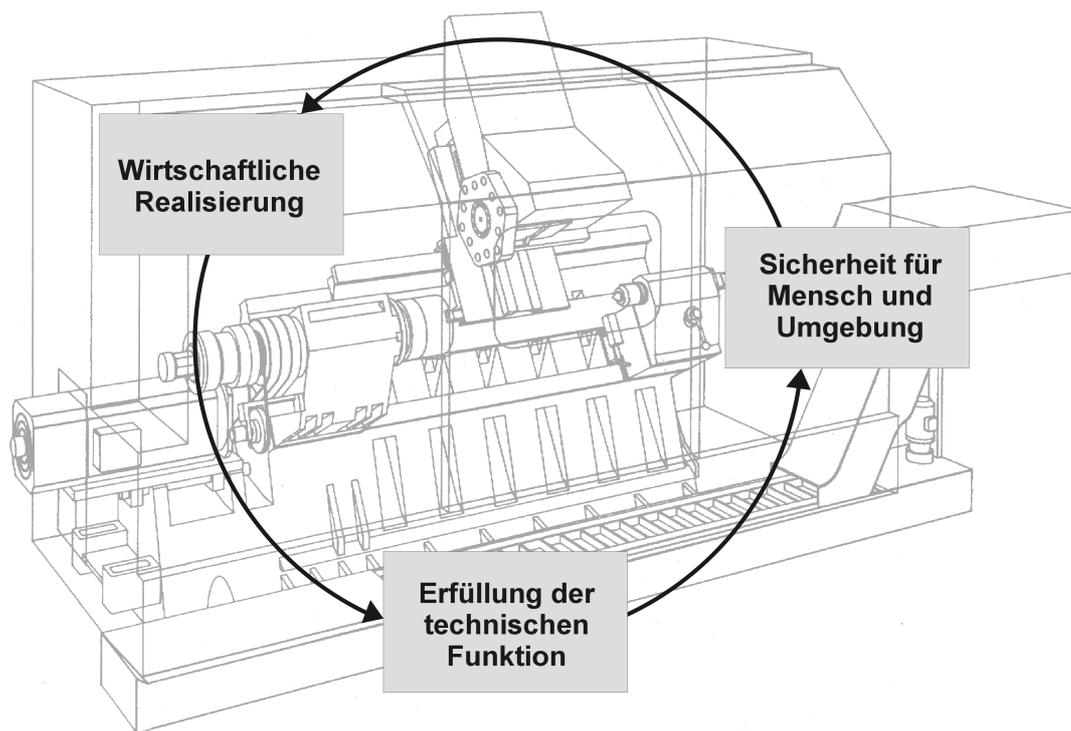
Für den Erfolg eines Unternehmens ist es notwendig, innovative Produktkonzepte hoher Qualität in immer kürzeren Zeitabständen anzubieten. Dabei kommt der Produktentwicklung eine Schlüsselverantwortung zu [212]. Hier werden nahezu 70 % der Herstellungskosten und annähernd 60 % der Herstellungszeiten eines Produktes vorbestimmt [40]. Der steigende Wettbewerbsdruck erfordert immer effizientere Produktentwicklungsprozesse. Neben der Umsetzung neuer Strategien und Organisationsformen wie beispielsweise dem Simultaneous bzw. Concurrent Engineering [42, 43, 171, 204] bietet die Virtualisierung der Produktentwicklung [207] ein erhebliches Potential zur Leistungssteigerung.

Unter Virtualisierung wird nach SPUR [207] die methodische Überführung eines Entwicklungsprozesses in einen rechnerintegrierten Ablauf mit gleichzeitiger Darstellungsmöglichkeit des wirklichen Verhaltens der zu entwickelnden Objekte verstanden. Ziel ist es, die Prozeßkette der Produktentwicklung mit den Phasen *Produktplanung, Konzeption, Design, Konstruktion* und *Arbeitsplanung* ganzheitlich durch den Einsatz von leistungsfähigen CAE-Systemen zu unterstützen. Neben dem Einsatz von Rechnersystemen bei der Bearbeitung von Teilaufgaben des Produktentwicklungsprozesses und dem dafür notwendigen Produktdatenaustausch erfordern Prozeßketten auch den Einsatz von Systemen zur Planung des Ablaufes der Produktentwicklung [212].

Die Leistungssteigerung der Produktentwicklung mit Systemen zur Unterstützung der Produktgestaltung wird schon seit längerer Zeit betrieben. Zu diesen Rechnerwerkzeugen zählen leistungsfähige 3D-CAD-Systeme zur Zeichnungserstellung, Berechnungs- und FEM-Systeme zur Auslegung von Maschinenelementen, Simulationsprogramme für Kinematik- und Dynamikuntersuchungen sowie Expertensysteme zur Bereitstellung und Verarbeitung von Wissen. Diese Einzelwerkzeuge werden oftmals zu Konstruktionsumgebungen bzw. -systemen miteinander verknüpft. Auch für die Unterstützung der Prozeßgestaltung existieren kommerziell verfügbare Anwendungssysteme. Beispiele sind Workflow-Management-Systeme, die in der Regel sowohl Funktionen zur Modellierung als auch zur Steuerung und Überwachung von Prozessen anbieten, sowie Workflow-Management-Komponenten von EDM-Systemen, die darüber hinaus eine integrierte Handhabung von Prozessen und Produktdaten ermöglichen.

Nicht verfügbar sind allerdings Rechnerwerkzeuge, die Systeme zur Prozeß- und Produktgestaltung derart miteinander verknüpfen, daß Ergebnisse von Produktbewertungen unmittelbar in die Entwicklungsprozeßgestaltung einfließen. Eine Optimierung der Produktentwicklungsprozesse wird derzeit im Regelfall durch den Anwender manuell, d. h. ohne ausreichende Rechnerunterstützung, durchgeführt [58]. Benötigt werden Systeme, die Prozeßabläufe automatisch an veränderte Randbedingungen anpassen [24, 151].

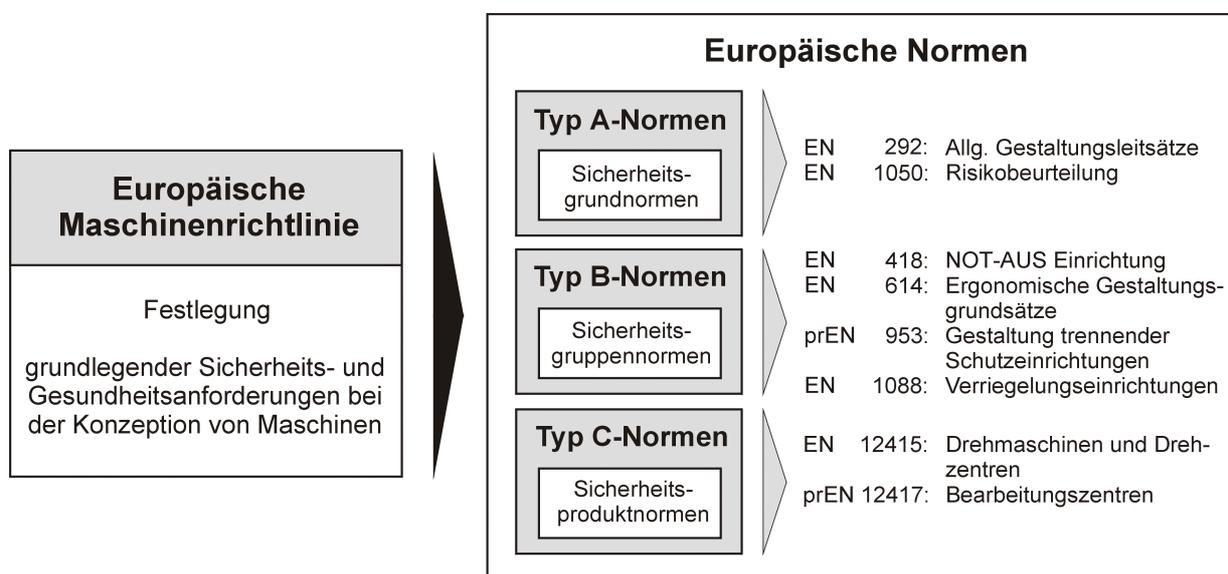
Aufgabe der Produktbewertung im Anschluß an die einzelnen Entwicklungsphasen ist eine Beurteilung des Erfüllungsgrades der Anforderungen und der Gestaltungsziele. Neben Funktionserfüllung und Wirtschaftlichkeit ist die Gewährleistung von Sicherheit für Mensch und Umgebung eine der generellen Gestaltungsziele bei der Entwicklung von technischen Produkten [168], **Bild 1-1**.



**Bild 1-1:** Generelle Zielsetzungen bei der Gestaltung technischer Produkte [168]

Dieser Zielsetzung kommt vor allem im Werkzeugmaschinenbau eine besondere Bedeutung zu, da durch technische Innovationen jüngerer Zeit, wie die Hochgeschwindigkeits- und Trockenbearbeitung, neue, in dieser Größe und Art nicht gekannte Gefahrenpotentiale entstanden sind [209].

Parallel dazu hat sich die Rechtssituation der Werkzeugmaschinenhersteller verändert. Mit Inkrafttreten der Europäischen Maschinenrichtlinie, die durch die 9. Verordnung zum Gerätesicherheitsgesetz in nationales Recht umgesetzt wurde, dürfen in der Bundesrepublik Deutschland nur Maschinen betrieben werden, die unter Berücksichtigung der in Anhang I der Maschinenrichtlinie beschriebenen Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen konzipiert worden sind [158, 180]. Konkretisiert werden die Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen durch die harmonisierten Europäischen Normen, **Bild 1-2**.



**Bild 1-2:** Rechtssituation für die Werkzeugmaschinenhersteller

Der Entwicklungs- und Kostenaufwand für eine der Europäischen Maschinenrichtlinie entsprechende sicherheitsgerechte Lösung kann verringert werden, wenn bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses potentielle Gefährdungen erkannt und durch die Umsetzung sicherheitstechnischer Maßnahmen beseitigt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, umfangreiche und kostenaufwendige sicherheitstechnische Nachrüstungen des Produktprototypen zu vermeiden.

Bisherige Ansätze zur Rechnerunterstützung des sicherheitsgerechten Produktentwicklungsprozesses beschäftigten sich vordergründig mit der Bereitstellung von Angaben aus Vorschriften, Normen und Arbeitsschutzbestimmungen in einzelnen Konstruktionsphasen. Rechnerwerkzeuge, die prozeß- und produktgestalterische Tätig-

keiten ganzheitlich im Rahmen der sicherheitsgerechten Produktentwicklung unterstützen, stehen derzeit nicht zur Verfügung [76, 222].

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein neues Konzept zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten vorgestellt und in Form eines prototypischen Rechnersystems umgesetzt. Besonderes Kennzeichen des informationstechnischen Ansatzes ist neben der Wiederverwendung von Vorgehensweisen aus sicherheitstechnisch optimierten Produktentwicklungsprozessen die automatisierte Anpassung des Prozeßablaufplans an Ergebnisse von sicherheitstechnischen Produktbewertungen. Die Funktionalität des Rechnersystems wird am Beispiel einer sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung demonstriert.

## **2 Stand der Erkenntnisse**

### **2.1 Sicherheitstechnik**

#### **2.1.1 Begriffe und Definitionen**

Aufgabe der Sicherheitstechnik ist es, durch die Vorbereitung und Durchführung beschreibender und gestalterischer Maßnahmen Gefahren aller Art für Mensch und Umgebung bei Herstellung, Transport, Zusammenbau, Inbetriebnahme, bestimmungsgemäßer Verwendung und Demontage technischer Erzeugnisse zu vermeiden [137, 170, 172, 194]. Es wird in diesem Zusammenhang zwischen Bauteil-, Funktions-, Arbeits- und Umweltsicherheit unterschieden [168]. Unter Bauteilsicherheit wird die Sicherheit eines Bauteils gegen Bruch oder unzulässige Verformung verstanden. Funktionssicherheit ist die Fähigkeit eines technischen Systems, die geforderte Funktion über eine vorgegebene Zeitdauer unter Vermeidung gefährlicher Betriebszustände zu erfüllen. Arbeitssicherheit ist die Gewährleistung der Sicherheit des Menschen vor arbeitsbedingten gesundheitlichen Schädigungen, Beeinträchtigungen und Gefahren aller Art. Die Umweltsicherheit befaßt sich mit der Einschränkung von Schädigungen im Umfeld technischer Systeme.

Im folgenden werden im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete sicherheitstechnische Begriffe definiert:

- **Gefahr:**

Gefahr kann von der Nutzung eines technischen Systems ausgehen und bedeutet die Möglichkeit einer Schädigung von Mensch oder Sachgut [116].

- **Gefährdung:**

Gefährdung kann sich für Mensch und Sachgut ergeben, wenn ein technisches System genutzt wird und sich Mensch und Sachgut in seinem Wirkungsbereich befinden [116].

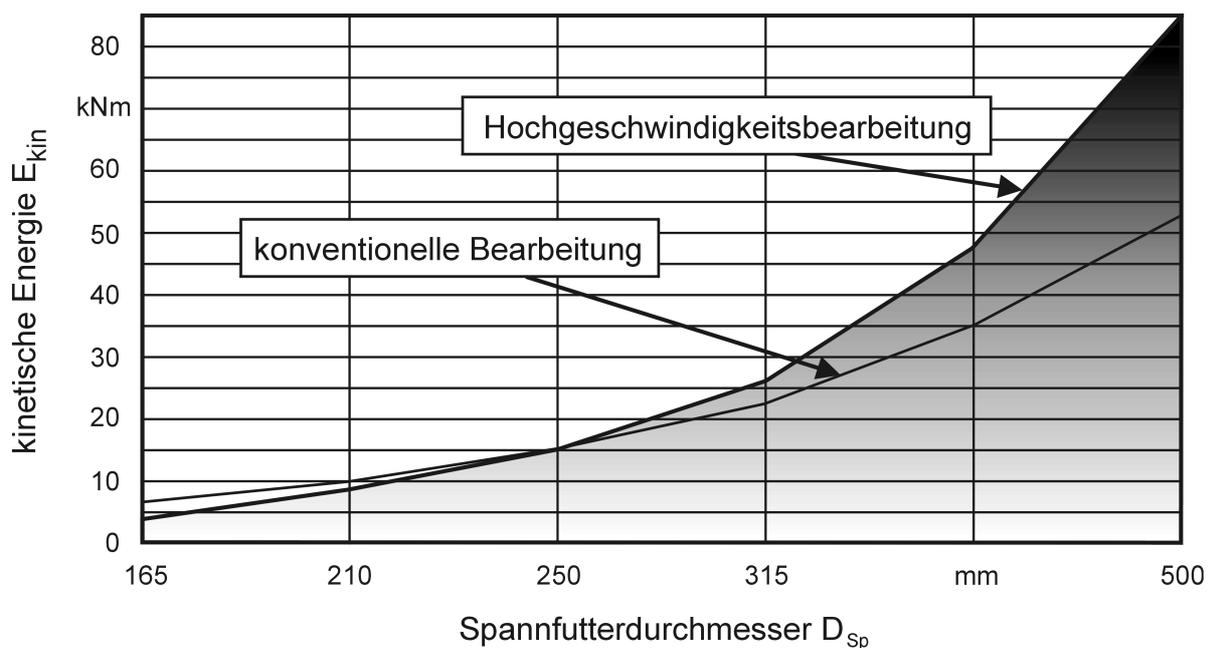
- **Gefährdungssituation:**

Jede Situation, in der ein Mensch einer oder mehreren Gefährdungen ausgesetzt ist [250].

- Gefahrenquelle:  
Gefahrenquelle ist ein technisches System, von dem Gefahr ausgeht und sich ausbreiten kann auf Güter, die geschädigt werden können [116].
- Risiko:  
Eine Kombination der Wahrscheinlichkeit und des Schweregrades der möglichen Verletzung oder Gesundheitsschädigung in einer Gefährdungssituation [250].
- Gefahrenbereich:  
Jeder Bereich in einer technischen Anlage oder um eine technische Anlage herum, in dem eine Person dem Risiko einer Verletzung oder Gesundheitsschädigung ausgesetzt ist [250].
- Gefährdungspotential:  
Das Gefährdungspotential einer technischen Anlage ist der Umfang der Schädigungen an Personen und Sachgütern in der Umgebung einer Anlage, die unter definierten Bedingungen zu erwarten sind [116].
- Gefahrenpotential:  
Das Gefahrenpotential einer technischen Anlage ist die obere Grenze ihrer Gefährdung [116].
- Schaden:  
Schaden ist die Auswirkung einer materiellen oder funktionellen Beeinträchtigung einer technischen Anlage [116, 205].
- Schadensfall:  
Schadensfall bezeichnet das tatsächliche Eintreten eines Schadens [116].
- Sicherheit:  
Sicherheit ist das Maß an Gewißheit, daß mögliche Schäden nicht auftreten [116].

### 2.1.2 Arbeitssicherheit an Werkzeugmaschinen

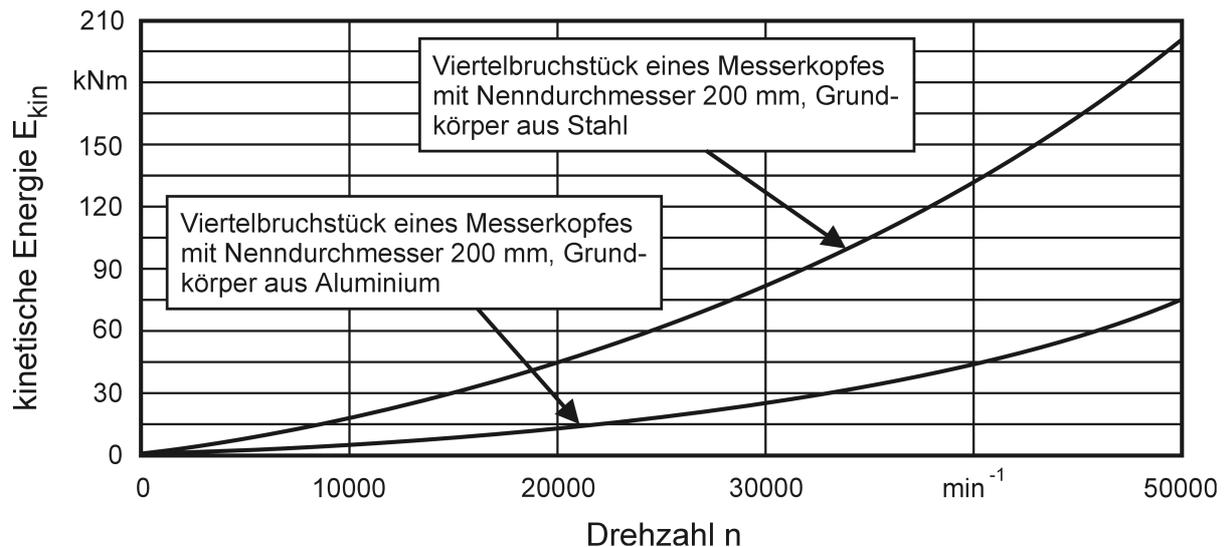
Im Mittelpunkt der Arbeitssicherheitsbetrachtungen an Werkzeugmaschinen steht der Mensch. Ziel ist es, diesen vor Unfällen und langfristig schädlichen Einwirkungen zu schützen [194]. Diese Zielsetzung ist heute aktueller denn je, da durch technische Innovationen wie die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung das Gefährdungspotential an Maschinen der spanenden Bearbeitung beträchtlich gestiegen ist. Beispielhaft sind in **Bild 2-1** die maximalen kinetischen Energien geführt abgeschleuderter Backeneinheiten von Drehmaschinenstannfuttern bei konventioneller und Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung gegenübergestellt. Während im konventionellen Bereich kinetische Energien in der Größenordnung von maximal 55 kNm zu erwarten sind, erreichen diese bei Drehzahlen im Hochgeschwindigkeitsbereich Energiewerte von über 70 kNm [209].



**Bild 2-1:** Maximale kinetische Energie geführt abgeschleuderter Spannfutterbackeneinheiten bei konventioneller und Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung [209]

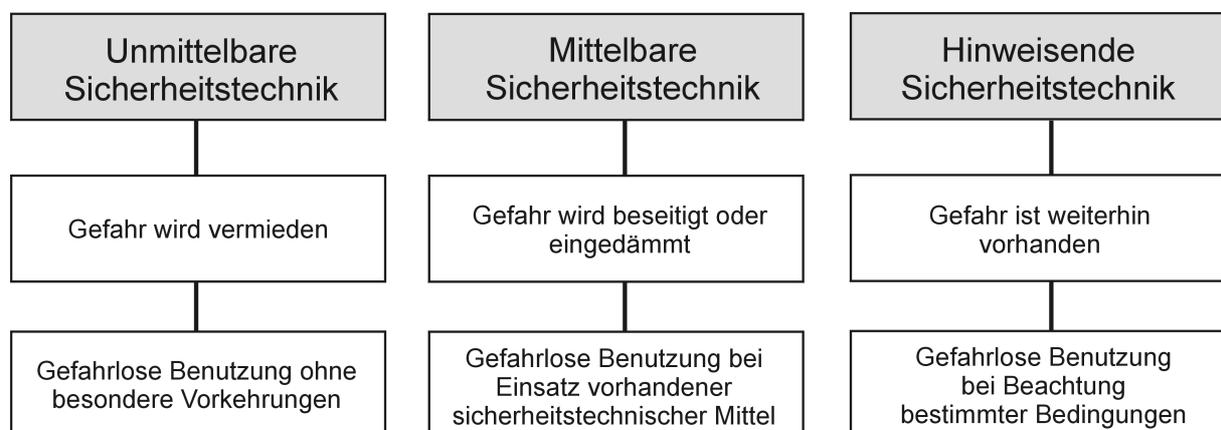
Bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung wird das mit Abstand größte Schadensenergiepotential beim fliehkraftiniziierten Versagen des Messerkopfes freigesetzt. Aufgrund innerer Spannungsspitzen, hervorgerufen durch Volumenkräfte, kommt es insbesondere an den Lochrändern zu Anrissen, die im weiteren Verlauf zu

einem Versagen des Bauteils führen [201]. **Bild 2-2** stellt die kinetische Energie eines Viertel-Messerkopfbruchstückes in Abhängigkeit von der Spindeldrehzahl dar. Dabei wird zwischen einem Grundkörper aus Stahl und einem Grundkörper aus Aluminium unterschieden. Es zeigt sich, daß bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung im ungünstigsten Fall mit maximalen kinetischen Energien von bis zu 200 kNm zu rechnen ist.



**Bild 2-2:** Kinetische Energie abgeschleudelter Viertelbruchstücke von Messerköpfen bei der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung [12]

Zur Gewährleistung von Arbeitssicherheit wird von PAHL und BEITZ [168] eine dreistufige Vorgehensweise vorgeschlagen, **Bild 2-3**.



**Bild 2-3:** Drei-Stufen-Methode der Sicherheitstechnik [168]

Grundsätzlich wird angestrebt, die Forderung nach Sicherheit durch Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik zu gewährleisten, d. h. die Konstruktionslösung ist so zu wählen, daß von vornherein eine Gefährdung nicht besteht. Erst, wenn eine solche Möglichkeit nicht wahrgenommen werden kann und ein den Bediener gefährdendes Restrisiko verbleibt, ist das technische Erzeugnis um Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik, d. h. den Aufbau von Schutzsystemen und die Anordnung von Schutzeinrichtungen, und gegebenenfalls zusätzlich um Maßnahmen der hinweisenden Sicherheitstechnik zu ergänzen.

### **Unmittelbare Sicherheitstechnik**

Bei der Umsetzung von Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik werden im wesentlichen drei Prinzipien unterschieden [168]. Kennzeichen des *Prinzips des sicheren Bestehens* (safe-life-Verhalten) ist, daß alle Bauteile und ihr Zusammenhang so beschaffen sein sollten, daß während der vorgesehenen Einsatzzeit alle wahrscheinlichen oder sogar möglichen Vorkommnisse ohne ein Versagen oder eine Störung überstanden werden können. Angesichts der bestehenden Unsicherheiten von Berechnung, Konstruktion, Werkstoff und Umwelt handelt es sich bei diesem Prinzip allerdings nur um eine Hypothese, deren Bestätigung nur in einfachen Fällen gelingen kann [119]. Das *Prinzip des beschränkten Versagens* (fail-safe-Verhalten) läßt dagegen während der Einsatzzeit eine Funktionsstörung und/oder einen Bruch zu, ohne daß es dabei zu schwerwiegenden Folgen kommen darf. Als Ziel des angestrebten Verhaltens ergibt sich demnach die Gewinnung einer ausreichend großen Reaktionszeit auf die erkannte Schädigung mit abschätzbarer Restlebensdauer und beobachtbarem Fortschreiten der Schädigung [119]. Beim *Prinzip der redundanten Anordnung* wird davon ausgegangen, daß ein entweder parallel oder in Serie angeordnetes weiteres Systemelement die volle oder wenigstens eingeschränkte Funktion übernehmen kann. Eine Erhöhung der Sicherheit ist jedoch nur dann gegeben, wenn die redundanten Elemente einem der zuvor genannten Prinzipien des sicheren Bestehens oder des beschränkten Versagens genügen.

Die Gestaltung und Optimierung von Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik für Werkzeugmaschinen war und ist Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsprojekten. Neben Ansätzen, bei denen Werkzeugmaschinen durch die Integration von Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik ganzheitlich optimiert

worden sind [12, 119, 178, 238], wurden auch Forschungsprojekte durchgeführt, bei denen die Optimierung einzelner Baugruppen bzw. Bauteile, wie Spannmittel [215] oder Werkzeuge [248], im Vordergrund standen. Darüber hinaus beschreiben WECK und MAYROSE [237] einen Ansatz, konventionelle Werkzeugmaschinen durch die nachträgliche Integration von unmittelbaren Sicherheitsmaßnahmen auch für den Einsatz im Bereich der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung sicher zu machen.

Trotz der Integration von Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik während der Gestaltung von Produkten verbleibt in jedem Fall ein erhebliches Restrisiko. So kann es zum Beispiel durch falsches Programmieren, Bedienfehler, Versagen der Steuerung, fehlende oder unwirksame Sicherheitseinrichtungen oder Werkstoffversagen zu unkontrollierbaren Erscheinungen kommen [119]. Gefahren für die Gesundheit des Bedienpersonals können nur durch den ergänzenden Einsatz von Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik vollständig abgewendet werden.

### **Mittelbare Sicherheitstechnik**

Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik sind Schutzsysteme und Schutzeinrichtungen. Während Schutzsysteme beim Auftreten einer Gefährdung eine Schutzreaktion auslösen, sind Schutzeinrichtungen von sich aus handlungsunfähig. Ihre Wirkung besteht in der passiven Rolle des Trennens, Fernhaltens und Schützens durch Anordnung von formgestaltetem Stoff [250].

Die Sicherheitsaufgabe eines Schutzsystems, in [146] auch als Schutzeinrichtung mit Annäherungsfunktion bezeichnet, besteht im Überwachen eines Schutzfeldes, das punkt- oder linienförmig, als zweidimensionale Fläche oder als dreidimensionaler Raum ausgebildet sein kann. Schutzsysteme beenden bei einem Eingriff in das Schutzfeld die ablaufende gefahrbringende Bewegung an einer Gefahrenstelle oder in einem Gefahrenbereich. Unterscheidungsmerkmal von Schutzsystemen ist das Prinzip der Schutzfelderzeugung [146]. Es werden optische, auf dem Ultraschallprinzip basierende sowie auf Wärmestrahlung reagierende Systeme unterschieden. Bei allen Prinzipien wird durch Störung oder Änderung des Schutzfeldes ein Signal erzeugt, das in einer nachgeschalteten Einheit weiterverarbeitet wird.

Schutzeinrichtungen werden in ortsbindende, abweisende und trennende Schutzeinrichtungen eingeteilt [146], wobei an Werkzeugmaschinen die trennenden Schutzeinrichtungen am weitesten verbreitet sind.

### 2.1.3 Trennende Schutzeinrichtungen

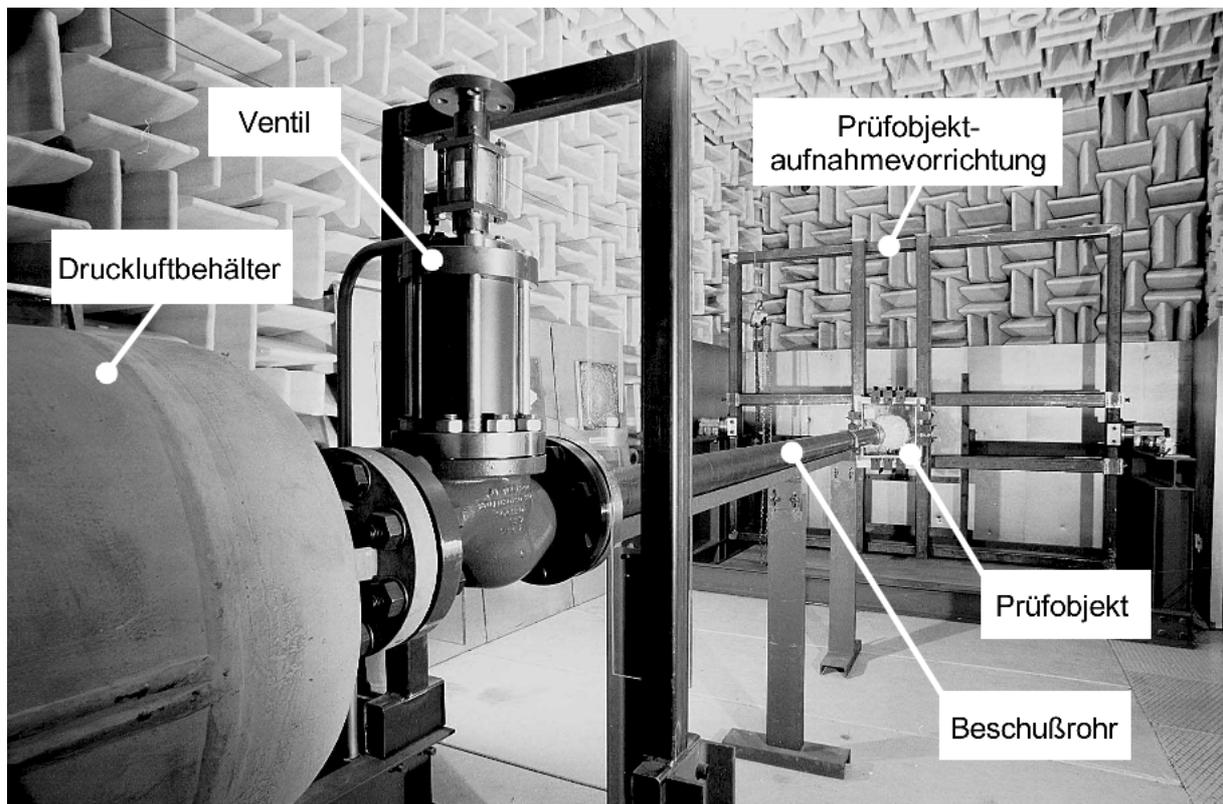
Neben der Absicherung von technologisch bedingten und konstruktiv unvermeidbaren Gefahrenstellen an Werkzeugmaschinen besteht die Hauptaufgabe trennender Schutzeinrichtungen darin, Personen vor unkontrolliert wegfliegenden Teilen zu schützen.

Trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen lassen sich in die drei Grundtypen *Verkleidungen*, *Verdeckungen* und *Umzäunungen* unterteilen [146]. *Verkleidungen* sind trennende Schutzeinrichtungen, die unmittelbar vor Gefahrenstellen angebracht sind und allein oder zusammen mit anderen Maschinenteilen das Erreichen dieser Gefahren von allen Seiten verhindern. Schutzeinrichtungen, die unmittelbar vor Gefahrenstellen angebracht sind und allein oder zusammen mit anderen Teilen das Erreichen dieser Gefahrenstellen von der zu erwartenden Zugriffsseite verhindern, werden als *Verdeckungen* bezeichnet. *Umzäunungen* sind Schutzeinrichtungen, die weiträumig um mehrere Gefahrenstellen so angebracht sind, daß sie allein oder mit anderen Bauteilen ein Erreichen der Gefahrenstellen oder einen Zutritt zu den Gefahrenstellen ohne Hilfsmittel verhindern. Trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen sind eine Kombination der aufgezählten Grundtypen.

#### **Werkstoffprüfung durch Aufpralluntersuchungen**

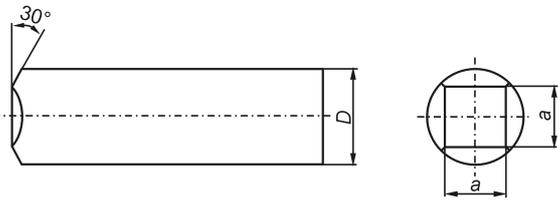
Hauptanforderung an Baugruppen trennender Schutzeinrichtungen ist eine hohe Rückhaltefähigkeit der eingesetzten Materialien beim Aufprall von abgeschleuderten Elementen. Zur Ermittlung der Rückhaltefähigkeit wird in EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] ein Prüfverfahren beschrieben, bei dem Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen mit zylindrischen Projektilen stoßartig beansprucht und in Abhängigkeit von dem Beschußergebnis in Widerstandsklassen eingeteilt werden. Das Prüfverfahren basiert auf Untersuchungsergebnissen von LEHMANN [119] zur Arbeitssicherheit an Drehmaschinen, der feststellte, daß die Schädigungswirkung von abgeschleuderten Spannfutterelementen im wesentlichen auf den translatorischen Energieanteil zurückzuführen ist.

Bei dem in EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] beschriebenen Aufprallprüfverfahren werden die 0,1 bis 2,5 kg schweren zylindrischen Projektile mittels einer Beschußeinrichtung, **Bild 2-4**, translatorisch auf Geschwindigkeiten zwischen 32 und 120 m s<sup>-1</sup> beschleunigt.



**Bild 2-4:** Beschußeinrichtung für die Aufprallprüfung nach EN 12415 bzw. prEN 12417 am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin

Der Aufprall der Projektile mit stumpfer Stirnfläche, **Bild 2-5 links**, erfolgt dabei rechtwinklig zur Oberfläche. Zielpunkte der Projektile sind die schwächsten und ungünstigsten Stellen auf der Werkstoffprobe. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Schutzeinrichtungsbaugruppe dem Aufprall des Projektils widersteht und im Material keine Schädigungen wie An- oder Durchrisse aufgetreten sind. Basierend auf den Beschußergebnissen erfolgt die Einteilung der untersuchten Werkstoffe in Widerstandsklassen, **Bild 2-5 rechts**.

Projektform/ -größe			Widerstandsklassen																			
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Widerstands-klasse</th> <th>Projekt-il-masse [kg]</th> <th>Aufprall-geschwindig-keit [m/s]</th> <th>Aufprall-energie [J]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1 A2 A3</td> <td>0,625</td> <td>32 50 80</td> <td>320 781 2000</td> </tr> <tr> <td>B1 B2 B3</td> <td>1,25</td> <td>50 63 80</td> <td>1562 2480 4000</td> </tr> <tr> <td>C1 C2 C3</td> <td>2,5</td> <td>50 63 80</td> <td>3124 4960 8000</td> </tr> </tbody> </table>				Widerstands-klasse	Projekt-il-masse [kg]	Aufprall-geschwindig-keit [m/s]	Aufprall-energie [J]	A1 A2 A3	0,625	32 50 80	320 781 2000	B1 B2 B3	1,25	50 63 80	1562 2480 4000	C1 C2 C3	2,5	50 63 80	3124 4960 8000
Widerstands-klasse	Projekt-il-masse [kg]	Aufprall-geschwindig-keit [m/s]	Aufprall-energie [J]																			
A1 A2 A3	0,625	32 50 80	320 781 2000																			
B1 B2 B3	1,25	50 63 80	1562 2480 4000																			
C1 C2 C3	2,5	50 63 80	3124 4960 8000																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Masse m [kg]</th> <th>Durchmesser D [mm]</th> <th>Stirnfläche a x a [mm x mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,625</td> <td>30</td> <td>19 x 19</td> </tr> <tr> <td>1,25</td> <td>40</td> <td>25 x 25</td> </tr> <tr> <td>2,5</td> <td>50</td> <td>30 x 30</td> </tr> </tbody> </table>	Masse m [kg]	Durchmesser D [mm]	Stirnfläche a x a [mm x mm]	0,625	30	19 x 19	1,25	40	25 x 25	2,5	50	30 x 30										
Masse m [kg]	Durchmesser D [mm]	Stirnfläche a x a [mm x mm]																				
0,625	30	19 x 19																				
1,25	40	25 x 25																				
2,5	50	30 x 30																				

**Bild 2-5:** Projektil und Widerstandsklassen nach EN 12415 [256]

Erste Beschußuntersuchungen auf Komponenten trennender Schutzeinrichtungen für Fräs- und Drehmaschinen wurden von MEWES, TRAPP und WARLICH [134, 135] durchgeführt. SPUR und ISING [211] fassen die Ergebnisse von Beschußuntersuchungen zusammen und leiten Hinweise zur Dimensionierung und Gestaltung von trennenden Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen ab. Ergänzende Aufpralluntersuchungen werden von SPUR und BOLD [209, 210] beschrieben.

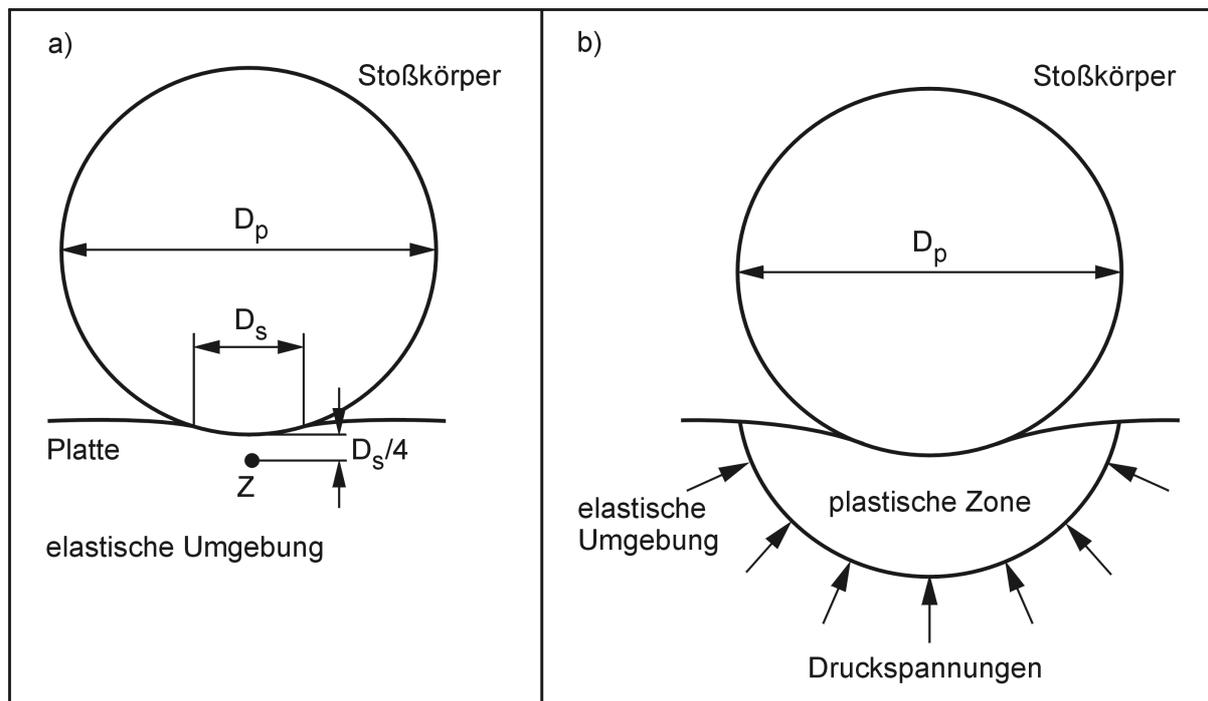
Auch für Schleifmaschinenschutzeinrichtungen liegen bereits umfangreiche Dimensionierungs- und Gestaltungshinweise vor [37, 117, 175, 239], die zugleich Grundlage für die Erarbeitung der Schleifmaschinensicherheitsnorm prEN 13218 [258] waren.

### Grundlagen des Stoßvorganges

Als Stoß wird das kurzzeitige Berühren zweier Körper unter Änderung ihres Bewegungszustandes bezeichnet [113]. Beim geraden zentralen Stoß bewegen sich die Massenmittelpunkte der beiden Stoßpartner auf einer gemeinsamen Geraden, beim schiefen zentralen Stoß bewegen sich die Massenmittelpunkte der Stoßpartner schräg aufeinander zu [33]. Die Aufprallprüfung nach EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] ist ein Sonderfall des geraden zentralen Stoßes, bei dem ein bewegter Körper auf einen ruhenden, fest eingespannten Körper trifft.

Die Vorgänge beim Stoß eines bewegten Körpers aus Metall auf eine im Vergleich weichere, ebenfalls metallische Platte werden von GOMMEL [59] sowie ILLYES und BAUER [83] beschrieben. Es werden zwei Stoßphasen unterschieden. Die Kompressionsphase beginnt mit der Berührung und endet mit der größten Deformation der beiden Stoßpartner, die Restitutionsphase setzt mit Ende der Kompressionsphase ein und umfaßt die Zeitdauer bis zur Trennung der Stoßpartner.

Im Augenblick der ersten Berührung zwischen Stoßkörper und Platte ist die Größe der Stoßkraft gleich Null. Mit fortschreitendem Eindringen wächst die Stoßkraft kontinuierlich an und führt nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze zu ersten irreversiblen Deformationen in den oberflächennahen Werkstoffschichten. Parallel dazu läuft auch eine elastische Verformung der tieferliegenden Werkstoffbereiche in der Stoßstelle ab, bis die Stoßkraft die elastische Grenze erreicht hat. Beim weiteren Ansteigen der Stoßkraft kommt es in einem kritischen Punkt Z des Plattenmaterials zu ersten plastischen Verformungen, **Bild 2-6**.



**Bild 2-6:** Plastische Verformungen während des Stoßes [229]

- a) Beginn des plastischen Fließens
- b) Fließen des Materials nahe der Stoßstelle

Eine von TIMOSHENKO und GOODIER [229] durchgeführte Analyse zeigte, daß sich der kritische Punkt Z nach Bild 2-6 bei einem Stoßkörper mit runder Auftrefffläche in einem Abstand von rund  $\frac{1}{4}$  des Kontaktkreisdurchmessers  $D_s$  unter dem Mittelpunkt der Berührungsfläche im Plattenmaterial befindet. In diesem Punkt wird die Elastizitätsgrenze überschritten, wenn

$$p_m \approx 1,1 \sigma_F \quad (2.1)$$

mit:  $p_m$  : mittlerer Druck in der Stoßstelle und  
 $\sigma_F$  : Fließgrenze des Plattenmaterials

beträgt.

In diesem Stadium verhält sich das Plattenmaterial in der Umgebung vom Punkt Z plastisch und fließt irreversibel. Das Material außerhalb dieses Gebietes hat noch nicht den plastischen Zustand erreicht und seine Deformation ist im wesentlichen elastisch.

Mit zunehmender Stoßkraft dehnt sich das Gebiet der plastischen Verformung um den Punkt Z schnell aus, so daß auch das Material in der Umgebung der Stoßstelle zu fließen beginnt. Gleichzeitig wirkt der Plattenwerkstoff im plastischen Bereich einem weiteren Ansteigen der Stoßkraft mit einem konstanten Widerstand entgegen. Beim Erreichen des Stoßkraftmaximums hat die Normalgeschwindigkeit des in das Plattenmaterial eindringenden Stoßkörpers den Wert Null. Zu diesem Zeitpunkt endet auch die Kompressionsphase. Während der anschließenden Restitutionsphase geht die Deformation ganz oder teilweise zurück und die reversibel gespeicherte elastische Energie wird in Form einer senkrecht zur Plattenoberfläche wirkenden Kraft über den elastischen Rückverformweg wieder freigesetzt. Dadurch erhält der Stoßkörper eine Bewegung, die der Bewegung vor dem Stoß entgegengerichtet ist.

### **Werkstoffverhalten bei hochdynamischer Belastung**

Das Verhalten von Werkstoffen bei hochdynamischer Belastung weicht in erheblichem Maße vom Verhalten unter quasi-statischer Belastung ab. Steigende Verformungs- bzw. Dehnungsgeschwindigkeiten führen tendenziell zu einem Verschieben

der quasi-statischen Referenzfließkurve zu einer höheren Lage innerhalb des Spannungs-Dehnungs-Diagramms [26, 30, 74, 75, 77, 84, 102, 136, 242].

Auch das Bruchverhalten bei hochdynamischer Belastung unterscheidet sich von dem im quasi-statischen Belastungsfall. Anstatt eines duktilen Bruches des Materials ist eine Veränderung in Richtung Sprödbbruch zu erkennen [26, 27, 75, 138, 164, 199].

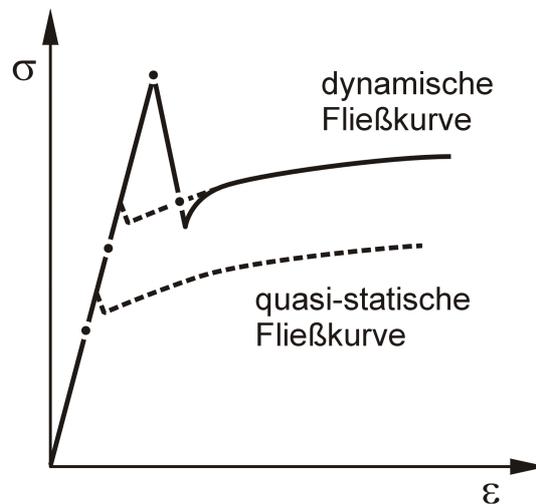
In Metallen beruht die plastische Verformung auf der Bewegung und Erzeugung von Versetzungen sowie auf deren Wechselwirkung mit Hindernissen [198]. Zum Überwinden von Versetzungshindernissen sind athermische und thermisch aktivierte Spannungen notwendig, deren Summe die Fließspannung  $\sigma_f$  ergeben:

$$\sigma_f = \sigma_a + \sigma_t \quad (2.2)$$

mit:  $\sigma_a$  : athermischer Spannungsanteil und  
 $\sigma_t$  : thermisch aktivierter Spannungsanteil.

Athermische Spannungen resultieren aus der Behinderung der Versetzungsbewegung durch Korngrenzen und gelöste Fremdatome [126]. Hier besteht nur ein geringer Einfluß von Temperatur und Dehnungsgeschwindigkeit. Thermisch aktivierte Spannungen ergeben sich bei der Überwindung von Unebenheiten in der Gleitebene oder bei der Kreuzung mit Waldversetzungen [29]. Dabei helfen Bewegungen von Atomen, die thermisch angeregt wurden. Außer von der Temperatur sowie der Gefügestruktur ist der thermisch aktivierte Fließspannungsanteil in starkem Maße von der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  abhängig.

Ein Erhöhen der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  impliziert eine kürzere Wartezeit der Versetzungen vor den Hindernissen bzw. eine geringe Wahrscheinlichkeit der Mitwirkung thermischer Einflüsse beim Überwinden der Versetzungshindernisse. Dadurch kann die äußere Belastung nicht vollständig durch Abgleitvorgänge im Gitter abgebaut werden. Konsequenz ist eine im Vergleich zu quasi-statischer Belastung auftretende Erhöhung der Streck- bzw. Fließgrenze sowie der Fließspannung im ausgebildeten plastischen Zustand [136], **Bild 2-7**.



**Bild 2-7:** Vergleich der quasi-statischen und dynamischen Fließkurve von Metallen [136]

Nach [30, 74, 77] liegen verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten verschiedene dominante Versetzungsmechanismen zugrunde. Während bei Dehnungsgeschwindigkeiten bis etwa  $\dot{\epsilon} < 10^3 \text{ s}^{-1}$  vorwiegend athermische und thermisch aktivierte Prozesse vorherrschen, dominieren bei Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} \geq 10^3 \text{ s}^{-1}$  Dämpfungsprozesse infolge Energiedissipation von schnell bewegten Versetzungen durch die Wechselwirkung mit der Gitterstruktur [30]. Für Werkstoffbelastungen bei Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} \geq 10^3 \text{ s}^{-1}$  wird daher zu den athermischen und thermisch aktivierten Anteilen der Fließspannung  $\sigma_f$  noch ein geschwindigkeitsgedämpfter Anteil  $\sigma_d$  hinzuaddiert:

$$\sigma_f = \sigma_a + \sigma_t + \sigma_d \quad (2.3)$$

mit:  $\sigma_a$  : athermischer Spannungsanteil,  
 $\sigma_t$  : thermisch aktivierter Spannungsanteil und  
 $\sigma_d$  : geschwindigkeitsgedämpfter Spannungsanteil.

Materialgesetze, die das Verhalten von Metallen unter hochdynamischer Beanspruchung beschreiben, gehen meist von einer statischen Referenzfließkurve aus, die dehnungsgeschwindigkeitsabhängig zu einer höheren Lage innerhalb des Span-

nungs-Dehnungs-Diagramms verschoben wird. Ausgangspunkt ist die klassische *Ludwik*-Gleichung [124] in logarithmischer Darstellung:

$$\sigma_f = \sigma_{fo}(\varepsilon) + A(\varepsilon) \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}}\right) \quad (2.4)$$

- mit:  $\sigma_f$  : Fließspannung,  
 $\sigma_{fo}$  : Fließspannung bei Fließbeginn als Referenz,  
 $A(\varepsilon)$  : dehnungsabhängiger Materialparameter,  
 $\dot{\varepsilon}_{pl}$  : mittlere plastische Dehnungsgeschwindigkeit und  
 $\dot{\varepsilon}$  : Dehnungsgeschwindigkeit bei Fließbeginn als Referenz.

Durch die Berücksichtigung der Fließbedingung nach VON MISES kann die Gleichung (2.4) auch in Abhängigkeit von der Schubspannung und der Scherdehnung angegeben werden:

$$\dot{\gamma}_{pl} = \dot{\gamma}_o \cdot \exp\left[\left(\frac{\tau_f}{\tau_{fo}} - 1\right) \cdot C^{-1}\right] \quad (2.5)$$

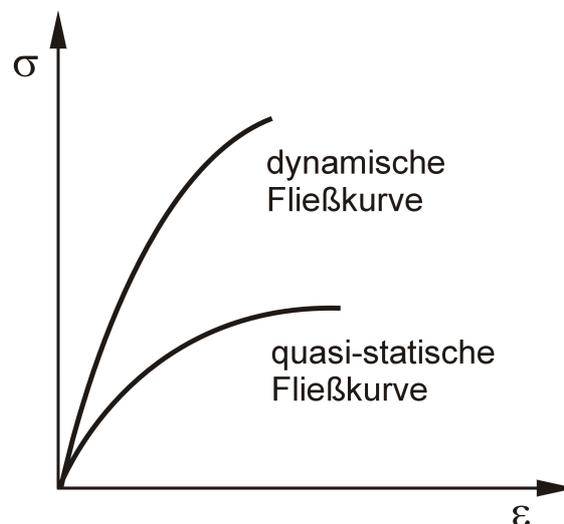
- mit:  $\dot{\gamma}_{pl}$  : plastische Verzerrungsgeschwindigkeit,  
 $\dot{\gamma}_o$  : Verzerrungsgeschwindigkeit bei Fließbeginn,  
 $\tau_f$  : Schubspannung,  
 $\tau_{fo}$  : Schubspannung bei Fließbeginn als Referenz und  
 $C$  : dehnungsgeschwindigkeitsabhängiger Materialparameter.

JOHNSON und COOK [88] verwendeten die Gleichung (2.5) bei ballistischen Prallversuchen. Die konstitutiven Materialparameter wurden dazu aus experimentellen Ergebnissen von Torsionstests berechnet [89].

Als Sichtscheibenmaterial werden in Sichtfenstern trennender Schutzeinrichtungen thermoplastische Kunststoffe eingesetzt. Diese zeigen bei hochdynamischer Beanspruchung ein im Vergleich zu Metallen ausgeprägtes viskoelastisches Verhalten, das heißt die auftretenden Deformationen sind teils elastischer (reversibler), teils viskoser (irreversibler) Natur [34]. Neben einer energie-elastischen Verformung infolge Aufweitens der Bindungsabstände bzw. einer Veränderung der Valenzwinkel tritt eine entropie-elastische Verformung durch das bei äußerer Belastung auftretende Ausrichten der Makromoleküle in eine thermodynamisch günstigere Position ein [200].

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze werden größere irreversible molekulare Abgleitprozesse ausgelöst, die gleichzeitig Ursprung für die Bildung von Fließzonen sind [195]. Unter Fließzonen werden planare Inhomogenitäten in einem hochpolymeren Material verstanden, die als ein fibrillenartiges Netzwerk von stark verstreckten Polymerbereichen charakterisiert werden können [11]. Hohe plastische Deformationen führen zu einer starken Aufweitung bzw. Vereinigung der in der Fließzone befindlichen Mikrohohlräume. Bei Überschreiten einer kritischen Größe kommt es dabei zur Bildung von ersten Rissen in der Fließzonenmaterie [164].

Neben einer Verlagerung der statischen Fließkurve hin zu höheren Lagen innerhalb des Spannungs-Dehnungs-Diagramms, **Bild 2-8**, führt auch bei Kunststoffen die Erhöhung der Dehnungsgeschwindigkeit zu einer Veränderung des Bruchverhaltens.



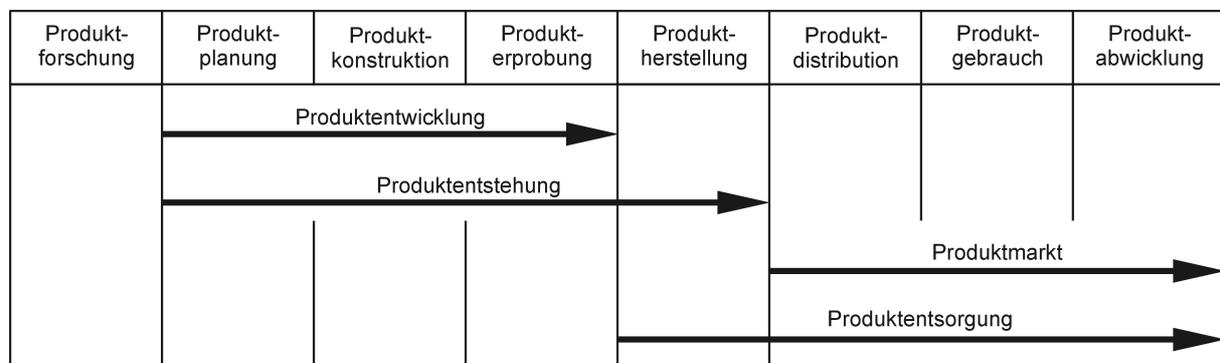
**Bild 2-8:** Quasi-statische und dynamische Fließkurve thermoplastischer Kunststoffe

Bei niedrigen Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} < 10^2 \text{ s}^{-1}$  tritt Bruchversagen in thermoplastischen Kunststoffen erst nach einer ausgeprägten Fließzonenbildung auf. Mit steigender Dehnungsgeschwindigkeit nimmt die Tendenz zur Fließzonenbildung allerdings ab. Bei Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} > 10^2 \text{ s}^{-1}$  wird überhaupt keine Fließzonenbildung mehr vor dem Bruch beobachtet. In diesem Fall entwickelt sich aus den ersten submikroskopischen Rissen in der Fließzonenmaterie sehr schnell eine makroskopische Bruchfläche [21, 26, 75, 138, 164]. HENKHAUS [75] führt dieses Phänomen auf die Einschränkung von Relaxationsmechanismen im Material zurück.

## 2.2 Produktentwicklung

### 2.2.1 Definition der Produktentwicklung

Produktentwicklung ist der Prozeß des Gestaltens eines, bezogen auf die Marktbefürfnisse geeigneten Produktes und dessen Herstellungsprozesses [39, 103, 202, 206, 224]. Die Produktentwicklung kann in die Einzelschritte *Produktplanung*, *Produktkonstruktion* einschließlich *Produktionsvorbereitung* und *Produktprüfung* gegliedert werden [212], **Bild 2-9**.



**Bild 2-9:** Einordnung der Produktentwicklung [212]

Die Produktplanung umfaßt alle Aufgaben, die marktbezogen zu einer Festlegung des Gestaltungsrahmens für ein herzustellendes Produkt gehören und die zur Abwicklung der Produktentwicklung organisatorisch erforderlich sind [245]. In der Produktplanungsphase geschieht die gedankliche Vorwegnahme und Systemkonfiguration des angestrebten Produktverhaltens [265]. Daran schließt die Produktkonstruktionsphase an, in der für ein vorgegebenes Problem sowohl die Entwicklung und

Gestaltung einzelner Teile als auch deren Zusammensetzung zu einem Ganzen erfolgt. Die Vorbereitung der technologischen Umsetzung von Rohteilen in Fertigteile wird in der Produktionsvorbereitung durchgeführt. Die Produktentwicklung wird mit der Produkterprobungsphase abgeschlossen. In dieser Phase erfolgt die Fertigung und Erprobung eines oder mehrerer Prototypen.

Während der Produktentwicklung wird zwischen Tätigkeiten gewechselt, die die Gestaltung des Produktes bzw. die Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses zur Zielsetzung haben [202]. Gestaltungsentscheidungen, die das Produkt als Gestaltungsgegenstand betreffen, werden unter dem Begriff *Produktgestaltung* zusammengefaßt, Gestaltungsentscheidungen, die den Produktentwicklungsprozeß selbst betreffen, unter dem Begriff *Prozeßgestaltung*.

### **Produktgestaltung**

Im Rahmen der Produktgestaltung wird ausgehend von einer meist abstrakten Aufgabenbeschreibung und einer Reihe von Randbedingungen, die die Funktionserfüllung, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit des Produktes betreffen, ein technisches System entwickelt, das diese Aufgabe optimal erfüllt. Um die Abläufe beim Konstruieren von technischen Produkten zu systematisieren und damit die Lösungsfindung zu erleichtern, wurden frühzeitig Konstruktionsrichtlinien erarbeitet und in der Folgezeit stetig weiterentwickelt.

Als Ausgangspunkt der heutigen Konstruktionsmethodiken gelten die Arbeiten von PAHL und BEITZ [14, 168], ROTH [187, 188], RODENACKER [185], KESSELRING [92] sowie BISCHOFF und HANSEN [20]. Die Weiterentwicklung dieser Ansätze hat zu den Konstruktionsmethodiken in der heutigen Form geführt. Am häufigsten werden in der Literatur die Konstruktionsmethodiken nach PAHL und BEITZ [168], ROTH [188], RODENACKER [185], HANSEN [70], HUBKA [82], EHRENSPIEL [38], KOLLER [99] sowie SUH [223] genannt.

Gemeinsam ist allen Methodiken, daß die konstruktive Gesamtaufgabe systematisch in Teilprobleme zerlegt wird und sich der Konstruktionsprozeß in aufeinander aufbauende Phasen gliedert, die jeweils Beurteilungs- und Entscheidungsvorgänge beinhalten. Unterschiede sind vor allem in der Terminologie und in den Arbeitsinhalten der einzelnen Konstruktionsphasen zu erkennen.

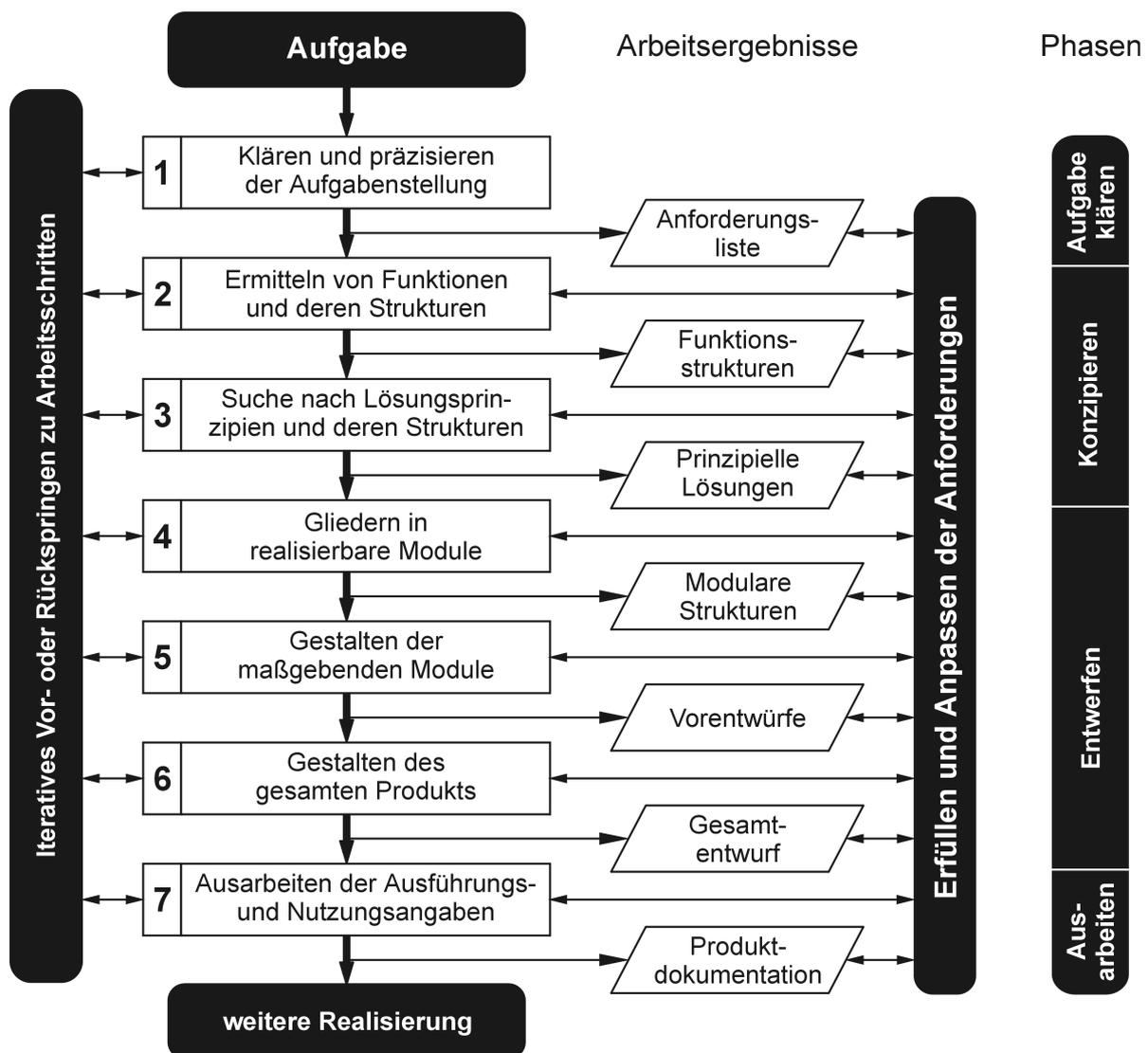
Die Erkenntnisse der unterschiedlichen Konstruktionsschulen wurden in der VDI-RICHTLINIE 2221 [266] zusammengefaßt. Diese stellt somit den aktuellen Stand der Konstruktionsmethodik dar, **Bild 2-10**. Nach VDI-RICHTLINIE 2221 wird der Konstruktionsprozeß in die Hauptphasen *Aufgabe klären*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* unterteilt.

Die *Aufgabenklärung* in der ersten Konstruktionsphase erfolgt unter Zugrundelegung des Lastenheftes und dient zur Festlegung und Präzisierung der Konstruktionsaufgabe. Die aus der Produktplanung resultierenden bzw. vom Kunden vorgegebenen Anforderungen werden konkretisiert und in Form eines Pflichtenheftes bzw. einer Anforderungsliste dokumentiert. Veränderte Randbedingungen oder neue Erkenntnisse führen zu einer Anpassung bzw. Ergänzung der Anforderungsliste.

In der Phase *Konzipieren* erfolgt das Festlegen der prinzipiellen Lösung durch das Aufstellen von Funktionsstrukturen und die Suche nach geeigneten Wirkprinzipien sowie deren Kombination in einer Wirkstruktur. Dazu wird die Gesamtfunktion in mehrere überschaubare Teilfunktionen gegliedert und den einzelnen Teilfunktionen werden Wirkprinzipien zugeordnet. Ergebnis der Konzeptionsphase ist eine Prinzipskizze der gewählten Lösung.

Die Definition der Produktstruktur durch Gliederung der Prinziplösung in realisierbare Module, Baugruppen und Elemente sowie das Festlegen von Geometrie, Werkstoff und technologischen Daten der Bauteile erfolgt in der Phase *Entwerfen*. Hier werden die in der Konzeptionsphase ermittelten Konstruktionsgrößen und wirkstrukturellen Zusammenhänge auf der Basis von Gestaltungsprinzipien und -regeln realisiert. Der in dieser Phase entstehende maßstäbliche Entwurf der Konstruktionslösung wird abschließend technisch-wirtschaftlich bewertet.

In der Phase *Ausarbeiten* werden die grob gestalteten Baugruppen und Einzelteile detailliert und optimiert. Arbeitsergebnis dieser Phase ist die Produktdokumentation, die neben Einzelteil- und Zusammenstellungszeichnungen auch Stücklisten, Betriebsanleitungen und Benutzerhandbücher umfassen kann.

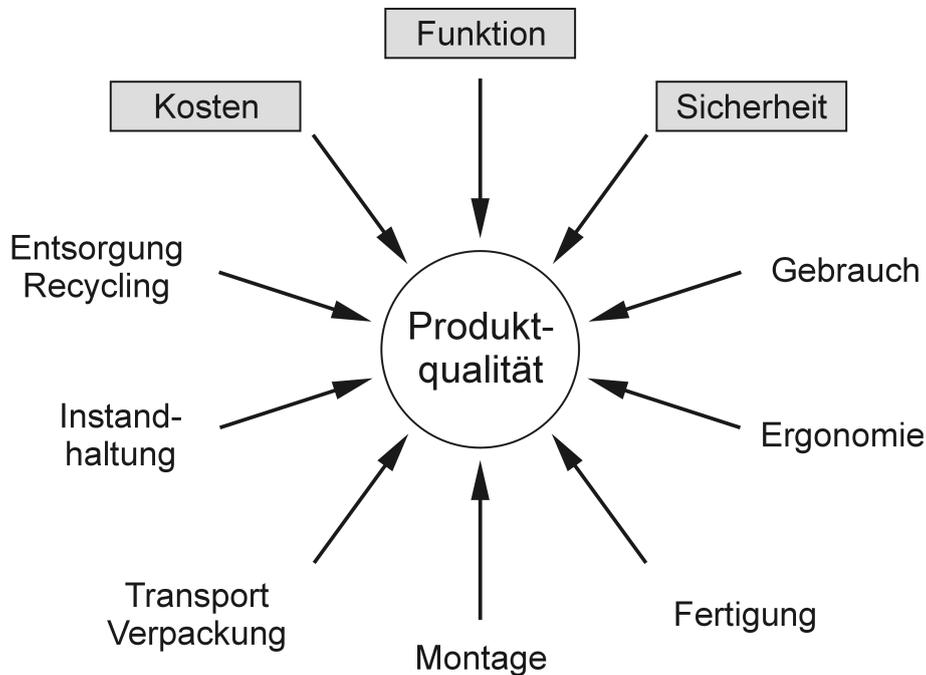


**Bild 2-10:** Konstruktionsablauf nach VDI-RICHTLINIE 2221 [266]

Während des Konstruktionsprozesses sind eine Vielzahl von sich wechselseitig beeinflussenden Gestaltungszielen zu berücksichtigen. Neben den generellen Gestaltungszielen

- Funktionserfüllung,
- wirtschaftliche Realisierung und
- Einhaltung von Sicherheit für Mensch und Umgebung,

unterliegt die Lösung technischer Aufgaben auch Gestaltungszielen, die sich aus den unterschiedlichen Anforderungsbereichen ergeben, **Bild 2-11**.

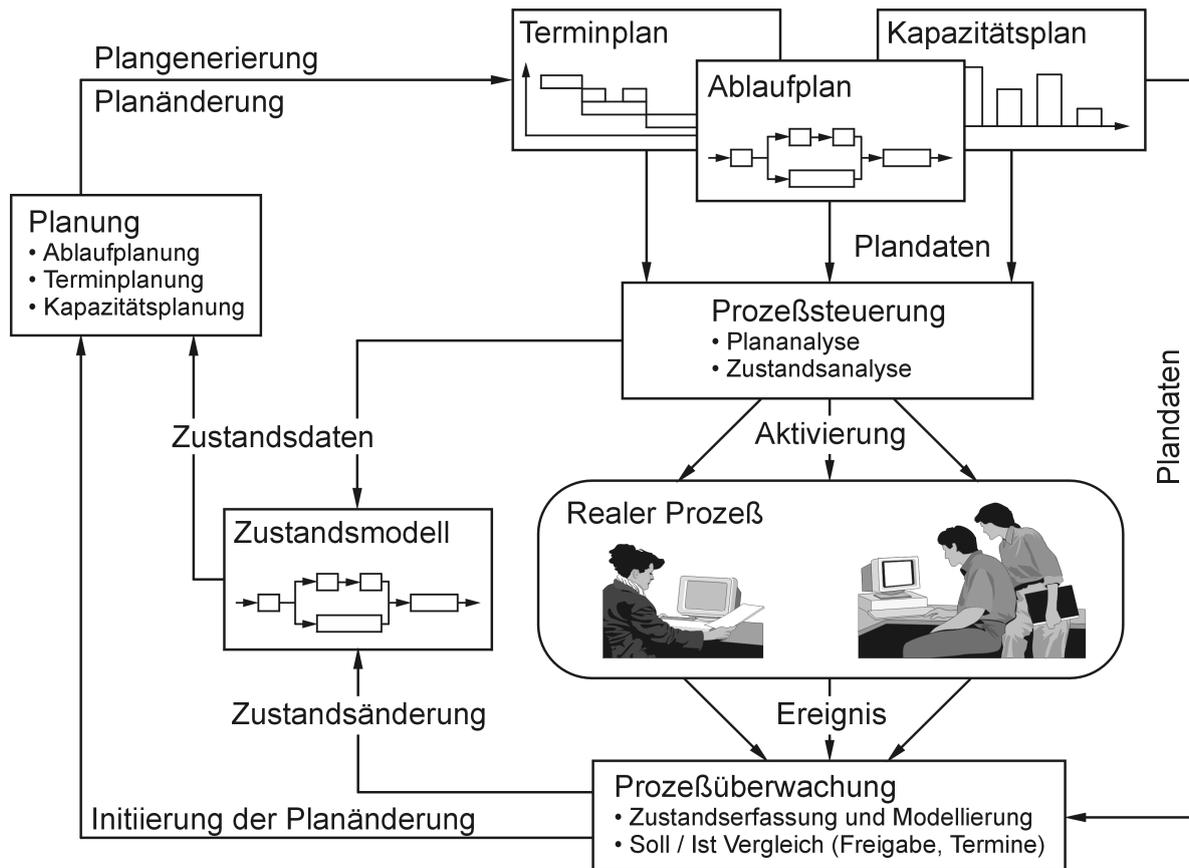


**Bild 2-11:** Anforderungsbereiche der Produktentwicklung [168]

Gestaltungsrichtlinien bzw. -regeln helfen, den jeweiligen Zielen gerecht zu werden. Es wird in diesem Zusammenhang auch von *x-gerechter Konstruktion* gesprochen, wobei das *x* für Ergonomie, Fertigung, Montage, Instandhaltung, Recycling usw. steht [168]. Aufgabe von Gestaltungsrichtlinien zur ergonomiegerechten Konstruktion ist es, den Konstrukteur bei der Integration von den die Bedürfnisse des Menschen berücksichtigenden Anforderungen zu unterstützen [197, 268, 269]. Im Rahmen der fertigungs- und montagegerechten Konstruktion erfolgt die Produktentwicklung unter Berücksichtigung von Anforderungen, die sich aus dem Fertigungs- und Montageprozeß ergeben [6, 7, 15, 57, 186, 230]. Ziel einer instandhaltungsgerechten Konstruktion ist es, durch konstruktive Maßnahmen die Verfügbarkeit technischer Systeme zu sichern bzw. zu erhöhen [85, 96, 142]. Eine steigende Bedeutung der Produktentsorgung hat darüber hinaus in den letzten Jahren zu einer verstärkten Einbeziehung von Erfordernissen der recyclinggerechten Produktgestaltung geführt [32, 90, 112, 149, 241, 244, 270].

## Prozeßgestaltung

Im Rahmen der Prozeßgestaltung erfolgen Planung, Steuerung und Überwachung des Produktentwicklungsprozesses [202, 212, 243], **Bild 2-12**.



**Bild 2-12:** Planung, Steuerung und Überwachung von Produktentwicklungsprozessen [212]

Die Prozeßplanung umfaßt die Ablaufplanung, die Terminplanung und die Kapazitätsplanung [212]. Gegenstand der Ablaufplanung ist die Gliederung des Gesamtprozesses in einzelne Aktivitäten und die Definition der Ablaufstruktur durch Festlegung von Reihenfolgebeziehungen. Unter Zugrundelegung der Ablaufplanung erfolgt die Terminplanung, deren Aufgabe es ist, die Gesamtdauer bzw. den Endtermin, den kritischen Pfad und die Pufferzeiten zu ermitteln. Die mengen- und zeitgerechte Zuordnung von Mitarbeitern sowie Anwendungssystemkapazitäten erfolgt in der Kapazitätsplanung. Dabei wird das Ziel verfolgt, einerseits eine termingerechte Bearbei-

tung des Gesamtprozesses und andererseits eine gleichmäßige Auslastung der Ressourcen zu ermöglichen.

Aufgabe der Prozeßsteuerung und –überwachung ist es, die Durchführung des Prozesses auf der Grundlage der Ablauf-, Termin- und Kapazitätsplanung zu gewährleisten [212]. Im Rahmen der Prozeßsteuerung erfolgt die Aktivierung der ausführbaren Aktionen, entweder durch die Benachrichtigung des Bearbeiters oder durch das Starten entsprechender Funktionalitäten, wie beispielsweise der Produktentwicklungswerkzeuge. Die Prozeßüberwachung erfaßt die Anfangs- und Endzeitpunkte sämtlicher Aktionen und leitet bei gegebenenfalls festgestellten Terminabweichungen korrigierende Maßnahmen ein.

### **2.2.2 Optimierung der Produktentwicklung**

Eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Optimierung der Produktentwicklung kann nicht formuliert werden [23]. Jedoch bietet neben der Umsetzung neuer Managementstrukturen die Optimierung der Prozeßorganisation [43] und die Virtualisierung der Produktentwicklung [97, 153, 207] ein erhebliches Potential zur Leistungssteigerung.

#### **Prozeßorganisation**

In den letzten Jahren sind eine Vielzahl neuartiger Organisationsstrategien für die Produktentwicklung entstanden, die das gemeinsame Ziel verfolgen, durch eine parallele und zeitgleiche Anordnung von Arbeitsschritten des Produktentwicklungsprozesses die Qualität des Produktes zu erhöhen und die Innovationszeiten und -kosten drastisch zu reduzieren. Neben Bezeichnungen wie *Rapid Product Development* [25], *Reverse Engineering* [80] und *Integrierte Produkterstellung* [40, 121] wurden in diesem Zusammenhang insbesondere Begriffe wie *Simultaneous Engineering* [42, 43] bzw. *Concurrent Engineering* [171] sowie *Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung* [47] eingeführt.

Der Begriff des Simultaneous Engineering (SE) kann hierbei mit dem im angelsächsischen Sprachgebrauch verwendeten Begriff *Concurrent Engineering* (CE) gleichgesetzt werden. Wörtlich übersetzt bedeutet *Simultaneous* oder *Concurrent Engineering* die „simultane, gleichzeitige Ingenieurarbeit“. Angestrebt wird eine zeitli-

che Parallelisierung bzw. Überlappung von Aktivitäten während des Produktentwicklungsprozesses. SARETZ [193] und LAUFENBERG [118] stellten fest, daß SE bzw. CE je nach Hintergrund der jeweiligen Autoren als Methode [18], Leitkonzept [104], Organisationsstrategie [43, 111], Integrationsansatz [23, 40] und Unternehmensphilosophie [196] bezeichnet werden kann. Gemeinsame übergreifende Zielsetzung der einzelnen Ansätze ist jedoch, durch die Parallelisierung von Aktivitäten die Frist bis zur Einführung des Produktes („time to market“) zu verkürzen, die Produkt- und Prozeßqualität im umfassenden Sinn zu verbessern und die Entwicklungs- und Herstellkosten zu verringern [118, 193].

Bedeutungsgleich mit den Begriffen des *Simultaneous* bzw. *Concurrent Engineering* wird in den meisten Fällen der Begriff *Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung* verwendet [246]. Ansätze, bei denen die Bedeutung der integrierten Produkt- und Prozeßgestaltung über die Definition des *Simultaneous* bzw. *Concurrent Engineering* hinausgehen, berücksichtigen zusätzlich die Gestaltung der Produkt- und Datenschnittstellen [47].

## Virtualisierung

Unter Virtualisierung wird die methodische Überführung eines Entwicklungsprozesses in einen rechnerintegrierten Ablauf mit gleichzeitiger Darstellungsmöglichkeit des wirklichen Verhaltens der zu entwickelnden Objekte verstanden [207]. Ziel ist es, die Prozeßkette der Produktentwicklung mit den Phasen *Produktplanung*, *Konzeption*, *Design*, *Konstruktion* und *Arbeitsplanung* ganzheitlich durch den Einsatz von leistungsfähigen Rechnersystemen zur Prozeß- und Produktgestaltung zu unterstützen.

Wesentlicher Aspekt der virtuellen Produktentwicklung ist das Erzeugen eines virtuellen bzw. digitalen Prototyps, der durch Eigenschaften gekennzeichnet ist, die dem wirklichen Verhalten entsprechen [97, 212]. Sämtliche Produktdaten, die für die Produktentstehung sowie alle Folgephasen relevant sind, werden dabei in Form eines *Integrierten Produktmodells* [3, 60, 61, 109, 140, 190] oder eines *Digitalen Masters* [108] abgebildet. Zum Erzeugen, Bearbeiten und Nutzen des Produktdatenmodells stehen eine Vielzahl von Rechnerwerkzeugen zur Verfügung.

Zentrales Werkzeug zur Unterstützung der Aufgabenbearbeitung während der Produktentwicklung sind 3D-CAD-Systeme. Diese haben sich ausgehend von rein geo-

metrieorientierten Systemen mittlerweile zu frei konfigurierbaren Konstruktionsumgebungen mit integrierter Visualisierungs-, Simulations- und Berechnungsfunktionalität weiterentwickelt [212]. Ein weiteres Kennzeichen von CAD-Systemen neuerer Generation ist die Möglichkeit der featurebasierten Modellierung [110, 166]. Unter Features werden Objekte verstanden, die aus einem geometrischen und einem semantischen Anteil bestehen [105, 183]. Der geometrische Anteil beschreibt die geometrische Ausprägung bzw. die Gestalt eines Feature, der semantische Anteil enthält nichtgeometrische Informationen, wie beispielsweise Angaben zu Strukturen oder technologischen Daten. Durch die einheitliche Beschreibung geometrischer und nichtgeometrischer Produktinformationen mit Hilfe der Feature-Technologie ist es möglich, einerseits sämtliche prozeßrelevanten Bereiche datentechnisch miteinander zu verknüpfen und Informationen zwischen diesen Bereichen nahezu verlustfrei auszutauschen, andererseits schon frühzeitig die aus den späteren Produktentwicklungsphasen resultierenden Einschränkungen und Wechselwirkungen in den konzeptionellen Phasen zu berücksichtigen.

Bei der Auslegung von Baugruppen oder Bauteilen wird der Produktentwickler durch Berechnungs- und Optimierungsprogramme unterstützt. Berechnungsprogramme, wie zum Beispiel FEM-Systeme, dienen zur Berechnung von Kraft- und Spannungsverläufen oder zur Darstellung von statischen und dynamischen Verformungen, Optimierungsprogramme werden eingesetzt, wenn bestimmte Größen Extremwerte oder definierte Zielwerte annehmen sollen [234].

Durch den Einsatz von Simulationssystemen ist man in der Lage, sehr früh qualitative und quantitative Aussagen über das Betriebsverhalten eines Produktes zu treffen [214]. Neben Kinematiksimulationen zur Überprüfung des Kollisionsverhaltens sowie Analysen über die während des Betriebes auftretenden Belastungen bieten Simulationssysteme schon frühzeitig die Möglichkeit, eine Abschätzung der Fertigungszeiten vorzunehmen. Dadurch wird der Umfang kostenintensiver und zeitraubender Untersuchungen an realen Prototypen reduziert [214].

Auch wissensbasierte Systeme werden in der virtuellen Produktentwicklung, insbesondere in der Konstruktion, seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt [181]. Unter wissensbasierten Systemen werden Systeme verstanden, die die Möglichkeit bieten, Wissen zu verarbeiten, um einen Lösungsweg zu finden [213]. Der Kern wissensbasierter Systeme ist eine Wissensbasis, in die fachspezifisches Wissen abgebildet

wird und die Grundlage für die Funktionsfähigkeit der weiteren Systemkomponenten ist. Eine Problemlösungskomponente bestimmt, auf welche Weise das fachspezifische Wissen zur Problemlösung verwendet werden soll, eine Erklärungskomponente begründet die vom System getroffenen Entscheidungen und macht somit den Problemlösungsprozeß durchschaubar.

Neben Rechnerwerkzeugen zur Unterstützung der Produktgestaltung ist eine Leistungssteigerung in der Produktentwicklung nur durch den parallelen Einsatz von Systemen zur Gestaltung und Optimierung des Entwicklungsprozesses sowie zum Datenmanagement zu erreichen [212].

Zur Unterstützung der Prozeßgestaltung wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Anwendungssystemen entwickelt. Ein typisches Beispiel sind Workflow-Management-Systeme. Ziel dieser Systeme ist die Abbildung und Organisation der wertschöpfenden Kernprozesse im Unternehmen sowie ihre Optimierung in Bezug auf Zeit, Qualität und Kosten [48, 71, 79]. Unter dem Begriff *Workflow* wird dabei ein abgrenzbarer, meist arbeitsteiliger Prozeß bezeichnet, der einzelne Aufgaben bzw. Aktivitäten zu einem Ablauf verbindet und definiert, wer welche Aufgabe mit welchem Mittel und welchen Informationen durchführt [67, 72]. Durch den Einsatz von Workflow-Management-Systemen ist ein zeitlich versetztes und örtlich getrenntes Bearbeiten von durchgängigen Prozessen möglich. Neuere Softwareentwicklungen unterstützen Workflow-Management-Systeme bei der Suche nach Schwachstellen und Optimierungspotentialen von Prozeßabläufen im Sinne der kontinuierlichen Verbesserung [174].

Eine effiziente Unterstützung des Datenmanagements bieten marktgängige Product Data Management Systeme (PDM-Systeme) bzw. Engineering Data Management Systeme (EDM-Systeme). Typischerweise verfügen moderne PDM- bzw. EDM-Systeme über Funktionen zur Verwaltung, Verteilung und Steuerung von Produktdaten unterschiedlicher Soft- und Hardware-Systeme, zur Modellierung von Freigabeprozessen und zur Organisation von Schnittstellen zwischen der PDM-/EDM-Datenbank und anderen Anwendungen [212]. Zukünftige PDM-/EDM-Architekturen werden die Leistungsmerkmale der PDM-/EDM- und Workflow-Management-Systeme miteinander kombinieren [79].

### 2.2.3 Konstruktionsumgebungen und -systeme

Zur ganzheitlichen Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses im Sinne der VDI-RICHTLINIE 2221 [266] wurden bzw. werden eine Vielzahl leistungsfähiger Softwaresysteme entwickelt. Nachfolgend erfolgt die Beschreibung realisierter Ansätze unter besonderer Berücksichtigung der Verknüpfung von einzelnen Rechnerwerkzeugen zu integrierten Konstruktionsumgebungen bzw. -systemen.

Ein rechnerintegrierter Konstruktionsarbeitsplatz für die bereichsübergreifende Zusammenarbeit von Konstruktion, Berechnung und Montageplanung wurde von EHRLENSPIEL et al. [41, 120] konzipiert und prototypisch realisiert. Dieser verknüpft Rechnerwerkzeuge, wie Berechnungsprogramme oder ein featurebasiertes CAD-System, basierend auf einer gemeinsamen Produktdatenhaltung in Form eines Produktmodells. Zur Abbildung der Entwicklungsprozeßlogik bzw. Dokumentation des Ablaufs der Produktentwicklung wurde ein grafischer Editor entwickelt, der Prozeßinformationen, wie beispielsweise Angaben zum Inhalt bzw. zur Dauer einer Aktivität sowie Informationen über aktivitätsausführende Personen, nach inhaltlichen und logischen Gesichtspunkten zu einem semantischen Netz verbindet.

Zentraler Bestandteil eines von EVERSHEIM und BAUMANN [10, 45] entwickelten konfigurierbaren Konstruktionssystems ist ein Konstruktionsmanagementmodul, das die Abbildung von Operationsstrukturen sowie die kontextsensitive Bereitstellung aller wichtigen CAD-Funktionen und aufgabenspezifischer Programmbausteine ermöglicht. Für den Systemanwender eröffnet sich damit die Möglichkeit, das System nach seinen Anforderungen zu konfigurieren, um die gewünschte Systemunterstützung zu erhalten. Sämtliche, während des Konstruktionsprozesses anfallenden geometrischen und technologischen Daten werden in das Produktmodell des Konstruktionssystems abgebildet.

Ziel des Sonderforschungsbereiches 203 „Rechnerunterstützte Konstruktionsmodelle im Maschinenwesen“ an der TU Berlin [16] war es, eine durchgängige Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses zu ermöglichen. Im Rahmen von Teilprojekten wurde ein Konstruktionsanalyse- und -leitsystem (KALEIT) [51], ein Normenbereitstellungssystem (NOBES) [16], ein System zur Gestaltung von Konstruktionselementen (GEKO) [9] sowie ein System zur Wissensbearbeitung (WIKON) [62] entwickelt. Kern des Ansatzes ist das Rahmensystem KALEIT, das aus vier Modulen besteht: Einem Aufgabeanalyseprozessor, einem Lösungskordinationsprozessor, einem

Konstruktionsleitsystem und einem Speicherbereich. Neben der Planung des Ablaufes und damit der Reihenfolge notwendiger Konstruktionsschritte wird durch das Rahmensystem KALEIT auch die Koordinierung der Problemlösung unterstützt.

Ein Konstruktionssystem für den Einsatz in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase des Konstruktionsprozesses wird von FINKENWIRTH [52] beschrieben. Neben der Produktgestaltung und verarbeitungsgerechten Dokumentation von Konstruktionsergebnissen wird durch dieses System das Suchen und Beurteilen von konstruktiven Lösungen unterstützt. Funktion und Handhabung des Systems werden anhand der fertigungsgerechten Entwicklung von Dreh- und Biegeteilen demonstriert.

Eine weitere Konstruktionsumgebung wurde von FRANKE und PETERS [56] realisiert. Dieses Rechnerwerkzeug erlaubt ein quasiparalleles Arbeiten mit mehreren Werkzeugen unterschiedlicher Komplexität. Kern der Konstruktionsumgebung ist eine in sich konsistente, objektorientierte grafische Benutzeroberfläche, die branchen-, produkt- oder anwenderbezogen konfiguriert werden kann. Die Verwaltung der Daten innerhalb dieser Konstruktionsumgebung erfolgt mit Hilfe eines Datenmanagementmoduls.

Das von MEERKAMM, LÖFFEL und SCHWEIGER [130] beschriebene Konstruktionssystem *mfK* (*methodisches und fertigungsgerechtes Konstruieren*) soll den Produktentwickler in allen Phasen des Konstruktionsprozesses bei der Synthese und Analyse von Aufgabenstellungen unterstützen. Besonderes Merkmal dieses Systems ist die Bereitstellung eines Werkzeugkastens für Berechnungsverfahren, der diese in Abhängigkeit von einer bestimmten Disziplin und Konstruktionsphase bereitstellt.

OTTENBRUCH [165] realisierte ein Systemkonzept zur Rechnerunterstützung der Konzept- und Entwurfsphase des Produktentwicklungsprozesses. Das modular aufgebaute System besteht aus Standardkomponenten, wie einem marktgängigen CAD-Modellierer und Datenbanken, sowie aus eigenentwickelten Systembausteinen, wie beispielsweise einem Modul zur Verarbeitung von Norm-, Standard- und Zukaufteilen. Durch einen übergeordneten Steuerbaustein werden die Leistungen der unterschiedlichen Systemkomponenten miteinander koordiniert.

Aufbauend auf der Arbeit von OTTENBRUCH erweiterte DAHL [31] das System zu einem Konstruktionswerkzeug zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung. Dieses Werkzeug ist ebenfalls modular aufgebaut und besteht aus einem Basissystem sowie speziell für die montagegerechte Produktgestaltung notwendigen

Anwendungsmodulen. Die realisierte Datenbank enthält das Produktmodell, in dem die auf Technischen Elementen basierenden geometrischen, funktionalen und technologischen Informationen abgelegt sind. Mit Hilfe dieses Systems ist es möglich, aufbauend auf der im Basissystem definierten funktionsorientierten Produktstruktur eine montageorientierte Produktstruktur abzuleiten. Abschließend wird die konstruktive Lösung hinsichtlich Montagegerechtheit überprüft.

Das Konzept eines integrierten Systems zur Rechnerunterstützung des Produktentstehungsprozesses wird von VAJNA [233] beschrieben. Neben der Einbindung von leistungsfähigen heterogenen Modulen sowie Wissens- und Datenbanken unter einer gemeinsamen Benutzeroberfläche verfügt dieses Systemkonzept über ein Leitsystem zur Auftragsabwicklung und dynamischen Konfiguration von Systembausteinen.

In einer Reihe von Ansätzen sind darüber hinaus CAD- und Konstruktionssysteme mit wissensbasierten Systemen kombiniert worden [13, 49, 63, 94, 144, 182, 204]. BEHR [13] beschreibt ein wissensbasiertes Konstruktionssystem, das den vollständigen Entwurf und die Entwurfsbewertung von Spindel-Lager-Baugruppen in Werkzeugmaschinen unterstützt. In [63] wird die Kopplung eines featurebasierten CAD-Systems mit einem wissensbasierten System beschrieben. Aufgabe des wissensbasierten Teils ist dabei die Abbildung und Bereitstellung von Konstruktionswissen zu Getrieben, insbesondere von Wissen über die räumliche Anordnung der einzelnen Komponenten. KINZINGER [94] stellt am Beispiel der Lösung von Bewegungsaufgaben ein wissensbasiertes System vor, das über eine Programmierschnittstelle mit einem CAD-System verbunden ist. Die Kopplung eines Expertensystems mit einem CAD-System wird von EVERSHEIM, HUMBERGER und NEITZEL [49, 144] beschrieben. Prototypisch wurde das System zur Unterstützung der Konstruktion von Baukastenvorrichtungen realisiert. RICHTER [182] entwickelte eine wissensbasierte CAD-Systemkomponente zum Entwurf montagegerechter Produkte. SPECHT und KAUFMANN [204] beschreiben ein Assistenzsystem, das die Parallelisierung von semantischer und geometrischer Modellierung durch die Verknüpfung eines wissensbasierten mit einem CAD-System ermöglicht.

Darüber hinaus hat die rasante Entwicklung neuer Telekommunikations- und Netzwerktechnologien zu einer Reihe von Rechnerwerkzeugen geführt, die die verteilte, kooperative Produktentwicklung durch multimediale Werkzeuge wie Audio- und Videoübertragung unterstützen. Beispielhaft sei ein von KRAUSE und KIESEWET-

TER [93, 107] entwickelter und mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik ausgestatteter integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz erwähnt, der u.a. die Möglichkeit bietet, aus einem Featuremodellierer heraus Werkzeuge zur Generierung und Bearbeitung multimedialer Produktinformationen zu starten. Weitere, neue Telekommunikations- und Netzwerktechnologien nutzende Systeme werden in [4, 68, 78, 131] beschrieben.

Speziell zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen sind die nachfolgend aufgeführten Systeme realisiert worden.

BIANCHI et al. [19] beschreiben ein System zur Modellierung und Beurteilung von Hochgeschwindigkeitsfräsmaschinen, dessen Kern die Beurteilung des dynamischen Baugruppenverhaltens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ist.

Das Konzept eines Rechnersystems zur Entwicklung von Werkzeugmaschinen wird auch von JEDRZEJEWSKI et al. [86] erläutert. Im Rahmen dieses Ansatzes sollen dem Konstrukteur Methoden, Softwarebausteine und Prozeduren zur Komponentenauslegung sowie umfangreiches Wissen zur Gestaltung objekt- bzw. problemorientiert zur Verfügung gestellt werden.

MOON und KOTA [141] beschreiben einen methodischen Ansatz zur automatisierten Generierung von Werkzeugmaschinenvarianten. Ausgehend von einem Basiskonzept werden unter Nutzung einer Bauteilbibliothek sowie Anwendung mathematischer Beschreibungsgleichungen alternative Lösungen abgeleitet und hinsichtlich Funktionserfüllung und Wirtschaftlichkeit bewertet.

VAN BRUSSEL et al. [145] entwickelten ein Konstruktionssystem, mit dessen Hilfe dreiachsige Werkzeugmaschinen modelliert, analysiert und optimiert werden können. Neben einer Kollisionsbeurteilung erfolgt eine Analyse des Maschinenverhaltens während der Bearbeitungssimulation. Unter Anwendung genetischer Algorithmen werden die erzeugten Varianten hinsichtlich der Kriterien *Gewicht*, *statische Steifigkeit* und *dynamisches Verhalten* optimiert.

Zur Unterstützung der systematischen Entwicklung von Werkzeugmaschinen konzipierten PARK et al. [169] ein Konstruktionssystem, bestehend aus einer Wissensdatenbank mit Problemlösungskomponente, einem Volumenmodellierer mit Gestaltungs- und Entscheidungsmanager sowie einer Analysesoftware zur Beurteilung des

statischen und dynamischen Maschinenverhaltens. Die Funktionalität des Rechnersystems wurde am Beispiel der Entwicklung von Bearbeitungszentren demonstriert.

Ein weiterer, von REINHART et al. [132, 177] beschriebener Konstruktionsarbeitsplatz verknüpft leistungsfähige kommerzielle CAE-Werkzeuge zur Gestaltung und Berechnung von Maschinenbaugruppen und -bauteilen mit eigenentwickelten Programmmodulen, wie beispielsweise einem konstruktionsbegleitenden Kostenkalkulationssystem und einem Modul zur Planung und Optimierung der Installationstechnik.

SPUR und SANFT [191, 216] entwickelten ein Konstruktionssystem zur durchgängigen Produktentwicklung im Werkzeugmaschinenbau, das neben Auslegungsprogrammen für Werkzeugmaschinenkomponenten ein 3D-CAD-System sowie ein 3D-Simulationssystem unter einem zentralen Datenverwaltungssystem zusammenfaßt. Als Datenbasis wurde ein integriertes Produktmodell zugrundegelegt, in das alle während des Produktentwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen erzeugten Daten abgebildet werden.

WECK und REPETZKI [240] beschreiben eine weitere, auf einem integrierten Produktmodell basierende, objektorientierte Konstruktionsumgebung. Dieses Rechnerwerkzeug erlaubt die Integration verschiedenster Berechnungsverfahren für die Auslegung und Funktionssimulation einzelner Elemente wie auch des gesamten Produktes. Zur ganzheitlichen rechnerinternen Simulation mechatronischer Produkte wurde die Konstruktionsumgebung zu einem integrierten Konstruktionsarbeitsplatz ausgebaut, bestehend aus Berechnungswerkzeugen für Maschinenelemente, einem CAD-System, einem FEM-System, regelungstechnischen Systemen sowie Mehrkörper-simulationsprogrammen zur Durchführung von Bewegungsdynamikanalysen [235, 236].

**Bild 2-13** faßt das Ergebnis der Systemanalyse zusammen. Gemeinsame Zielsetzung vieler Forschungsaktivitäten im Bereich der rechnerunterstützten Konstruktion technischer Erzeugnisse ist es, die Prozeßkette der Produktentwicklung, von der Geometrieerstellung und der Bauteilberechnung über die Funktionssimulation und Prototypenerstellung bis hin zur Generierung von Fertigungsdaten, ganzheitlich durch den Einsatz und die Verknüpfung leistungsfähiger CAE-Systeme zu unterstützen. Dazu wurden eine Vielzahl prototypischer Konstruktionssysteme und -umgebungen realisiert, die insbesondere in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden.

Legende:

- erfüllt
- ◐ teilweise erfüllt
- nicht erfüllt
- ⊗ Neuansatz erforderlich
- × Berücksichtigung der Erkenntnisse

Autor	Leistungsmerkmale								
	Produktgestaltung	Produktbewertung					Prozeßgestaltung	Prozeßoptimierung	
		Einhaltung der generellen Gestaltungsziele			x-Gerechtigkeit der Gestaltung			prozeßablauforientiert	produktgestaltungsorientiert
		Funktionserfüllung	Wirtschaftlichkeit	Sicherheit	Fertigung	Montage			
grundlegende Ansätze									
Ehrlenspiel et al. [41, 120]	●	◐	○	○	○	○	◐	◐	○
Eversheim, Baumann [10, 45]	●	◐	○	○	○	○	◐	◐	○
Beitz et al. [16]	●	◐	○	○	○	○	●	◐	○
Finkenwirth [52]	◐	○	○	○	◐	○	○	○	○
Franke, Peters [56]	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○
Krause et al. [93, 107]	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
Meerkamm et al. [130]	●	◐	○	○	●	○	○	○	○
Ottenbruch [165]	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
Dahl [31]	●	◐	○	○	○	●	○	○	○
werkzeugmaschinenspezifische Ansätze									
Bianchi et al. [19]	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○
Jedrzejewski et al. [86]	◐	○	○	○	○	○	○	○	○
Moon, Kota [141]	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
van Brussel et al. [145]	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Park et al. [169]	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
Reinhart et al. [132, 177]	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Spur, Sanft [191, 216]	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
Weck et al. [240]	●	●	○	○	○	○	○	○	○
eigene Arbeit	×	×	×	⊗	×	×	×	×	⊗

**Bild 2-13:** Leistungsmerkmale der analysierten Konstruktionsumgebungen und -systeme sowie Einordnung der eigenen Arbeit

Obwohl durch die entwickelten Systeme weitreichende Impulse gesetzt werden konnten, mangelt es nach wie vor an durchgängigen Lösungen. Ursachen liegen hier u.a. im Bereich des Produktdatenaustausches, da durch die Heterogenität der Systeme und die unzureichende Standardisierung der Schnittstellen oftmals eine Konvertierung der Datenformate notwendig ist.

Des Weiteren kann festgestellt werden, daß bei einer Vielzahl der entwickelten Konstruktionssysteme und -umgebungen die Unterstützung des Konstrukteurs hinsichtlich des Gestaltungsziels *Funktionserfüllung* im Vordergrund steht. Auch die Beurteilung konstruktiver Lösungen im Hinblick auf das Gestaltungsziel *Wirtschaftlichkeit* ist mit Hilfe eines von REINHART et al. [132, 177] entwickelten Moduls zur konstruktionsbegleitenden Kostenkalkulation möglich. In keinem der analysierten Ansätze wird jedoch die sicherheitsgerechte Produktgestaltung unterstützt.

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, erfordert die durchgängige Rechnerunterstützung von Produktentwicklungsprozessen neben Systemen zur Bearbeitung von produktgestalterischen Teilaufgaben und dem dafür notwendigen Produktdatenaustausch auch Rechnerwerkzeuge, die die Planung, Steuerung und Überwachung des Ablaufes der Produktentwicklung unterstützen. Im Umfeld der Konstruktionssystementwicklung wurden dabei insbesondere von EHRENSPIEL et al. [41, 120], EVERSHEIM und BAUMANN [10, 45] sowie BEITZ et al. [16, 51] prozeßablaufunterstützende Systembausteine entwickelt. Sämtlichen Lösungen ist allerdings gemeinsam, daß einerseits ein Anpassen des Ablaufplans an sich verändernde Randbedingungen ohne Systemunterstützung manuell durch den Benutzer vorgenommen werden muß, andererseits in diesem Zusammenhang nur eine Veränderung von Randbedingungen berücksichtigt wird, die sich auf die Termin- bzw. Kapazitätsplanung und deren Abweichungen vom Soll-Zustand beziehen. Die automatisierte Anpassung des Prozeßablaufplans an veränderte produktgestaltbezogene Randbedingungen, wie beispielsweise an Ergebnisse von Produktbewertungen, wurde in keinem der untersuchten Ansätze realisiert. Demgegenüber stehen die Aussagen von SPUR/ KRAUSE [212] sowie AHN [2] und GOLM [58], daß für den zukünftigen effizienten Einsatz von Planungswerkzeugen sowohl die Bereitstellung von Mechanismen zur Umsetzung und Überprüfung der Einhaltung von Gestaltungsrichtlinien als auch von Mechanismen zur automatisierten Optimierung der Produktentwicklungsprozesse von ausschlaggebender Bedeutung ist.

## 2.3 Sicherheitsgerechte Produktentwicklung

### 2.3.1 Methodische Ansätze

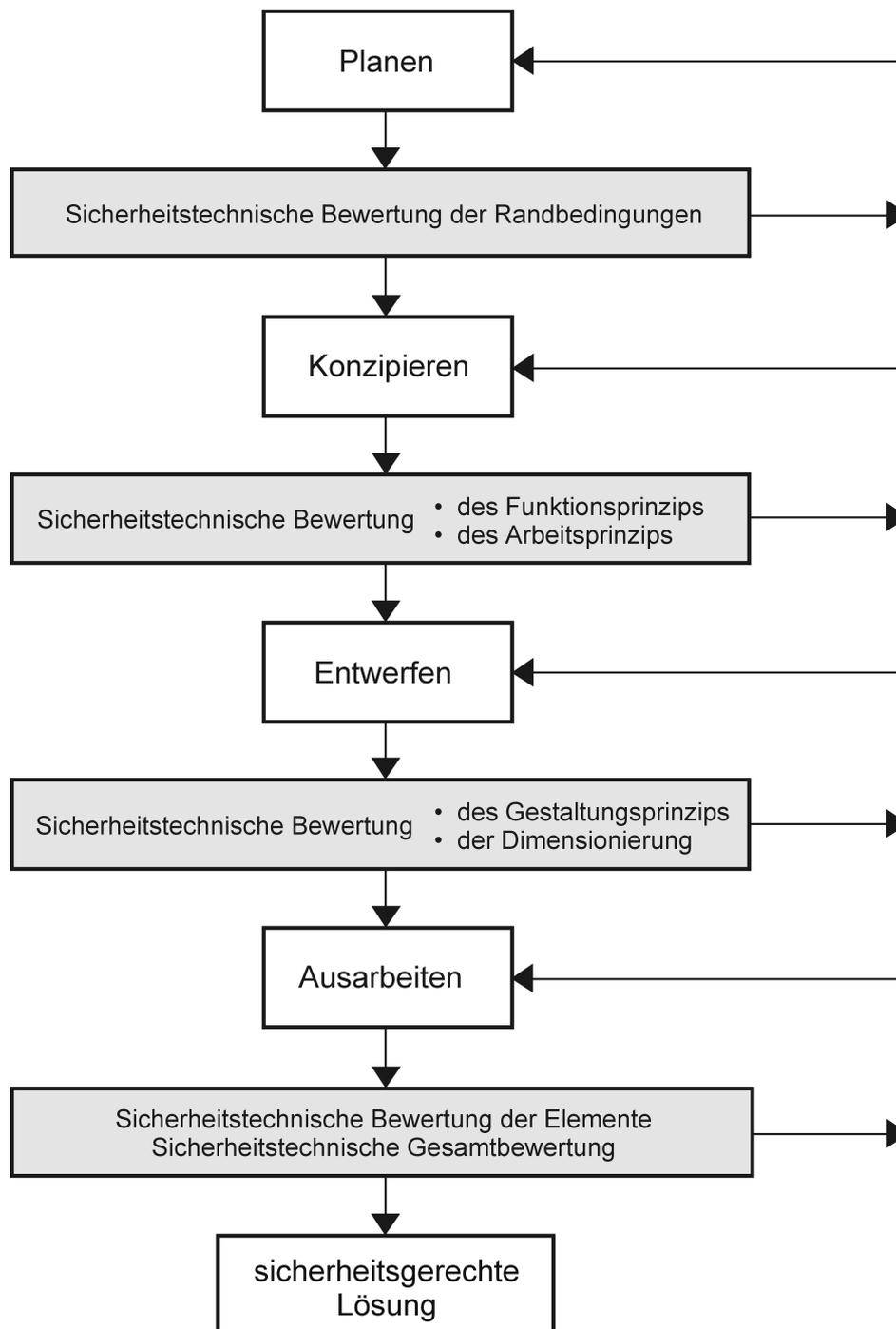
Grundlage methodischer Ansätze zur Integration sicherheitstechnischer Anforderungen in den Produktentwicklungsprozeß sind die von PAHL und BEITZ [168], ROTH [188] und RODENACKER [185] entwickelten Vorgehensweisen für das Entwickeln und Konstruieren von Produkten. Zur Einbeziehung von Sicherheitsanforderungen in den methodischen Konstruktionsprozeß wurden die genannten Ablaufpläne um die Notwendigkeit sicherheitstechnischer Bewertungen im Anschluß an die einzelnen Konstruktionsphasen ergänzt [5, 28, 167, 189]. Den aktuellen Stand der sicherheitsgerechten Konstruktionsmethodik stellt VDI-RICHTLINIE 2244 [271] dar.

In der Planungsphase ist zu prüfen, inwieweit eine sicherheitsgerechte Lösung überhaupt zu verwirklichen ist, **Bild 2-14**. Diese Bewertung erfolgt unter Zugrundelegung gegebener Randbedingungen, wie beispielsweise bestehender Gesetze und Vorschriften sowie Erfahrungswissen aus Schadensfällen vergleichbarer Produkte.

Das Aufnehmen von sicherheitstechnischen Anforderungen in das Pflichtenheft und das Bewerten der Funktions- und Wirkprinzipien hinsichtlich Sicherheitsgerechtigkeit ist Inhalt der sich an die Planungsphase anschließenden Konzeptphase. In dieser Phase muß auch die Entscheidung getroffen werden, ob Gefahrenfreiheit durch Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik verwirklicht werden soll. Wird in dieser Phase versäumt, Sicherheitsüberlegungen in die Konstruktion zu integrieren, so ist eine nachträgliche Eingliederung nur noch mit hohem Zeit- und Kostenaufwand möglich.

In der Entwurfsphase werden die im vorhergehenden Arbeitsabschnitt ausgewählten abstrahierten Lösungen stofflich gestaltet. Dazu erfolgt die Auswahl von Werkstoffen, die Durchführung von Berechnungen und der Vergleich verschiedener Lösungsvarianten hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Kriterien. Eine sicherheitstechnische Bewertung bezieht sich in dieser Phase auf die Dimensionierung und Gestaltung der Einzelteile. Änderungen, die aus den sicherheitstechnischen Bewertungsergebnissen resultieren, machen die Ableitung neuer Lösungsschritte notwendig, die dann wiederum mit einer Sicherheitsanalyse abzuschließen sind. Diese iterative

Vorgehensweise ist solange zu wiederholen, bis die Gefahrenfreiheit der Komponente gewährleistet werden kann.



**Bild 2-14:** Sicherheitsgerechter Konstruktionsablauf

Das Zusammenfassen von Einzelteilen zu Baugruppen und von diesen zum Gesamtprodukt mit dem Erstellen entsprechender Fertigungsunterlagen erfolgt in der Ausarbeitungsphase. Neben den Baugruppen wird in dieser Phase auch das Gesamtprodukt sicherheitstechnisch bewertet. Abschließend muß durch den Konstrukteur die Entscheidung getroffen werden, ob das Gesamtprodukt im Sinne der Anforderungen des Pflichtenheftes als sicher akzeptiert werden kann oder nicht.

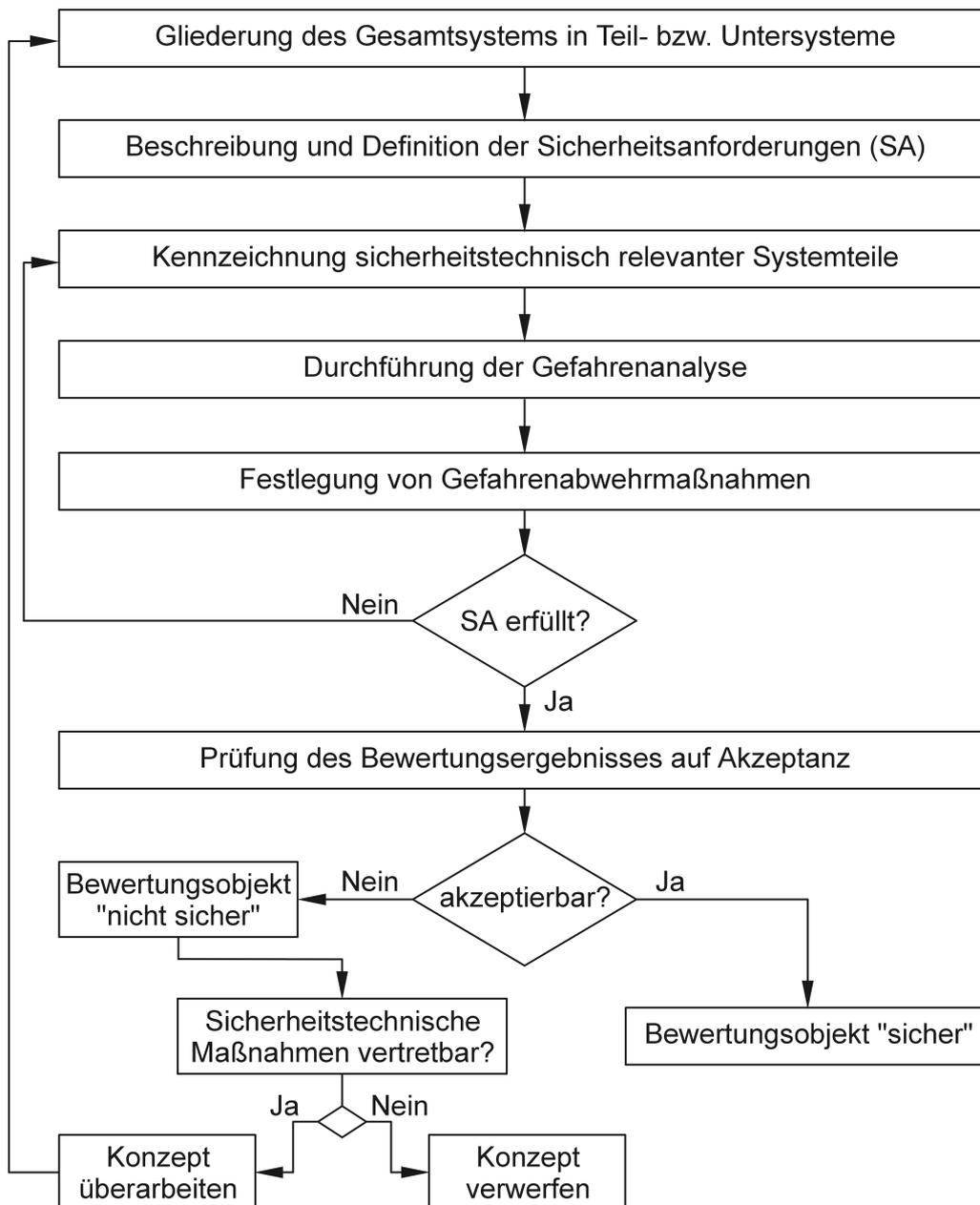
### 2.3.2 Bewertung der Sicherheitsgerechtheit

Im Rahmen des methodischen Konstruierens ist das Bewerten ein Vorgang, der zum Ermitteln des Wertes bzw. des Nutzens einer konstruktiven Lösung in bezug auf eine vorher aufgestellte Zielvorstellung dient. Die Bewertung führt zu einem Vergleich von Lösungsvarianten untereinander oder, bei einem Vergleich mit einer gedachten Ideallösung, zu einer Wertigkeit als Grad der Annäherung an dieses Ideal [168].

Zur Bewertung technischer Systeme wurden in der Konstruktionswissenschaft eine Reihe von Verfahren erarbeitet, wie beispielsweise die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-RICHTLINIE 2225 [267] oder die Nutzwertanalyse [249]. Diese sind allerdings für die Anwendung im Bereich der Sicherheitstechnik ungeeignet, da insbesondere ein Bewertungsmaßstab fehlt, der einerseits technisch-wirtschaftliche, andererseits auch moralisch-ethische Forderungen berücksichtigt [36].

Aus diesem Grund wurde im Bereich der Sicherheitstechnik der Begriff *Akzeptanz* als Maßstab zur Bewertung der Sicherheitsgerechtheit von konstruktiven Lösungen eingeführt [115]. Unter diesem Begriff wird ein Grenzwert verstanden, bei dessen Überschreiten zusätzliche Abwehrmaßnahmen gegen die Gefahr bzw. die Gefährdung zu ergreifen sind [222]. Derartige Grenzwerte werden in Regelwerken vorgegeben oder sie beruhen auf Erfahrungswerten, die von vorhandenen ähnlichen Anlagen übernommen wurden. Das Unterschreiten des Gefahrengrenzwertes läßt dem Konstrukteur jedoch die Entscheidung frei, ob er auf sicherheitstechnische Maßnahmen verzichten möchte oder nicht. In den Fällen, in denen keine numerischen Grenzwerte vorliegen, bleibt es dem Konstrukteur überlassen, wie er die im Pflichtenheft definierten sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt. Dabei handelt es sich um eine rein subjektive Entscheidung.

Verfahren zur sicherheitstechnischen Bewertung von Produkten wurden u.a. von DRIEDGER und VORATH [36], FISCHER [53], KOCH [98], KUHLMANN [114], TEHERANI [226] und TIETZE [228] erarbeitet. DRIEDGER [35] beschreibt in seiner Arbeit eine Vorgehensweise zur sicherheitstechnischen Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen, **Bild 2-15**.



**Bild 2-15:** Sicherheitstechnische Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen nach DRIEDGER [35]

Komplexe Systeme können sicherheitstechnisch nicht ganzheitlich bewertet werden. Daher steht am Anfang der sicherheitstechnischen Bewertung nach DRIEDGER zunächst eine systematische Gliederung des Objektes in Teil- bzw. Untersysteme.

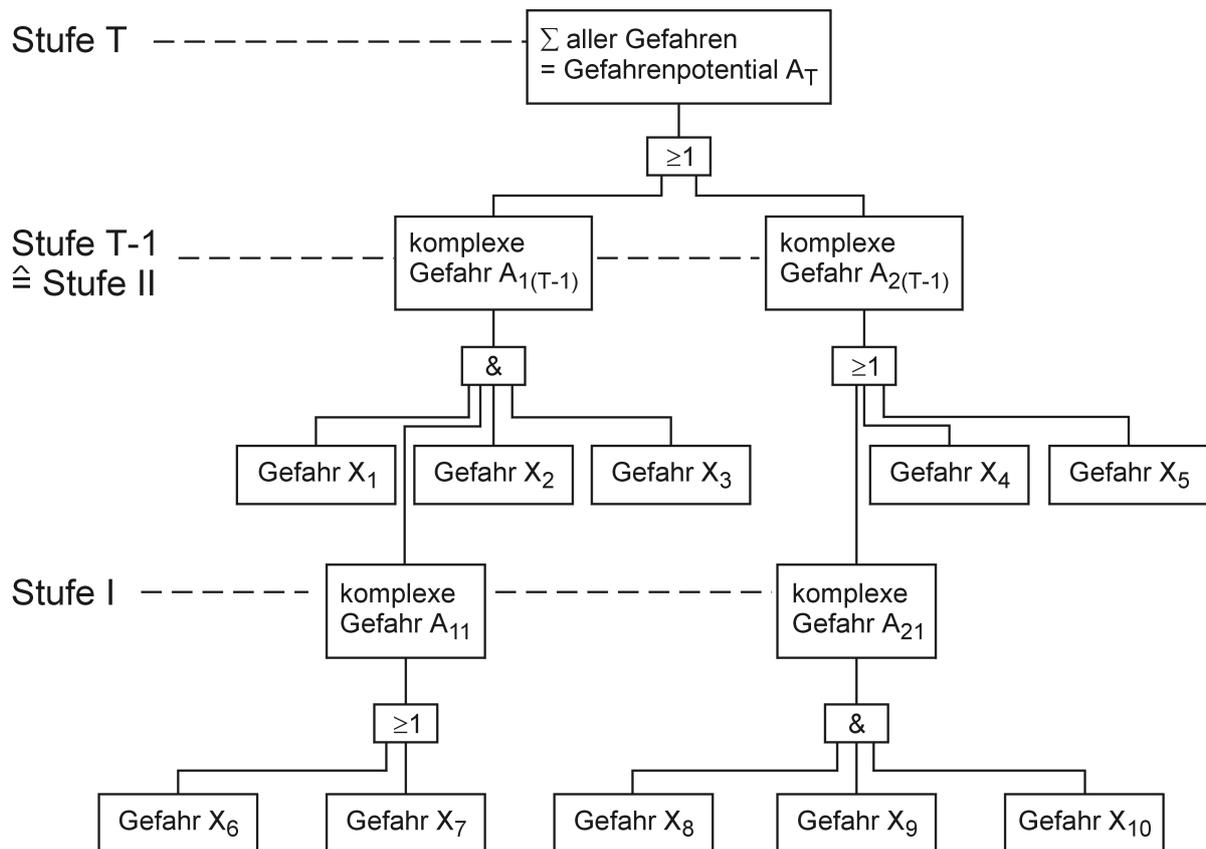
Im zweiten Schritt erfolgt die objektbezogene Beschreibung und Definition der Sicherheitsanforderungen. Neben der Festlegung von Anforderungen, die das Objekt erfüllen muß, sind auch die Zustände zu erfassen, die unter keinen Umständen auftreten dürfen.

Nach der Gliederung des Systems und der Formulierung der Anforderungen werden im nächsten Schritt des Bewertungsprozesses die sicherheitstechnisch relevanten Systemteile gekennzeichnet. Sicherheitstechnisch relevante Systemteile sind nach DRIEDGER die Systemteile, bei deren Versagen eine oder mehrere Gefahren auftreten können.

Anschließend wird die Gefahrenanalyse durchgeführt. Analysen zur Ermittlung der Gefahren und deren Ursachen können mit Hilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden. Dazu zählen die Fehlerbaumanalyse [263], die Ausfalleffektanalyse [264], die Störfallablaufanalyse [261, 262], die Vorläufige Gefahrenanalyse [139] und die Ausfallgefahrenanalyse [231]. Für die Gefahrenanalyse an Werkzeugmaschinen ist die Vorläufige Gefahrenanalyse, die sich an den Energiequellen orientiert und die Möglichkeiten der Energiefreisetzung untersucht, am besten geeignet [119].

Um die Gefährdung des Gesamtsystems zu ermitteln, müssen auch die Wechselwirkungen der bei den einzelnen Teil- und Untersystemen erkannten Gefahren analysiert werden. Die Verknüpfung der Gefahren erfolgt dabei mit Hilfe eines Strukturbaums und unter Anwendung Boole'scher Operationen, **Bild 2-16**.

So entsteht z.B. aus den Gefahren  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  und der komplexen Gefahr  $A_{11}$  die komplexe Gefahr  $A_{1(T-1)}$ , die das Wirksamwerden des Gefahrenpotentials  $A_T$  auslösen kann. Die Summe sämtlicher Gefahrenpotentiale beschreibt die reale Gefahrensituation des Produktes.



**Bild 2-16:** Schema eines Strukturbaumes zur Verknüpfung der Gefahren [35]

Die Festlegung und Realisierung der Gefahrenabwehrmaßnahmen erfolgt unter Zugrundelegung der Drei-Stufen-Methode nach PAHL/ BEITZ [168], siehe Kapitel 2.1.2. Abschließend wird anhand von Akzeptanzkriterien und -werten entschieden, ob die verbleibenden Restgefahren akzeptiert werden können oder nicht, d. h. es wird die Entscheidung *sicher* oder *nicht sicher* getroffen.

Akzeptanzentscheidungen sind meist subjektiv und werden durch eine Vielzahl von Einflußfaktoren, wie die moralische und ethische Einstellung jedes Einzelnen oder die veröffentlichte Expertenmeinung, beeinflusst. Eine Möglichkeit zur Unterstützung der Akzeptanzentscheidung ist das Gefahrenprofilverfahren nach STRNAD und VORATH [221], **Tabelle 2-1**.

Gefahrenart	Gefahrenauswirkung bzgl. des Menschen	Gefahrenabwehr- maßnahme	Akzeptanzschwelle	Akzeptanzschwelle	
				unter- schritten	über- schritten
Kühlmittel- spritzer	Augenverletzung	Schutzhaube	ja/nein	●	
Defekte Schutz- isolation	Stromschlag evtl. tödlich	zusätzliche Isolation	ja/nein	●	
Chemische Dämpfe	Lungenerkrankung	chem. Konzentration gesenkt	260 mg/m <sup>3</sup>	●	
Wegflie- gende Teile	Kopfverletzung	Abschirmung	ja/nein	●	
Lärm	Schwerhörigkeit	Teilkapselung	85 dB(A)		●
⋮	⋮	⋮	⋮		

**Tabelle 2-1:** Akzeptanzprüfung für Teilbereiche einer Fräsmaschine [221]

Für jede einzelne Gefahr wird dabei eine Akzeptanzschwelle festgelegt, unter der nach subjektiver Einschätzung die Gefahr als akzeptierbar bezeichnet werden kann. Die Festlegung der Akzeptanzschwelle erfolgt dabei unter Zugrundelegung aktueller Gesetze, Normen und Vorschriften. In den Fällen, in denen für Gefahren keine numerisch festgelegten Kenn- oder Grenzwerte existieren, muß eine binäre Entscheidung getroffen werden. Die Akzeptanzentscheidung verläuft nun in der Weise, daß für die erkannten Gefahren entschieden werden muß, ob die Akzeptanzschwelle unter- oder überschritten wird. Wird nun für eine oder mehrere Gefahrenarten die Akzeptanzschwelle überschritten, besteht die Möglichkeit, durch zusätzliche sicherheitstechnische Maßnahmen das Bewertungsobjekt sicherheitstechnisch zu verbessern und anschließend den Bewertungsprozeß erneut zu durchlaufen. Wird nach dem Einsatz zusätzlicher Maßnahmen die Akzeptanzschwelle unterschritten, so kann die Maschine als sicher akzeptiert werden.

## **2.4 Sicherheitstechnische Hilfsmittel**

### **2.4.1 Hilfsmittel zur sicherheitsgerechten Produktentwicklung**

Bisherige Lösungsansätze zur Unterstützung der sicherheitsgerechten Produktentwicklung lassen sich in konventionelle und rechnerunterstützte Hilfsmittel gliedern. Zu den konventionellen, die sicherheitsgerechte Produktgestaltung unterstützenden Hilfsmitteln zählen neben Vorschriften, Normen und Arbeitsschutzbestimmungen auch die in Lösungskatalogen zusammengefaßten Gestaltungshinweise und -regeln. Neben allgemeingültigen Lösungskatalogen existieren auch Sammlungen, die nur für branchen- bzw. betriebsspezifische Produktspektren verwendbar sind. Wesentliche Nachteile konventioneller Hilfsmittel sind die aufwendige und zeitintensive Handhabung sowie die individuelle Interpretationsmöglichkeit der Gestaltungshinweise und -regeln.

Allgemeingültige Lösungskataloge zur Unterstützung des sicherheitsgerechten Konstruierens technischer Erzeugnisse wurden beispielsweise von STRNAD et al. [222], SEEGER [203] und TEHERANI [226] entwickelt. In diesen werden einerseits die möglichen, an Objekten auftretenden Gefahrensituationen beschrieben, andererseits Lösungsansätze bereits realisierter oder denkbarer Maßnahmen zur Beseitigung der Gefahrensituationen vorgeschlagen.

NEUDÖRFER [147] dagegen erläutert einen branchenspezifischen Lösungskatalog zur Auswahl von Schutzeinrichtungen. Es wird zwischen trennenden, abweisenden, ortsbindenden Schutzeinrichtungen und Schutzeinrichtungen mit Annäherungsreaktion unterschieden. Der Lösungskatalog unterstützt den Konstrukteur bei der Auswahl eines Schutzeinrichtungstyps und bei dessen räumlicher Anordnung im oder um den Arbeitsraum der Maschine.

Rechnerunterstützte Hilfsmittel zur sicherheitsgerechten Produktentwicklung beschränken sich im wesentlichen auf die Bereitstellung von sicherheitstechnischen Informationen während der Produktgestaltung. Nachfolgend werden eine Reihe von Ansätzen beschrieben. Dabei wird in sicherheitstechnische Informationssysteme, Programme und Expertensysteme sowie in sicherheitstechnische Spezialsoftware, wie z. B. interaktive 3D-Simulationssoftware, unterschieden.

LUCZAK und RÖTTING [123] beschreiben ein sicherheitstechnisches Dokumentations- und Informationssystem, das wissenschaftliche und anwendungsbezogene Beiträge aus dem Bereich des Arbeits- und betrieblichen Gesundheitsschutzes zusammenfaßt. Die Literaturdokumentation wird durch eine Bestandsaufnahme zu Forschungsprojekten auf diesem Gebiet ergänzt.

Ein weiteres Sicherheitsinformationssystem wurde von RÄSÄNEN et al. [173] entwickelt. Schwerpunktmäßig werden Informationen über mögliche Arbeitsunfälle an Maschinen und Maßnahmen zu deren Beseitigung bereitgestellt.

In [155] wird ein sicherheitstechnisches Expertensystem beschrieben, das den Konstrukteur über bestehende Gesetze sowie sicherheitstechnische Regeln und Normen informiert. Die Informationsbereitstellung erfolgt dabei unter Berücksichtigung der komplexen Beziehungen zwischen den einzelnen Regelwerken.

Ein weiteres Expertensystem wird in [156] erläutert. Dabei handelt es sich um ein DV-Instrument für das umfassende Sicherheits- und Risikomanagement hochkomplexer Anlagen und Systeme. Neben der Identifizierung von zu Störfällen führenden Ereignissen und der Analyse von Unfallfolgen wird durch dieses System auch die Ermittlung von Möglichkeiten zur Reduzierung oder Beseitigung des Störfallrisikos unterstützt. Ähnliche Ansätze zum Sicherheits- und Risikomanagement wurden auch von HEINO et al. [73], HALE et al. [65] und HOVDEN [81] realisiert.

KOLLER und MANNWEILER [100] beschreiben einen Programmbaustein zur Unterstützung der sicherheitsgerechten Konstruktion von Maschinen. Dieser besteht aus drei Programmteilen. Der erste Programmteil dient der Analyse von möglichen Gefahrenstellen, der zweite Programmteil zur Ermittlung der notwendigen Sicherheitsabstände für verschiedene Zugriffsfälle und im dritten Programmteil wird der Konstrukteur auf grundsätzliche Strategien sowie Literatur zur Beseitigung der Gefahrenstellen hingewiesen.

MATTILA und KIVISTÖ-RAHNSTO [95, 128] entwickelten ein Rechnersystem, das die von der Europäischen Maschinenrichtlinie geforderte Konformitätsbewertung technischer Produkte unterstützt. Die Dokumentation erfolgte rechnerbasiert im PDF-Datenformat. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse der Konformitätsbewertung mittels konventioneller World Wide Web - Browser anzeigen zu lassen.

NICOLAISEN [148] realisierte ein Planungshilfsmittel für Arbeitsschutzaspekte in automatisierten Produktionssystemen, das mittels einer in diesem Zusammenhang entwickelten Symbolik die Möglichkeit bietet, wesentliche Arbeitsschutzaspekte, wie Gefahren, manuelle Tätigkeiten oder Sicherheitsmaßnahmen, bereits während der Layoutplanung grafisch darzustellen. Die Integration von sicherheitstechnischen Aspekten während der Layoutplanung von Fertigungssystemen war auch Ziel der von MATTILA et al. [129] und TAKALA [225] verfolgten Ansätze.

MÄÄTTÄ et al. [125] stellen für den Bereich der Maschinenentwicklung, FLAIG [54, 55] für den Bereich der Layoutplanung von Fertigungseinrichtungen den Einsatz interaktiver 3D-Simulationssoftware zur Sicherheitsanalyse vor. Schwerpunkt dieser Ansätze ist es, kritische Situationen während des Betriebs zu simulieren und das Verhalten des Bedienpersonals in diesen Situationen zu bewerten und zu verbessern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die bestehenden Systeme zur Unterstützung der sicherheitsgerechten Produktentwicklung im wesentlichen auf in Datenbasen abgelegte Informationen über geltende Vorschriften und Normen sowie mögliche Gefährdungen und Maßnahmen zu deren Beseitigung zugreifen. Eine Unterstützung von produkt- und prozeßgestalterischen Tätigkeiten während der Konstruktion technischer Erzeugnisse mit dem Endziel eines sicherheitsgerechten, virtuellen Produktmodells ist durch keines der untersuchten Systeme möglich.

#### **2.4.2 Modellierung von Stoßvorgängen**

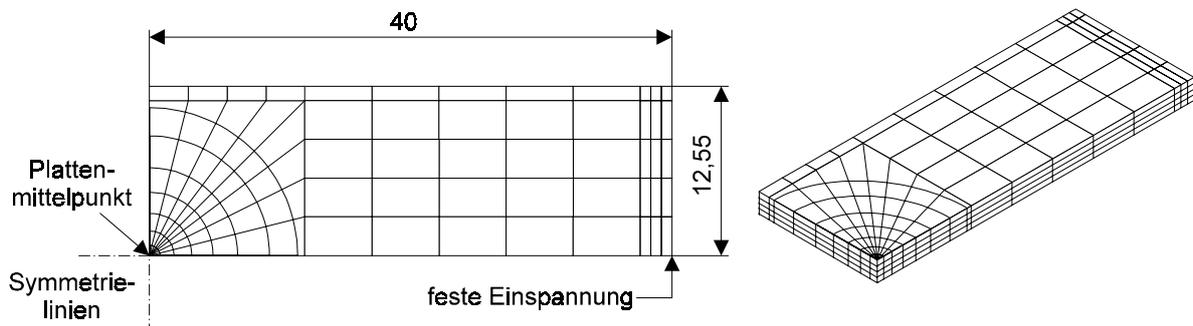
Bei komplexen Aufgabenstellungen, wie die Beurteilung des Werkstoffverhaltens bei hochdynamischer Belastung, stellt die Finite-Elemente-Methode (FEM) ein geeignetes Hilfsmittel dar, um unter Zeit- und Kostengesichtspunkten den Umfang experimenteller Untersuchungen zu reduzieren. Gängige, zur Simulation hochdynamischer Aufprallvorgänge eingesetzte FE-Systeme sind die Programme DYNA [66] und dessen Derivate LS-DYNA, STARDYNA und PAMCRASH, MARC/MENTAT [159] und ABAQUS/EXPLICIT [150]. Im folgenden werden beispielhaft Ergebnisse von Finite-Elemente-Untersuchungen beschrieben, bei denen Stab - Platte - Stoßvorgänge bzw. Kugel - Platte - Stoßvorgänge simuliert wurden.

KORMI, ETHERIDGE und WEBB [101] untersuchten das Verformungsverhalten kreisrunder Stahlplatten mit einem Durchmesser von  $D = 152,4$  mm und einer Dicke von  $d = 1,56$  mm unter hochdynamischer Belastung. Als Projektil wurde ein zylindrischer Stahlkörper mit einer Masse von  $m = 2$  kg verwendet, der auf Geschwindigkeiten  $v = 48,5$  m/s beschleunigt wurde. Zur Berechnung ist das FE-Programm ABAQUS/EXPLICIT [150] eingesetzt worden. Ziel der Untersuchungen war die Analyse der Reaktionskräfte an den Knoten im Einspannbereich der Kreisplatte während der Stoßbelastung. Versagenskriterien wurden im Rahmen dieser Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Höhere Projektilgeschwindigkeiten sind von MURPHY und CLINE [143] bei ihren FE-Analysen zugrundegelegt worden. Geprüft wurden 10 mm dicke Stahlplatten, die von zylindrischen Projektilen mit einem Durchmesser  $D = 4,3$  mm und der Länge  $l = 20$  mm bei einer Geschwindigkeit von  $v = 3000$  m/s beaufschlagt wurden.

JENQ und MO [87] analysierten die Stoßfestigkeit eines Faserverbundwerkstoffes aus verflochtenen unidirektionalen Glasfasern und einer Epoxidharzmatrix. Ziel der Untersuchungen war die experimentelle und die numerische Bestimmung der maximalen Beschußgeschwindigkeit. Als Grundlage des FEM-Modells dienten experimentelle Daten, die aus quasistatischen Eindrückversuchen sowie aus Aufprallprüfungen gewonnen wurden. Beschußkörper waren 36,1 g schwere, zylinderförmige Projektile mit einem Durchmesser von  $D = 12,7$  mm. Die numerische Berechnung erfolgte mit Hilfe des FEM-Programms MARC/MENTAT [159]. Zur Vereinfachung wurden Matrix- und Faserwerkstoff nicht getrennt, sondern in Form eines isotropen Materialmodells implementiert. **Bild 2-17** zeigt das Modell des Faserverbundwerkstoffes, das sich aus vier Elementschichten mit jeweils 108 Elementen zusammensetzt. Die Elementschichten repräsentieren dabei die Faserlagen des Originalwerkstoffes. Insgesamt betrug die Plattendicke  $d = 3,6$  mm.

Die Modellierung der Stoßbeanspruchung der Werkstückprobe erfolgte durch eine zeitlich sich verändernde Stoßkraft, deren Betrag durch das Hertz'sche Kontaktgesetz determiniert wurde. Als Ergebnis der FE-Untersuchungen konnte unter Berücksichtigung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit für dieses Material eine maximale Beschußgeschwindigkeit von  $v_{\max} = 75$  m/s ermittelt werden.



**Bild 2-17:** FE-Modell des Faserverbundwerkstoffes nach JENQ und MO [87]

SAREEN und SMITH [192] beschreiben den Einsatz der Finite-Elemente-Methode bei der Durchführung von Prüfungen zur Beurteilung der Aufprallfestigkeit von Helikopterflügel- und -tankmaterialien. Als Projektile wurden zylindrische Körper mit kegelförmiger Spitze eingesetzt, deren Masse  $m = 31 \text{ g}$  betrug und die auf  $v = 794 \text{ m/s}$  beschleunigt wurden.

Kugel-Platte-Stoßvorgänge sind u.a. von HAMOUDA und HASHMI [69] durchgeführt worden. Dabei wurden runde Keramikplatten der Dicke  $d = 10 \text{ mm}$  mit einer Stahlkugel ( $D = 20 \text{ mm}$ ) hochdynamisch beansprucht. Die Geschwindigkeit  $v$  der Projektile betrug  $1000 \text{ m/s}$ . Als FE-Programm kam ABAQUS/EXPLICIT [150] zum Einsatz.

FE-Untersuchungen in noch höheren Geschwindigkeitsbereichen beschreiben MAHFUZ et al. [127], FAHRENHOLD et al. [50], AGARDH et al. [1], KERR et al. [91], THOMA et al. [227] und RESCHAUER [179]. RESCHAUER [179] führte beispielsweise FE-Analysen zur Unterstützung der Konstruktion von Satellitenschutzschilden durch. Dabei wurden Aluminiumfolien der Dicke  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$  von einer auf  $v = 9,5 \text{ km/s}$  beschleunigten Glaskugel ( $D = 24 \text{ }\mu\text{m}$ ) hochdynamisch beaufschlagt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die bei den bisher durchgeführten Finite-Elemente-Analysen zugrundegelegten Prüfparameter, wie Projektilform, -masse und -geschwindigkeit, in erheblichem Maße von den in den Aufprallprüfnormen EN 12415 [256] und prEN 12417 [257] für Werkzeugmaschinenschutzeinrichtungen definierten Prüfbedingungen abweichen. Die Ergebnisse der FE-Untersuchungen sind somit als Dimensionierungs- und Gestaltungsgrundlage für trennende Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen ungeeignet.

### 3 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte

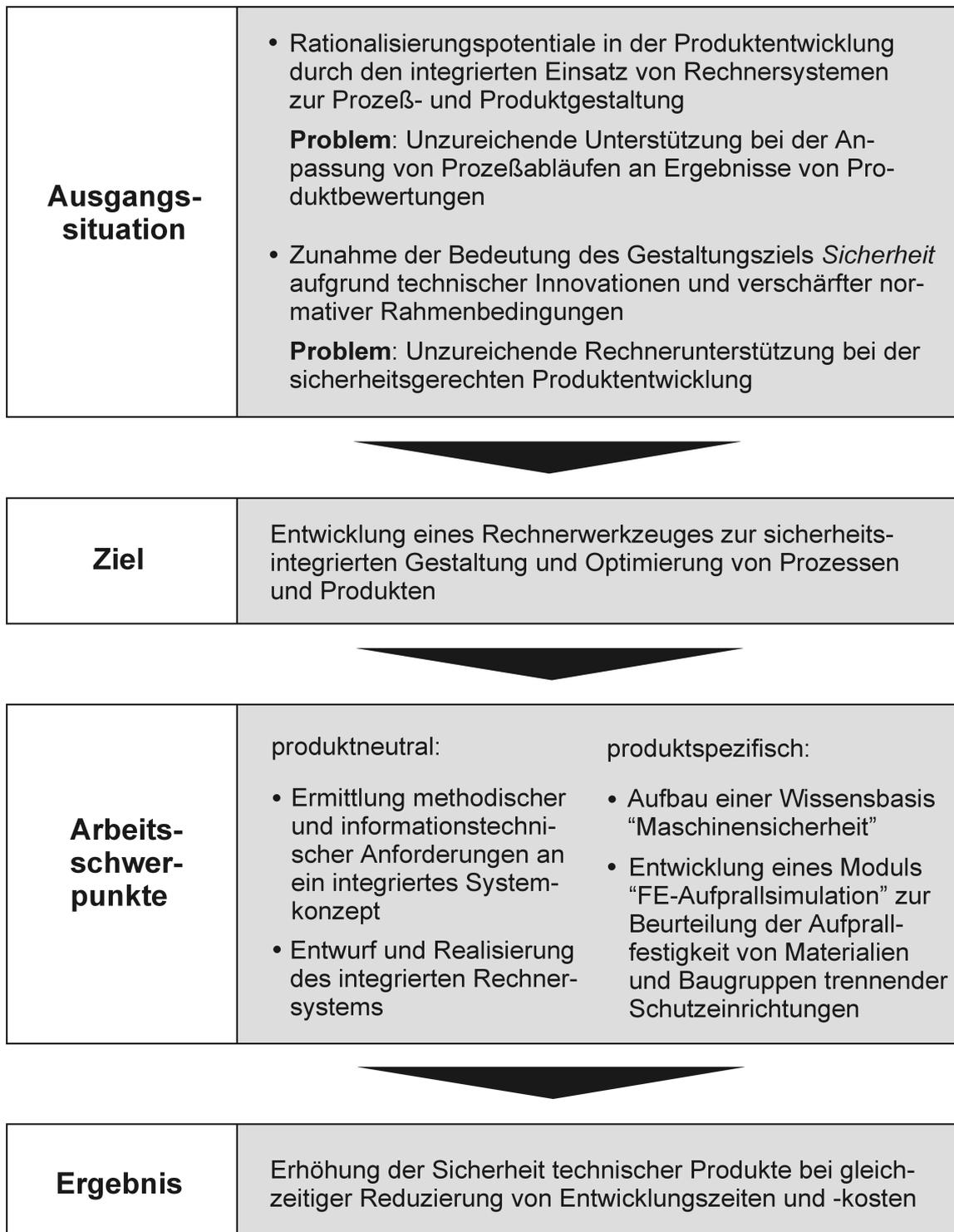
Schlüsseltechnologie gegenwärtiger Rationalisierungsbemühungen in der Produktentwicklung ist die ganzheitliche Rechnerunterstützung von Prozeßketten. Neben dem Einsatz von Rechnersystemen bei der Produktmodellierung erfordern Prozeßketten auch den Einsatz von Systemen zur Gestaltung und Optimierung des Produktentwicklungsprozesses.

Während die Leistungssteigerung der Produktentwicklung schon seit einigen Jahren mit Systemen zur integrierten Prozeß- und Produktgestaltung betrieben wird, existiert bisher noch kein allgemein akzeptierter Ansatz, der Systeme zur Prozeß- und Produktgestaltung derart miteinander verknüpft, daß Ergebnisse von Produktbewertungen unmittelbar in die Entwicklungsprozeßgestaltung umgesetzt werden.

Im Rahmen der Produktbewertung im Anschluß an die Ausführung von Entwicklungsaufgaben wird der Erfüllungsgrad der Anforderungen und der Gestaltungsziele beurteilt. Dabei ist im Werkzeugmaschinenbau insbesondere die Erfüllung der sicherheitstechnischen Anforderungen von wesentlicher Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Realisierung eines Rechnerwerkzeuges zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten. Dem System wird eine neuartige Methodik zugrundegelegt. Besonderes Kennzeichen des informationstechnischen Ansatzes ist neben der Wiederverwendung von Vorgehensweisen aus sicherheitstechnisch optimierten Produktentwicklungsprozessen die Beseitigung von im Rahmen sicherheitstechnischer Produktbewertungen festgestellter Gestaltungsdefizite durch eine automatisierte Optimierung des Produktentwicklungsprozesses. Die Beschreibung der Funktionalität erfolgt am Beispiel einer sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung.

Entsprechend der Zielsetzung werden Grundlagen erarbeitet, methodische und informationstechnische Anforderungen an ein integriertes Systemkonzept abgeleitet und Systemmodule zur Prozeß- und Produktgestaltung/ -optimierung konzipiert und realisiert, **Bild 3-1**.



**Bild 3-1:** Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte der Arbeit

Neben Basisfunktionen, die allgemeingültig zur Unterstützung von prozeß- und produktgestalterischen Tätigkeiten notwendig sind, werden auch Mechanismen beschrieben, die speziell die Umsetzung und Überprüfung der Einhaltung von sicherheitstechnischen Anforderungen während der Prozeß- und Produktgestaltung unterstützen. Dem Gesamtsystem wird für das Anwendungsbeispiel „Sicherheitsgerechte Werkzeugmaschinenentwicklung“ eine Wissensbasis *Maschinensicherheit* zugrundegelegt, in die Informationen über Gefährdungen an Werkzeugmaschinen und Hinweise zur sicherheitsgerechten Dimensionierung und Gestaltung von Maschinenbaugruppen/ -bauteilen abgebildet werden.

Abgeschleuderte Werkstücke, Werkzeuge, Spannmittel sowie deren Bruchstücke stellen an spanenden Werkzeugmaschinen aufgrund ihrer hohen kinetischen Energien für den Bediener die Gefahr mit den schwerwiegendsten Schadensauswirkungen dar. Zum Schutz des Bedienpersonals werden an Werkzeugmaschinen trennende Schutzeinrichtungen eingesetzt. Um die Forderung nach einer ausreichenden Rückhaltefähigkeit von Komponenten und Materialien trennender Schutzeinrichtungen bereits im Konstruktionsstadium zu erfüllen, wird das Rechnersystem darüber hinaus um ein Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“ ergänzt, mit dessen Hilfe eine Aufprallfestigkeitsbeurteilung unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt werden kann.

Somit werden durch den Einsatz dieses Systems in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses Voraussetzungen geschaffen, sicherheitstechnisch hochwertige Produkte mit geringerem Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren.

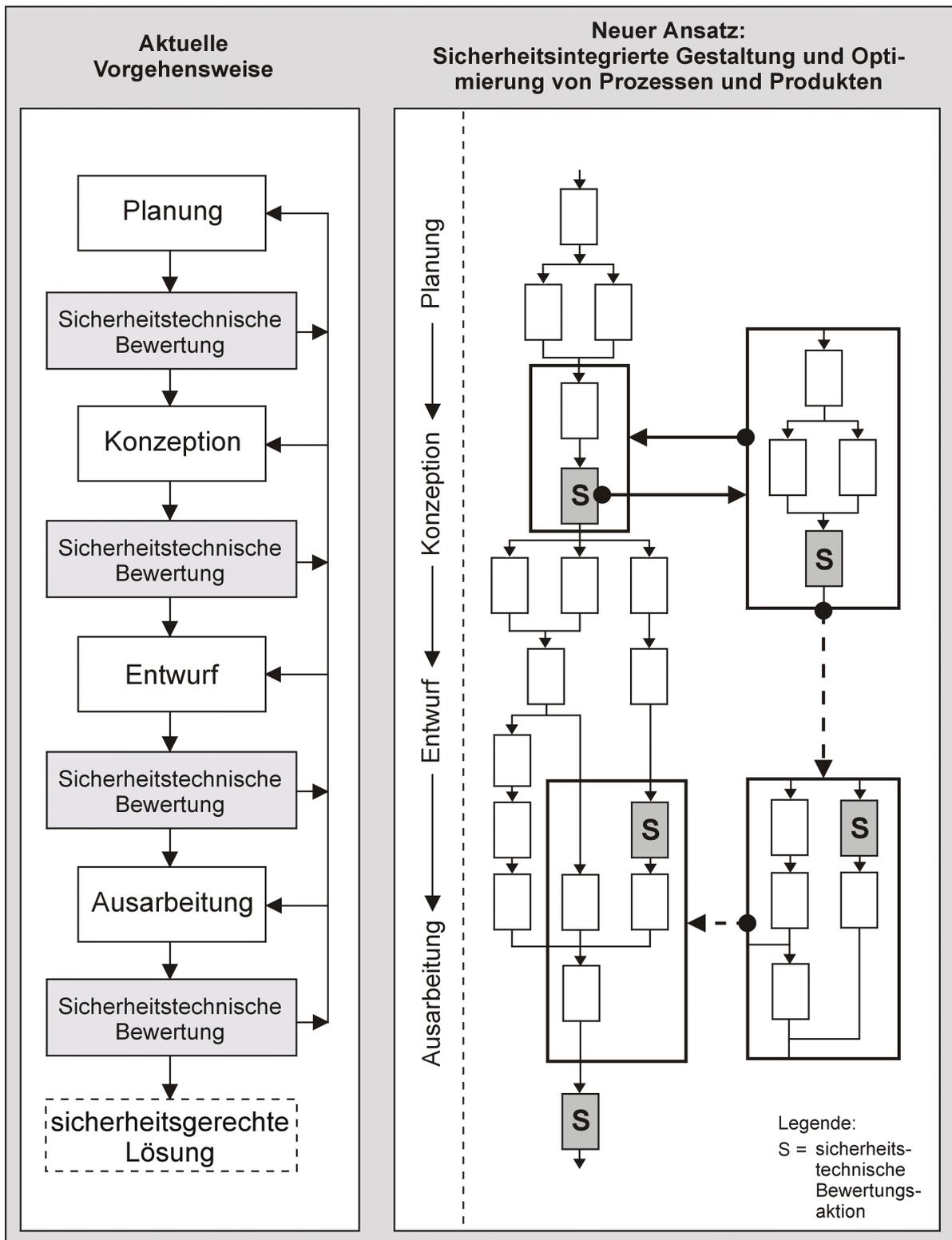
## 4 Anforderungen an eine sicherheitsintegrierte Prozeß- und Produktgestaltung

### 4.1 Methodische Anforderungen

Um Produkte zeit- und kostengünstig herzustellen, ist eine parallele und zeitgleiche Anordnung und Ausführung von Arbeitsschritten des Produktentwicklungsprozesses erforderlich [42, 43, 46, 171, 204]. Hierzu bedarf es eines Ablaufplans, der alle von der Produktidee bis zur Erstellung der Fertigungsunterlagen erforderlichen Tätigkeiten in strukturierter Form abbildet. Dabei muß eine Erhöhung des Detaillierungsgrades der Tätigkeiten stufenweise möglich sein.

Die genannten allgemeingültigen Anforderungen an die Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen sind ohne Einschränkungen auch auf die Gestaltung sicherheitsgerechter Produktentwicklungsprozesse übertragbar. In seiner Grundkonzeption sollte sich der neue Ansatz zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten an die durch die VDI-RICHTLINIE 2244 [271] vorgeschlagene Vorgehensweise zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Produkten orientieren, jedoch neben der Überlappung von Aktivitäten während des Produktentwicklungsprozesses auch eine stufenweise Konkretisierung der durchzuführenden Arbeitsschritte zulassen.

Wesentliches Kennzeichen der aktuellen Vorgehensweise zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Produkten ist eine im Anschluß an die einzelnen Konstruktionsphasen durchzuführende sicherheitstechnische Produktbewertung, **Bild 4-1 links**. Dabei wird je nach Konstruktionsphase geprüft, ob die Funktions- und Wirkstrukturen, die prinzipielle Lösung, die modularen Strukturen sowie die Vor- und Gesamtentwürfe im Sinne der Anforderungen des Pflichtenheftes als sicher akzeptiert werden können. Ist dieses nicht der Fall, erfolgt ein Rücksprung zum Beginn der jeweiligen Konstruktionsphase und die nachträgliche Integration von sicherheitstechnischen Maßnahmen. Dieses ist oftmals jedoch nur unter hohem Zeit- und Kostenaufwand möglich.



**Bild 4-1:** Vergleich der aktuellen Vorgehensweise zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Produkten mit dem neuen Ansatz zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten

Um zeit- und kostenintensive Rücksprünge über mehrere Arbeitsschritte zu vermeiden, werden im Rahmen des neuen Ansatzes sicherheitstechnische Produktbewertungen nicht erst im Anschluß an die Beendigung der einzelnen Konstruktionsphasen durchgeführt, sondern unmittelbar nach der Planung, Konzeption, dem Entwurf oder der Ausarbeitung eines sicherheitsrelevanten Bauteils, **Bild 4-1 rechts**. Dazu sind nach Durchführung einer die Gestaltung eines sicherheitsrelevanten Bauteils betreffenden Tätigkeit sicherheitstechnische Bewertungsaktionen in den Prozeßablaufplan einzufügen. Aufgabe der Bewertungsaktionen ist es, die Produktgestalt hinsichtlich der Einhaltung sicherheitsrelevanter Anforderungen zu überprüfen.

Weiterhin zeichnet sich der neue Ansatz zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten dadurch aus, daß der Ablaufplan flexibel an veränderte Randbedingungen, wie beispielsweise an Ergebnisse von sicherheitstechnischen Produktbewertungen, angepaßt werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, Gestaltungsdefizite, die im Rahmen der sicherheitstechnischen Produktbewertung festgestellt wurden, frühzeitig durch die Rekonfiguration des Prozeßablaufplanes zu beseitigen.

## **4.2 Informationstechnische Anforderungen**

Ausgehend von der Zielsetzung, ein System zur Unterstützung der sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten zu entwickeln, sind sowohl Anforderungen an die Systemfunktionen als auch an den zwischen Prozeß- und Produktgestaltung notwendigen Datenaustausch zu stellen. Neben Funktionen zur Planung, Steuerung, Überwachung und Optimierung des Ablaufes der Produktentwicklung werden zur ganzheitlichen Unterstützung des sicherheitsgerechten Produktentwicklungsprozesses auch Funktionen zur Planung, Gestaltung und Optimierung des Produktes benötigt.

Zur Planung des Produktentwicklungsablaufes sind dem Konstrukteur Systemfunktionen zur Neudefinition von Produktentwicklungsaufgaben sowie zur Erzeugung von Reihenfolgebeziehungen zwischen den Aufgaben bereitzustellen. Um einen hohen Unterstützungsgrad des Anwenders zu erreichen, müssen die Produktentwicklungsaufgaben auf möglichst detailliertem Niveau angezeigt werden können.

Die zunehmende Komplexität der Produkte hat einen steigenden Aufwand bei der Gestaltung der Produktentwicklungsprozesse zur Folge. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Gestaltungsaufwandes besteht in der Wiederverwendung von Lösungen für Produktentwicklungsaufgaben aus ähnlichen, bereits abgeschlossenen Prozessen. Daher ist dem Konstrukteur im Rahmen dieses Ansatzes eine Systemfunktion zur Verfügung zu stellen, die bereits durchgeführte und sicherheitstechnisch optimierte Produktentwicklungsprozesse hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit mit der aktuellen Problemstellung analysiert und Teilaufgaben mit großer Ähnlichkeit in den aktuellen Prozeß integriert. Der Ähnlichkeitssuche ist eine Beschreibungssystematik zugrundezulegen, die zur Charakterisierung der Teilaufgaben sicherheitstechnisch optimierter Produktentwicklungsprozesse dient.

Zur Durchführung des Produktentwicklungsprozesses sind die für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben notwendigen Produktentwicklungswerkzeuge für den Zeitraum der Aufgabenbearbeitung an das Rechnersystem anzubinden. Die Ausführung der Produktentwicklungsaufgaben ist durch eine Steuerungsfunktion zu veranlassen. Eine Überwachungsfunktion vergleicht den geplanten mit dem tatsächlichen Prozeßablauf und leitet bei gegebenenfalls auftretenden Abweichungen Gegenmaßnahmen ein.

Die Einhaltung von Sicherheitsanforderungen während der Produktgestaltung wird durch eine im Anschluß an die einzelnen Teilaufgaben durchzuführende sicherheitstechnische Produktbewertung überprüft. Die sicherheitstechnische Produktbewertung wird in die Arbeitsabschnitte *Gefahrenanalyse*, *Schutzzieldefinition* und *Soll-Ist-Maßnahmenvergleich* untergliedert. Produktgestaltungsdefizite, die im Rahmen des Soll-Ist-Maßnahmenvergleichs festgestellt wurden, sind durch eine sicherheitstechnisch orientierte Prozeß- und Produktoptimierung zu beseitigen.

Die Demonstration der Funktionalität des entwickelten Systems erfolgt am Beispiel einer sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung. Als Datenbasis wird diesem Prototypsystem eine Wissensbasis *Maschinensicherheit* zugrundegelegt, die neben Erfahrungswissen aus Schadensfällen spanender Werkzeugmaschinen auch Hinweise zur Dimensionierung und Gestaltung von Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik enthält.

Eine besondere Bedeutung bei der Abwendung von Gefahren an Werkzeugmaschinen besitzt die trennende Schutzeinrichtung. Die Beurteilung der Aufprallfestigkeit von Komponenten und Materialien trennender Schutzeinrichtungen erfolgt im Rahmen dieses Ansatzes mit der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Zur informationstechnischen Anbindung der Wissensbasis sowie der FE-Aufprallsimulation an das Gesamtsystem ist die Definition bzw. Entwicklung geeigneter Datenschnittstellen erforderlich.

## **5 Entwurf eines Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten**

### **5.1 Begriffe und Definitionen**

Nachfolgend werden die im Rahmen der Systemkonzeption verwendeten Begriffe aus dem Gebiet der Produktentwicklung aufgeführt:

- **Produktmodellierung:**

Im Rahmen der Produktmodellierung findet unter Nutzung von Produktmodellierungswerkzeugen die Gestaltung des Produktes statt [109].

- **Produktmodellierungswerkzeuge:**

Unter Produktmodellierungswerkzeugen werden rechnerbasierte Hilfsmittel, wie CAD-, FEM- und Simulationssysteme, verstanden.

- **Produktmodell:**

Ein Produktmodell ist die rechnerinterne Repräsentation aller zur Beschreibung eines Produktes notwendigen Informationen [3, 109].

- **Entwicklungsprozeßmodellierung:**

Im Rahmen der Entwicklungsprozeßmodellierung findet die Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses statt. Methoden der Entwicklungsprozeßmodellierung umfassen die Generierung von Ablaufplänen, die Zeit- und Kostenplanung sowie die Steuerung und Überwachung von Produktmodellierungsprozessen [202].

- **Produktmodellierungsplan:**

Der Produktmodellierungsplan ist ein hierarchisches Netzwerk von Produktentwicklungsaufgaben und beschreibt den Zusammenhang zwischen den geplanten Aufgaben im Hinblick auf die kausalen Beziehungen, die zeitlichen Beziehungen und die hierarchische Über- bzw. Unterordnung [202].

- **Produktentwicklungsaufgabe:**

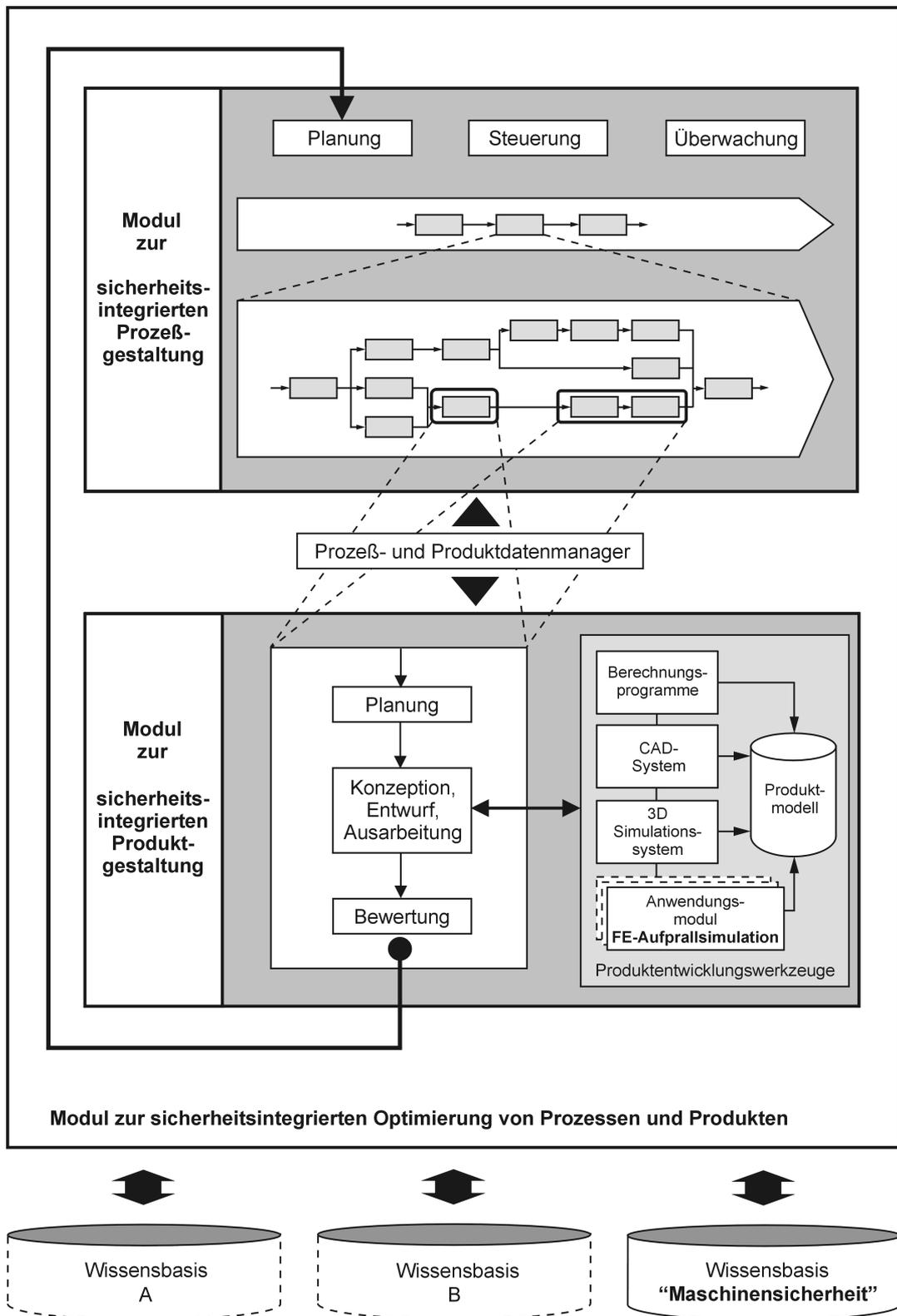
Eine Produktentwicklungsaufgabe beschreibt einen definierten Gestaltungsfortschritt im Rahmen der Produktmodellierung.

- Entwicklungsprozeßmodell:

Ein Entwicklungsprozeßmodell ist die rechnerinterne Repräsentation aller zur Beschreibung eines Prozesses notwendigen Informationen. Das Entwicklungsprozeßmodell repräsentiert sowohl den Produktentwicklungsprozeß als auch den Prozeß der Planung, Steuerung und Überwachung des Produktentwicklungsprozesses [202].

## 5.2 Rahmenkonzept

Unter Zugrundelegung der in Kapitel 4 beschriebenen Anforderungen ist ein Rahmenkonzept für das Rechnersystem zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten entwickelt worden, **Bild 5-1**. Das Gesamtsystem wird in drei Module gegliedert. Das Modul zur sicherheitsintegrierten Prozeßgestaltung übernimmt dabei die Aufgaben der Planung, Steuerung und Überwachung von Prozessen, das Modul zur sicherheitsintegrierten Produktgestaltung die Aufgaben der Planung, der Konzeption, des Entwurfs, der Ausarbeitung und der sicherheitstechnischen Bewertung des Produktes. Defizite, die im Rahmen der sicherheitstechnischen Produktbewertung festgestellt wurden, werden durch das Modul zur sicherheitsintegrierten Optimierung von Prozessen und Produkten beseitigt. Der Datentransfer zwischen den Modulen wird über einen Prozeß- und Produktdatenmanager koordiniert. Als Werkzeuge zur Produktgestaltung werden Berechnungsprogramme, ein CAD-System und ein 3D-Bewegungssimulationssystem eingesetzt. Sämtliche Produktentwicklungswerkzeuge greifen dabei auf ein Produktmodell zu, in das die während der Werkzeugmaschinenentwicklung erzeugten Produktdaten konsistent und redundanzfrei abgespeichert werden [191]. Die Standardwerkzeuge der Produktgestaltung können anwendungsfallspezifisch um weitere Bausteine ergänzt werden. So wird für die Aufgabenstellung „Sicherheitsgerechte Werkzeugmaschinenentwicklung“ ein Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“ zur Beurteilung der Aufprallfestigkeit von Materialien trennender Schutzeinrichtungen angebunden. Die Bereitstellung produktbezogener Sicherheitsdaten erfolgt im Rahmen dieses Ansatzes ebenfalls anwendungsfallspezifisch durch einen Zugriff auf Produktwissensbasen. Prototypisch wird eine Wissensbasis *Maschinensicherheit* entwickelt und angebunden, aus der Hinweise zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Maschinenbaugruppen und -bauteilen ausgelesen werden können.



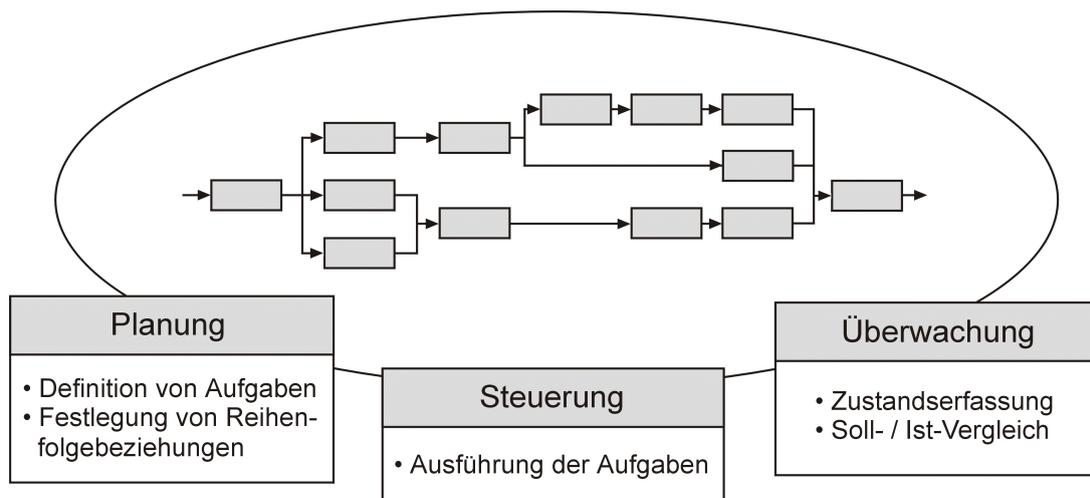
**Bild 5-1:** Rahmenkonzept des Rechnersystems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten

Kapitel 5.3 stellt zunächst die im Rahmen dieses Ansatzes realisierten Basisfunktionen der Prozeß- und Produktgestaltung vor. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5.4 Systemfunktionen beschrieben, die die Prozeß- und Produktgestaltung unter besonderer Berücksichtigung sicherheitstechnischer Anforderungen unterstützen.

### 5.3 Basisfunktionen der Prozeß- und Produktgestaltung

#### 5.3.1 Prozeßgestaltung

Basisfunktionen der Prozeßgestaltung sind Systemfunktionen zur Planung, Steuerung und Überwachung des Produktentwicklungsprozesses [212], **Bild 5-2**.



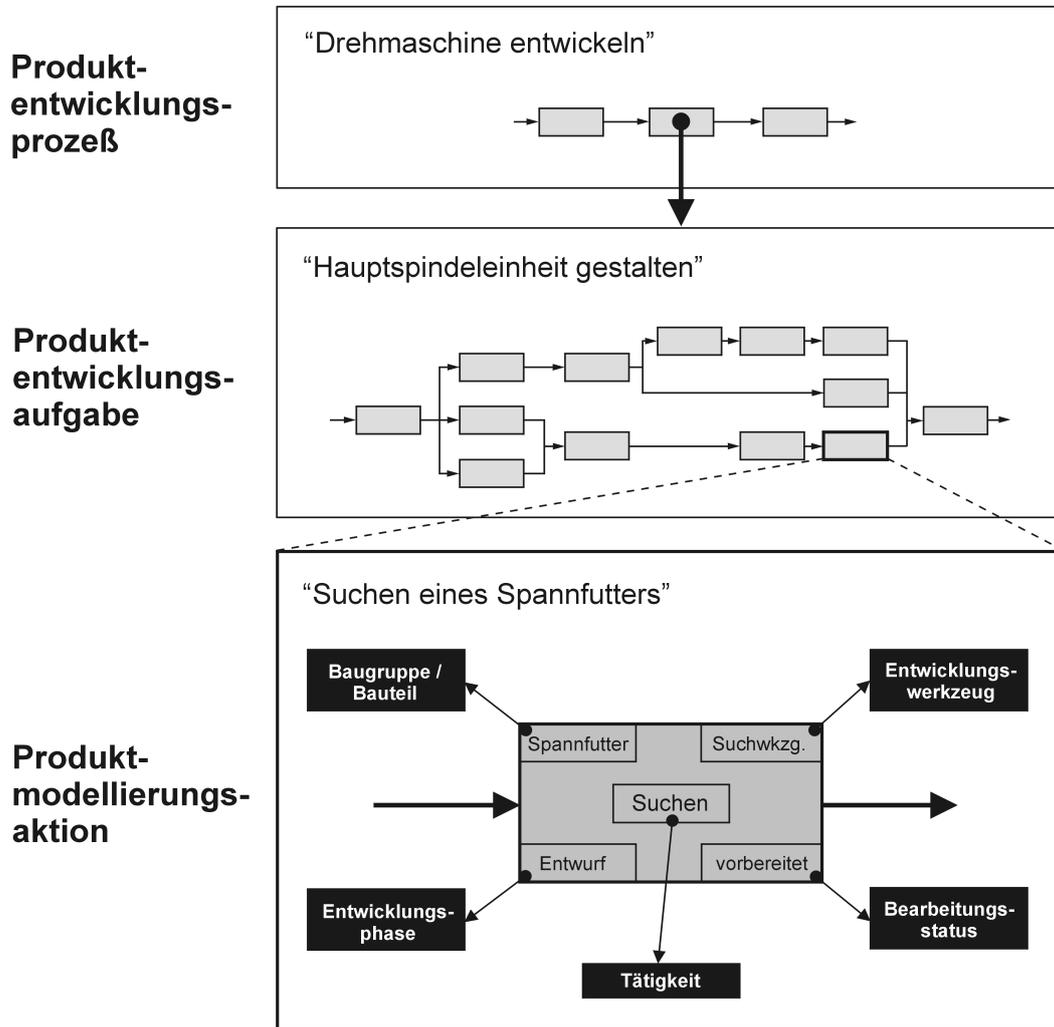
**Bild 5-2:** Basisfunktionen der Prozeßgestaltung [212]

Gegenstand der Ablaufplanung ist die Gliederung des Gesamtprozesses in einzelne Aufgaben und die Definition der Prozeßablaufstruktur durch Festlegung von Reihenfolgebeziehungen. Ziel der Prozeßsteuerung und -überwachung ist es, die Durchführung des Prozesses auf der Grundlage der Ablaufplanung zu gewährleisten.

#### Planung

Produktentwicklungsprozesse sind die Verknüpfung von Produktentwicklungsaufgaben. Die einzelnen Aufgaben können wiederum durch Produktmodellierungsaktionen konkretisiert werden. Eine Produktmodellierungsaktion stellt dabei die kleinste Einheit an Gestaltungsfortschritt dar [202]. Durch die Verknüpfung der Produktentwick-

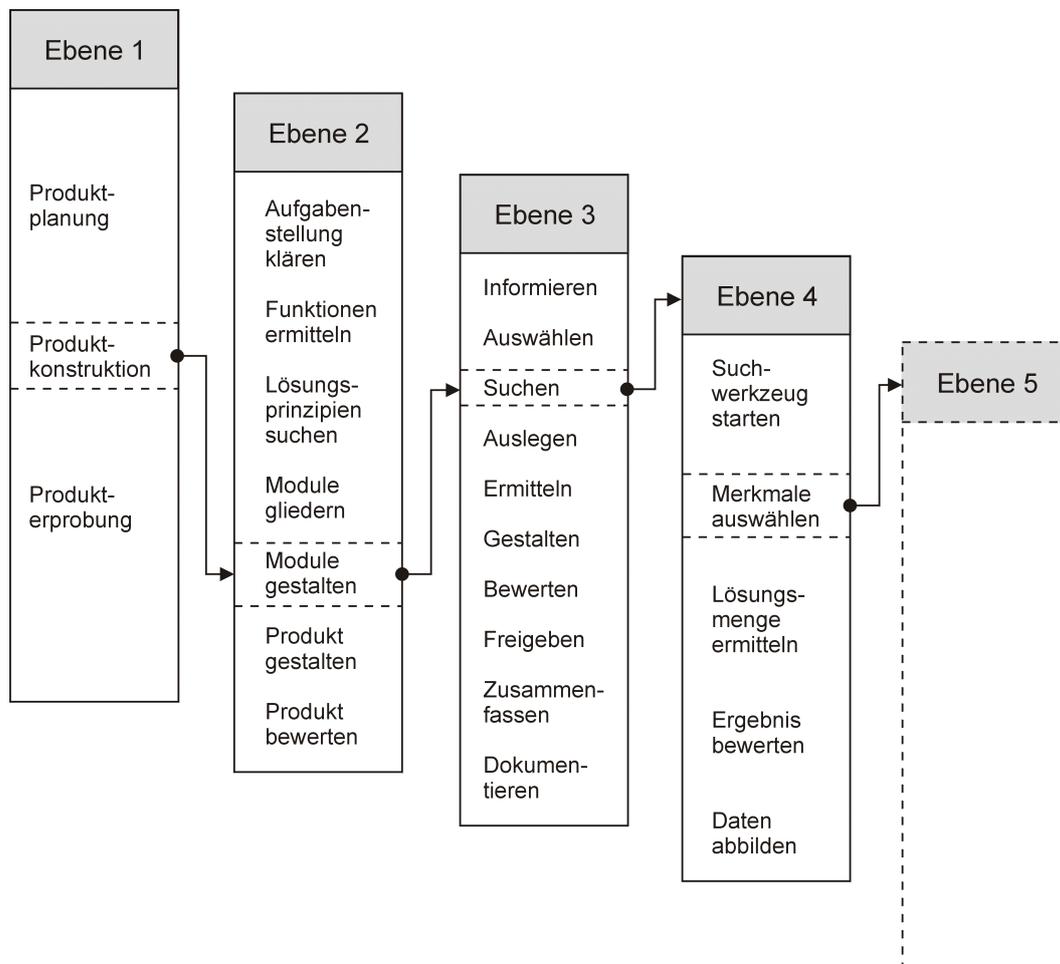
lungsaufgaben bzw. -aktionen entsteht eine hierarchisch gegliederte Struktur der im Rahmen des Entwicklungsprozesses durchzuführenden Tätigkeiten, **Bild 5-3**.



**Bild 5-3:** Gliederung des Produktentwicklungsprozesses in Produktentwicklungsaufgaben und Produktmodellierungsaktionen

Produktmodellierungsaktionen im Rahmen dieses Ansatzes beinhalten neben Angaben zur Baugruppe/ zum Bauteil, zur Entwicklungsphase, zur Tätigkeit und dem Bearbeitungsstatus auch Informationen zu geeigneten Produktentwicklungswerkzeugen. Das Beschreiben einer Produktmodellierungsaktion beginnt mit der Auswahl der zu modellierenden Baugruppe/ Bauteil und der Definition der durchzuführenden Tätigkeit. Die Einträge in den Auswahllisten sind dabei von der hierarchisch übergeordneten Produktentwicklungsaufgabe abhängig. Wurde beispielsweise in der zweiten

Modellierungsebene die Tätigkeit *Module gestalten* gewählt, so werden in der dritten Modellierungsebene nur die diese Tätigkeit konkretisierende Handlungen, wie *Suchen*, *Auslegen* oder *Gestalten*, in der Auswahlliste angezeigt. Diese Vorgehensweise ist beliebig fortführbar. Ergebnis ist eine strukturierte Gliederung der durchführbaren Tätigkeiten, deren Konkretisierungsgrad mit steigender Hierarchietiefe zunimmt, **Bild 5-4**.



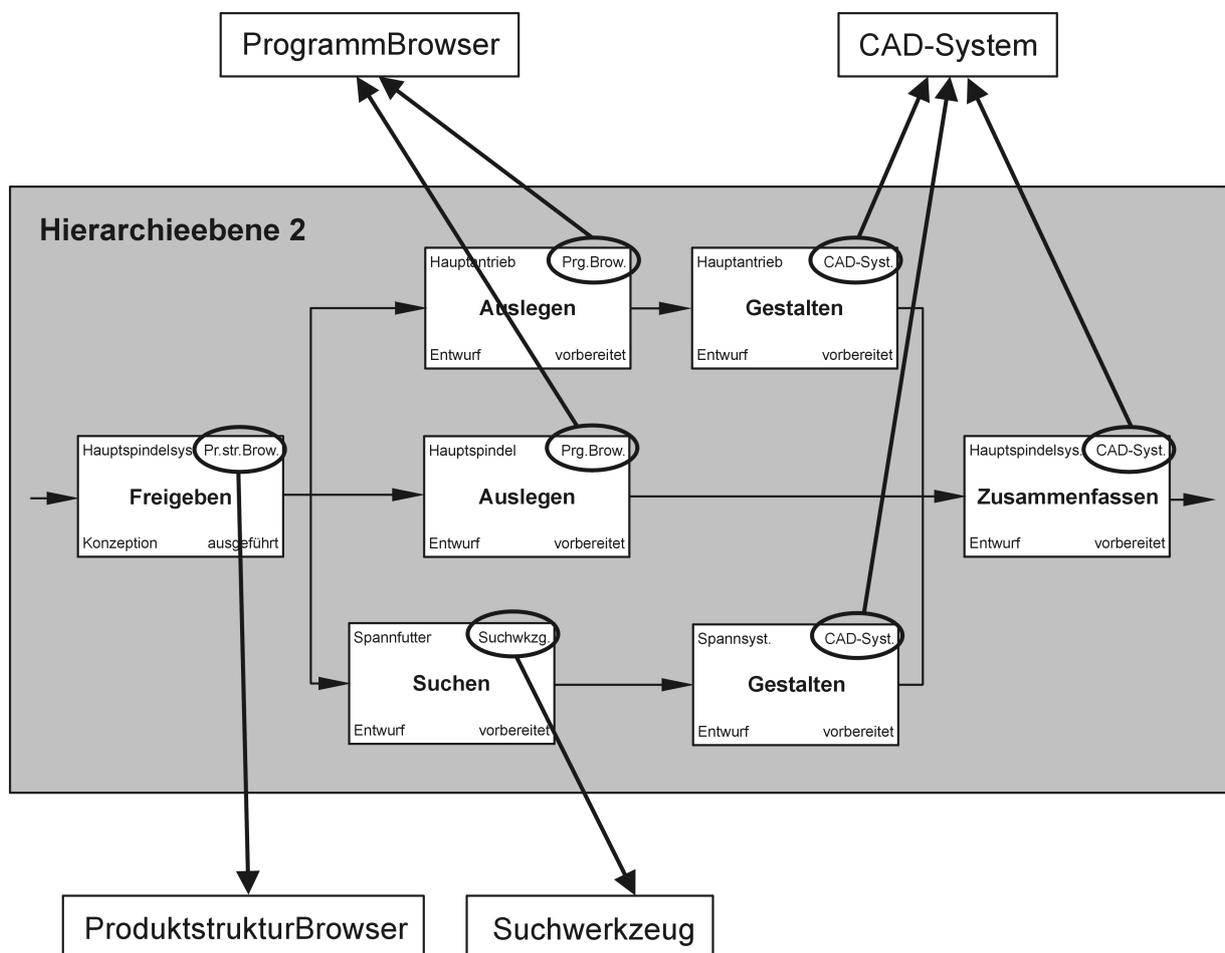
**Bild 5-4:** Strukturierte Gliederung von Modellierungstätigkeiten

Der Zustand, in dem sich eine Modellierungsaktion befindet, wird durch das Attribut *Bearbeitungsstatus* definiert. Es wird unterschieden in die Zustände *Aktion vorbereitet*, *Aktion in Bearbeitung* und *Aktion ausgeführt*. Dabei ist eine Aktion *vorbereitet*, wenn sämtliche Voraussetzungen für ihre Ausführung erfüllt sind, wie beispielsweise das Vorhandensein von Eingabeparametern zum Starten von Berechnungsprogrammen. Eine Aktion ist *in Bearbeitung*, wenn eine ihrer Teilaktionen ausgeführt

wird, und eine Aktion ist *ausgeführt*, wenn sämtliche Teilaktionen erfolgreich beendet worden sind. Eine Zustandsänderung erfolgt durch die Übergabe entsprechender Statusinformationen vom Produktgestaltungs- an das Prozeßgestaltungsmodul. Die für die Ausführung der einzelnen Aufgaben vorhandenen Produktentwicklungswerkzeuge werden dem Konstrukteur über die Auswahlliste *Entwicklungswerkzeug* angezeigt. Nach Selektion eines Eintrages aus dieser Liste wird dieses für den Zeitraum der Aufgabenbearbeitung an das Prozeßgestaltungsmodul angebunden.

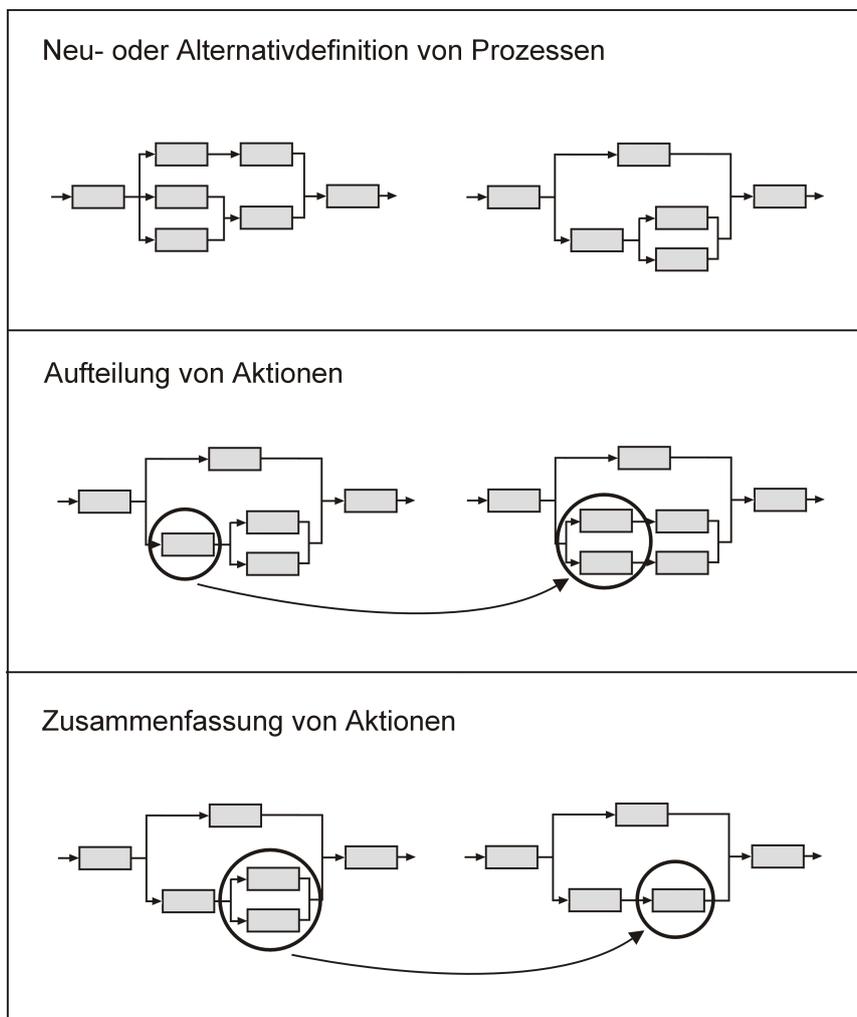
### Steuerung und Überwachung

Im Rahmen der Steuerung wird die Ausführung der Produktmodellierungsaktionen und damit das Starten der entsprechenden Produktentwicklungswerkzeuge veranlaßt, **Bild 5-5**.



**Bild 5-5:** Steuerungsfunktion des Prozeßgestaltungsmoduls

Durch eine Überwachungsfunktion wird der aktuelle Stand des Produktentwicklungsprozesses mit dem geplanten Verlauf verglichen. Bei gegebenenfalls auftretenden Abweichungen werden durch die Überwachungsfunktion entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet. Neben einem optimierten Ressourceneinsatz zählen dazu die Neu- bzw. Alternativdefinition von Prozessen sowie die Aufteilung bzw. Zusammenfassung von Aktionen [44], **Bild 5-6**.

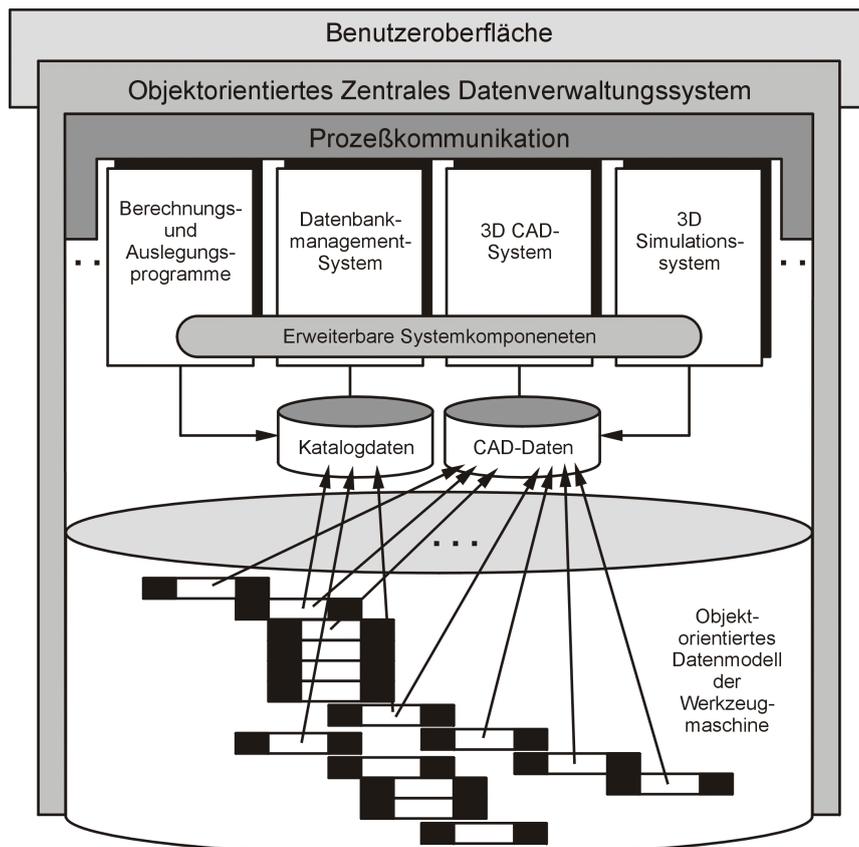


**Bild 5-6:** Gegenmaßnahmen zur Beseitigung von Prozeßabweichungen [nach 44]

### 5.3.2 Produktgestaltung

Basisfunktionen, die im Rahmen der Produktgestaltung benötigt werden, sind Funktionen zur Zeichnungserstellung, Auslegungsberechnung und Simulation des Baugruppenverhaltens. Dazu wird im Rahmen dieses Ansatzes ein Konstruktionssystem

zur Werkzeugmaschinenentwicklung eingesetzt, das basierend auf einer logisch zentralen und redundanzfreien Datenhaltung ein CAD-System, ein Simulationssystem sowie Berechnungs-, Auslegungs- und Optimierungsprogramme miteinander verknüpft [191], **Bild 5-7**.



**Bild 5-7:** Unterstützung der Produktgestaltung durch ein Konstruktionssystem zur Werkzeugmaschinenentwicklung [191]

Ausgehend vom Aufbau der Erzeugnisstruktur der Werkzeugmaschine werden die Eigenschaften der Baugruppen und Bauteile durch die Zuordnung entsprechender Berechnungsprogramme ermittelt. Bei fehlerfreier Ausführung der Programme erfolgt eine Überprüfung der Werte der Ausgabedaten auf Widerspruchsfreiheit zu vorher berechneten Größen. Diese Funktionalität gewährleistet, daß Abweichungen, die möglicherweise zu Fehlern in der Konstruktion führen können, schon frühzeitig erkannt werden. Die detaillierte Gestaltung der Werkzeugmaschinenkomponenten wird durch ein 3D-CAD-System unterstützt, das vordefinierte Geometriemodelle von Maschinenbaugruppen in parametrisierter Form enthält. Durch Veränderung der vari-

ablen Bemaßungen können Baugruppen beliebiger Dimension erzeugt werden. Die Bewegungssimulation erfolgt mit Hilfe eines 3D-Simulationssystems. Neben der automatischen Erkennung von Kollisionen während des Bearbeitungsprozesses können durch die Simulation auch Aussagen darüber getroffen werden, ob ein Maschinenkonzept ein Werkstückspektrum in einer vorgegebenen Zeit bearbeiten kann.

## 5.4 Funktionen zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten

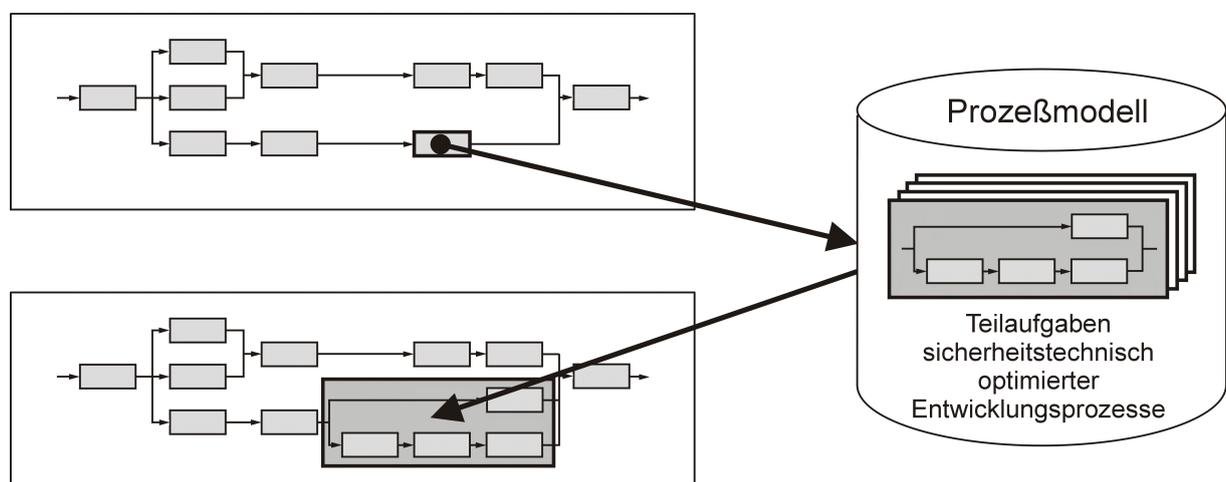
### 5.4.1 Prozeß- und Produktgestaltung

Die bei der Gestaltung des Produktes zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen werden aus der Wissensbasis des Rechnersystems, siehe Kapitel 6, ausgelesen. Die Anzeige der Sicherheitsanforderungen erfolgt in Abhängigkeit von der Baugruppe bzw. dem Bauteil und der jeweiligen zu bearbeitenden konstruktiven Teilaufgabe. Beispielhaft sind in **Bild 5-8** Sicherheitsanforderungen dargestellt, die der Produktentwickler bei der Gestaltung einer Drehmaschinen-Hauptspindeleinheit zu erfüllen hat.

Hauptspindel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidung von Spindelbruch</li> <li>• Aufrechterhaltung der Schmierung</li> <li>• Notlaufeigenschaften</li> </ul>
Hauptantrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschirmung stromführender Bauteile</li> <li>• Überspannungssicherung</li> </ul>
Spannsystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kenntnis der wirksamen Spannkraft</li> <li>• Kenntnis der aktuellen Drehzahl</li> <li>• Beibehaltung der Spannkraft</li> <li>• Vermeidung der Freisetzung von Backeneinheit und Fliehkewicht</li> <li>• Sicherstellung des Formschlusses zwischen Grund- und Aufsatzbacke</li> <li>• Antriebsentkopplung bei Kollision</li> </ul>

**Bild 5-8:** Sicherheitstechnische Anforderungen an eine Drehmaschinen-Hauptspindeleinheit

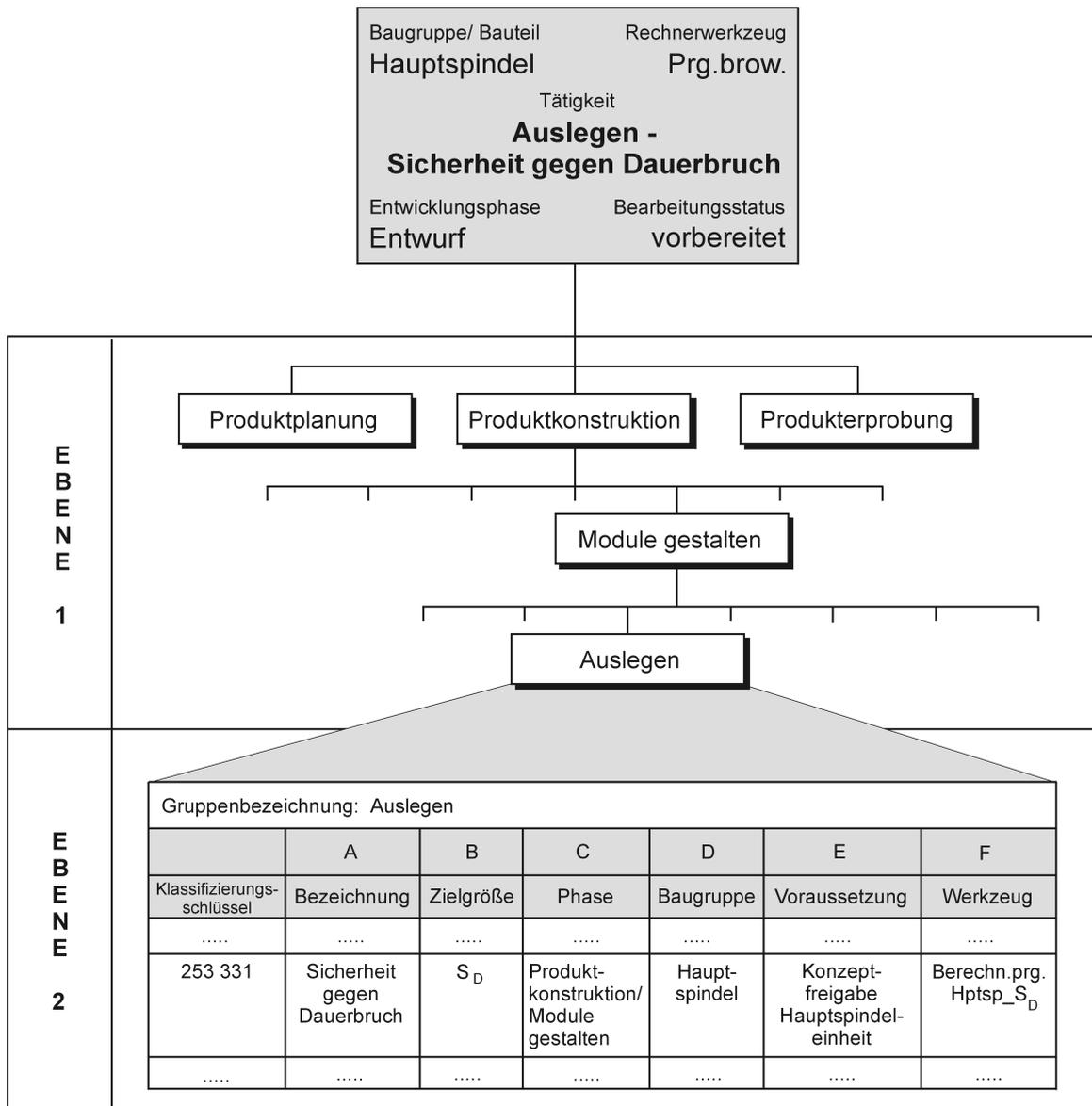
Unter Zugrundelegung der sicherheitstechnischen Anforderungen an das Produkt erfolgt die Planung des Produktentwicklungsprozesses. Um den Konstrukteur bei diesem komplexen Vorgang zu unterstützen, besteht die Möglichkeit der Wiederverwendung von Produktentwicklungsteilaufgaben aus bereits abgeschlossenen, sicherheitstechnisch optimierten Entwicklungsprozessen. Dazu wird eine Systemfunktion bereitgestellt, die bereits durchgeführte und sicherheitstechnisch optimierte Produktentwicklungsprozesse analysiert und Teilaufgaben mit großer Ähnlichkeit zur aktuellen Aufgabenstellung in den laufenden Prozeß integriert, **Bild 5-9**.



**Bild 5-9:** Wiederverwendung von im Prozeßmodell gespeicherten Teilaufgaben sicherheitstechnisch optimierter Entwicklungsprozesse

Der Ähnlichkeitssuche wird eine zweistufige Beschreibungssystematik zugrundegelegt, die zur Charakterisierung der Teilaufgaben sicherheitstechnisch optimierter Produktentwicklungsprozesse dient, **Bild 5-10**. In der ersten Beschreibungsebene werden die Produktentwicklungsteilaufgaben, die in ausgewählten Merkmalen übereinstimmen, zu einer Klasse zusammengefaßt. Als Beschreibungsmethode wird in der ersten Ebene die hierarchische Klassifizierung [260] eingesetzt.

Die einheitliche Beschreibung der in einer Klasse zusammengefaßten Produktentwicklungsteilaufgaben erfolgt in der zweiten Beschreibungsebene über Sachmerkmale. Dabei sind Sachmerkmale Objekteigenschaften, die alle Elemente einer Klasse gleichermaßen charakterisieren [259]. Zur Identifikation erhält jede Produktentwicklungsteilaufgabe einen Klassifizierungsschlüssel.

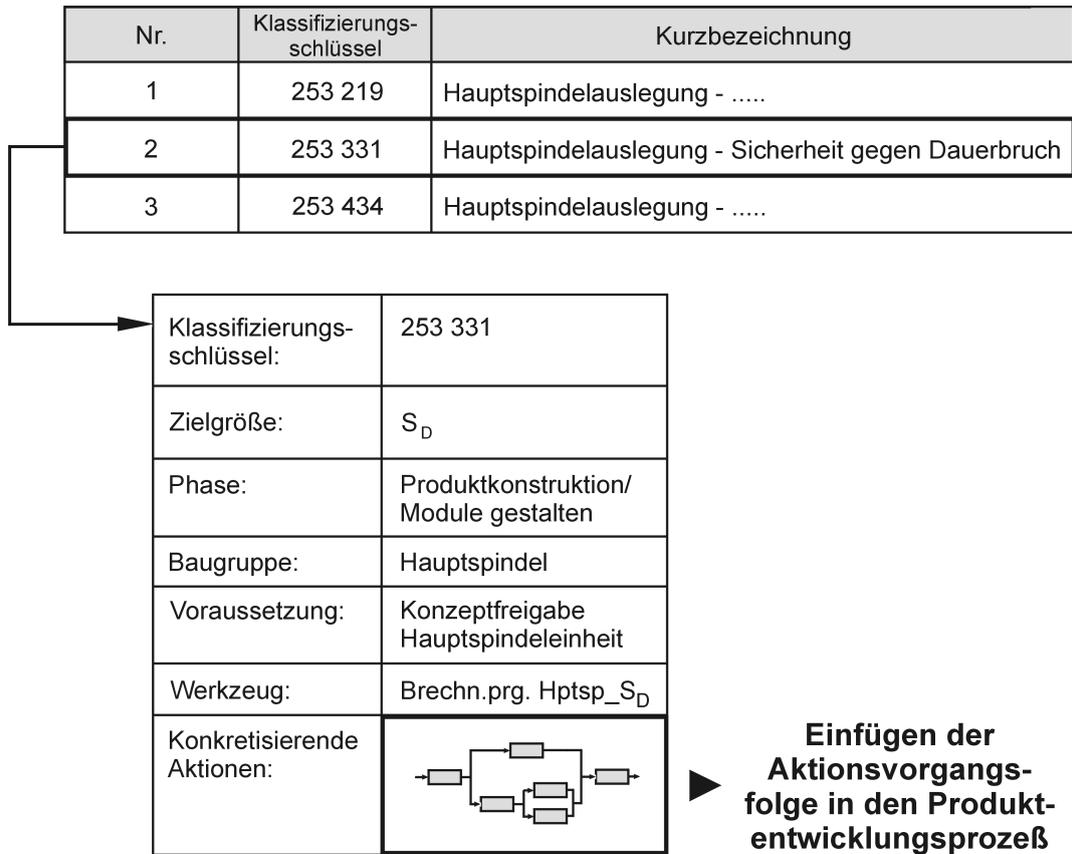


**Bild 5-10:** Zweistufige Beschreibungssystematik

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Systematik werden die Produktentwicklungsteilaufgaben bereits abgeschlossener sicherheitstechnisch optimierter Entwicklungsprozesse in das Prozeßmodell des Rechnersystems abgebildet.

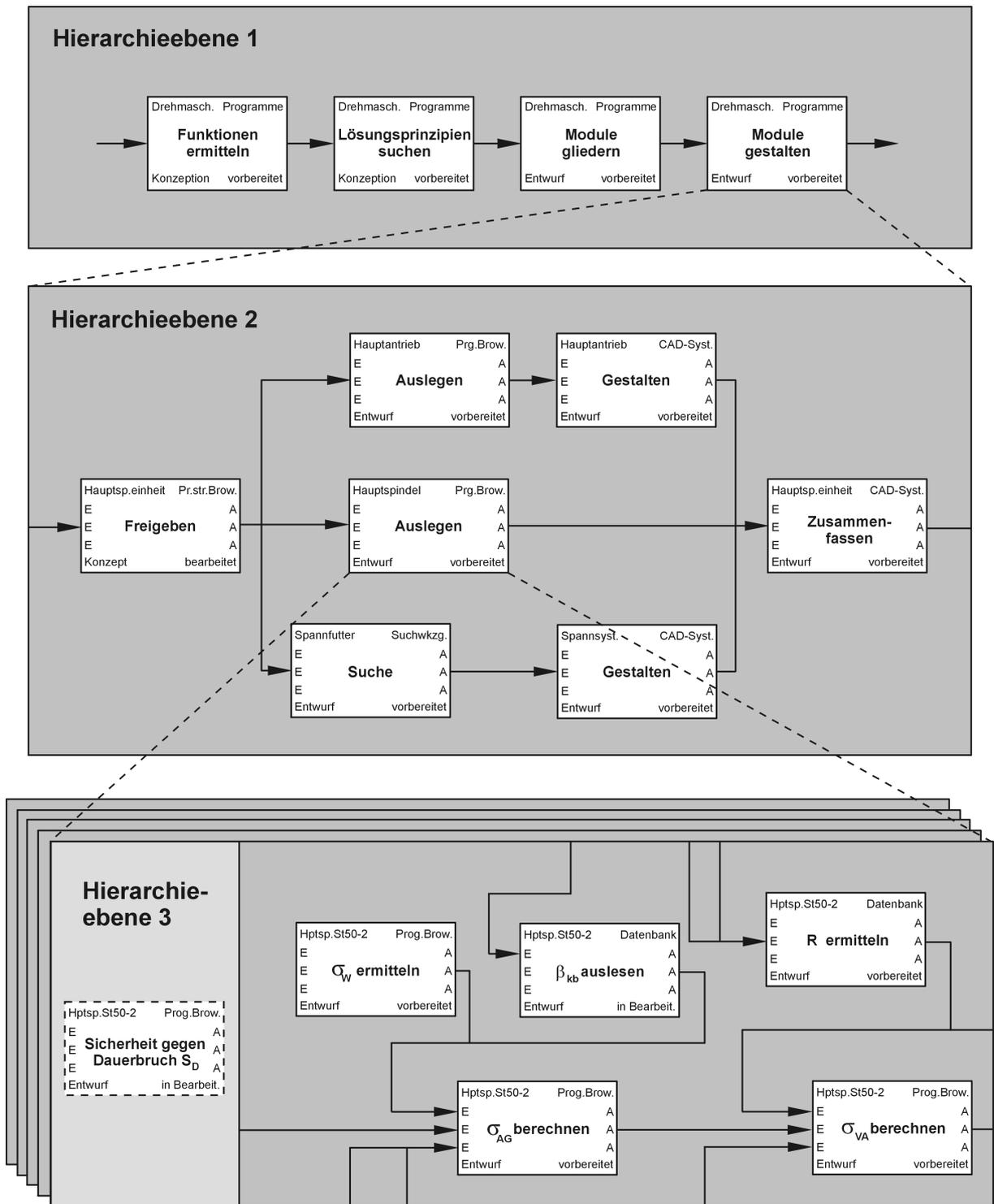
Ziel der Ähnlichkeitssuche ist es, unter Zugrundelegung der vom Produktentwickler definierten Suchkriterien aus der im Prozeßmodell vorhandenen Lösungsmenge von Teilaufgaben sicherheitstechnisch optimierter Produktentwicklungsprozesse eine oder mehrere geeignete Lösungen auszulesen. Die Anzeige der gefundenen Lösungen erfolgt in Form einer Liste, die neben dem Klassifizierungsschlüssel auch die

Kurzbezeichnung der Produktentwicklungsteilaufgabe enthält, **Bild 5-11**. Dadurch gewinnt der Bediener einen schnellen Überblick über den Inhalt der ermittelten Lösungsmenge.



**Bild 5-11:** Anzeige der gefundenen Lösungen

Durch die Auswahl eines Elements aus dieser Liste werden die zu der jeweiligen Produktentwicklungsteilaufgabe gespeicherten Sachmerkmale sowie deren Parameter aufgelistet. Basierend auf diesen Informationen kann der Konstrukteur nun die Entscheidung treffen, ob die ermittelte und die aktuelle Produktentwicklungsteilaufgabe ähnlich sind. Bei hinreichender Ähnlichkeit wird die konkretisierende Aktionsvorgangsfolge ausgelesen und in den aktuellen Produktentwicklungsprozeß eingefügt. Diese Vorgehensweise ist beliebig wiederholbar. Auf diese Weise entsteht eine Entwicklungsprozeßstruktur, die um Aktionsvorgangsfolgen zur sicherheitsgerechten Baugruppen-/Bauteilauslegung ergänzt wurde. Beispielhaft ist in **Bild 5-12** eine Aktionsvorgangsfolge dargestellt, die zur Ermittlung der Kenngröße „Sicherheit gegen Dauerbruch“ im Rahmen der Hauptspindelauslegung dient.



**Bild 5-12:** Integration einer Aktionsvorgangsfolge zur Bestimmung der Kenngröße *Sicherheit gegen Dauerbruch  $S_D$*  im Rahmen der Auslegung der Hauptspindel einer Drehmaschine

## 5.4.2 Produktbewertung

Die Einhaltung sicherheitstechnischer Anforderungen während der Produktgestaltung wird durch eine im Anschluß an die einzelnen Produktentwicklungsaufgaben durchzuführende sicherheitstechnische Bewertung überprüft. Dazu erfolgt zunächst das Ergänzen des Prozeßablaufplans um sicherheitstechnische Bewertungsaktionen. Insbesondere werden nach den Teilaufgaben Bewertungsaktionen eingefügt, die die Gestaltung von sicherheitsrelevanten Systemteilen zur Zielsetzung haben.

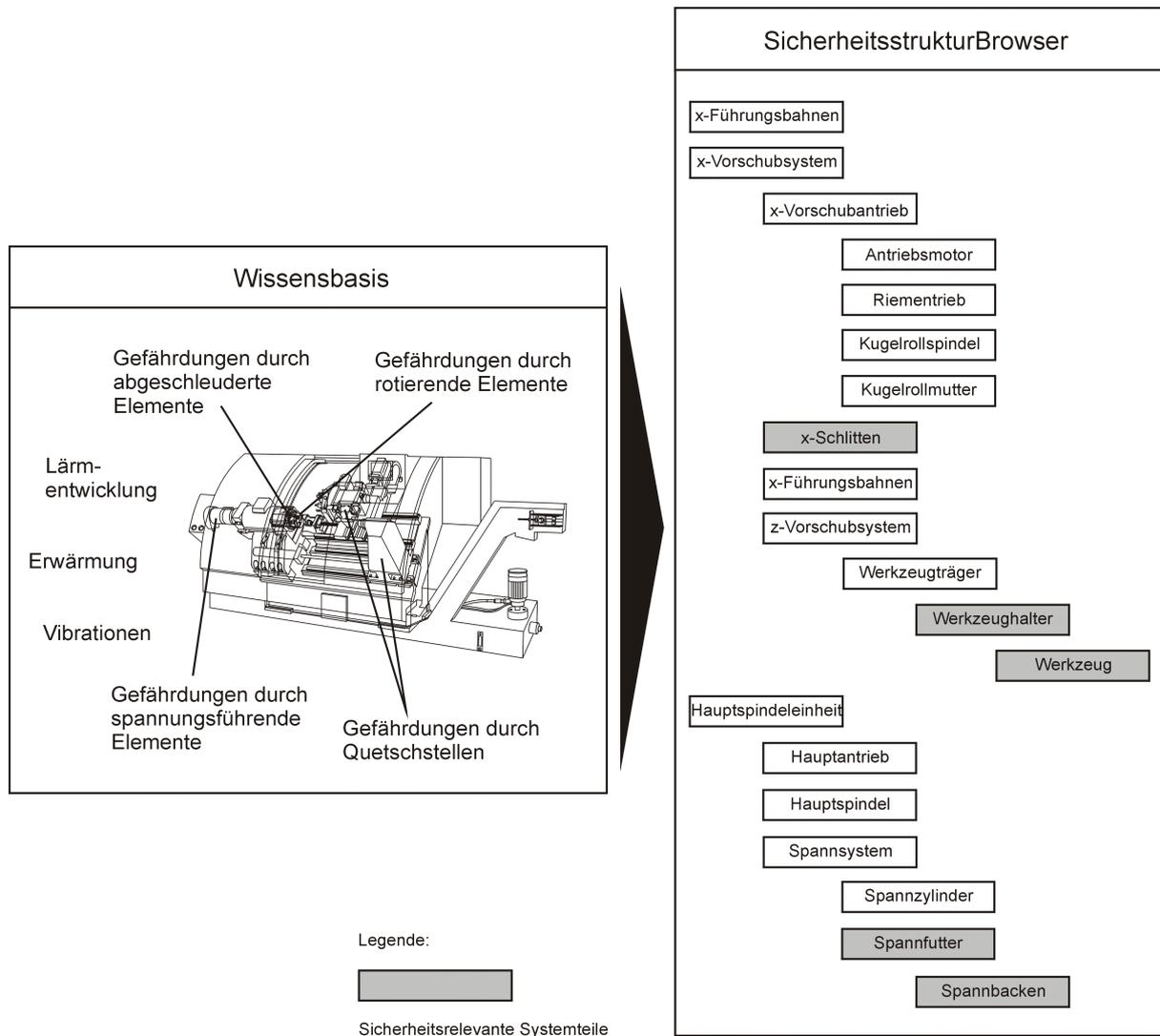
Unter sicherheitsrelevanten Systemteilen werden nach DRIEDGER [35] Systemteile verstanden, bei deren Versagen eine oder mehrere Gefahren auftreten können. Die Festlegung der sicherheitsrelevanten Systemteile erfolgt im *Sicherheitsstruktur-Browser* basierend auf einer Analyse des in der Wissensbasis *Maschinensicherheit* gespeicherten Wissens aus Schadensfällen vergleichbarer Maschinentypen, **Bild 5-13**.

Im *SicherheitsstrukturBrowser* sind die Baugruppen und Bauteile der Werkzeugmaschine in hierarchischer Form angeordnet. Der Top-Down-Aufbau des *SicherheitsstrukturBrowsers* beginnt mit der Maschine selbst, die nach und nach um ihre Baugruppen, Bauteile und Elemente erweitert wird. Neben der Visualisierung der sicherheitstechnisch relevanten Systemteile werden im *SicherheitsstrukturBrowser* darüber hinaus sämtliche Ergebnisse der sicherheitstechnischen Produktbewertung baugruppen-, bauteil- bzw. elementbezogen abgebildet.

Durch die Ausführung der neu implementierten sicherheitstechnischen Bewertungsaktionen wird die sicherheitstechnische Produktbewertung eingeleitet, die sich in die Arbeitsschritte

- *Gefahrenanalyse*,
- *Definition von Schutzziele*n und
- *Soll-Ist-Maßnahmenvergleich*

gliedert [217].



**Bild 5-13:** Festlegung sicherheitsrelevanter Systemteile im *Sicherheitsstruktur-Browser*

## Gefahrenanalyse

Aufgabe der Gefahrenanalyse ist es, die von einem technischen System während des Betriebes ausgehenden Gefahren qualitativ und quantitativ zu erfassen. Dazu werden die an der Werkzeugmaschine auftretenden Gefahren bauteilbezogen ermittelt und deren Ursachen und Auswirkungen wissensbasiert beschrieben. Als Methode wird die Vorläufige Gefahrenanalyse [139] eingesetzt, die eine Gefährdung des Bedieners bzw. der Umgebung infolge von Energiefreisetzung untersucht, **Bild 5-14**.

Maschinenkomponente	Gefahr	Energiemerkmal	Wirkung auf	
			Bediener	Maschine
Werkzeug	Freisetzung	kinetisch	Quetsch- und Schnittwunden, Prellungen,	Verformungen

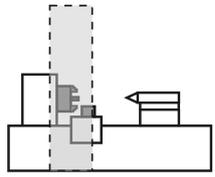
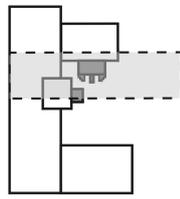
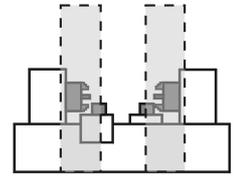
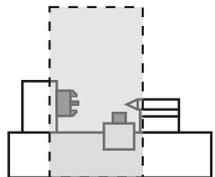
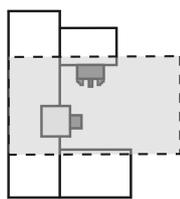
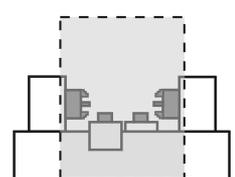
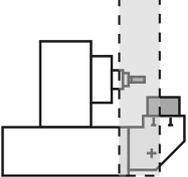
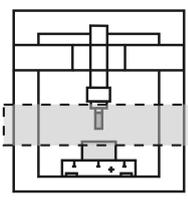
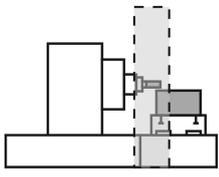
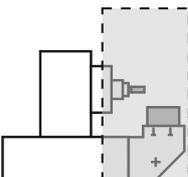
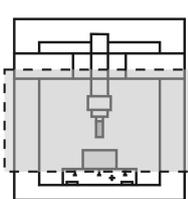
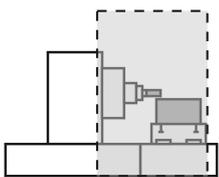
  

Maschinenkomponente	Gefahr	Energiemerkmal	Wirkung auf	
			Bediener	Maschine
Werkstück	Soll- und Nachlaufbewegungen	kinetisch	Quetsch- und Schnittwunden, Prellungen, Gliederverluste	
	technologisch bedingte Temperaturen	thermisch	Verbrennungen	Verformungen
	Freisetzung	kinetisch	Schnittwunden, Prellungen, Zertrümmerungen	Verformungen, Risse, Brüche

**Bild 5-14:** Vorläufige Gefahrenanalyse [139]

Die Darstellung der Gefahrenbereiche an der konzipierten Werkzeugmaschine erfolgt im Simulationssystem IGRIP [157]. Zugrundegelegt wird eine Unterteilung der Gefahrenbereiche an Werkzeugmaschinen in Gefahrenbereiche erster und zweiter Ordnung [211]. Die Gefahrenbereiche erster Ordnung beschreiben dabei einen Bereich radial um das Spannfutter beim Drehen bzw. radial um die Werkzeugaufnahme beim Fräsen und kennzeichnen die Flugrichtung tangential zur Umlaufkreisbahn abgeschleuderter Elemente, **Bild 5-15**. Bei einem Großteil der Schadensfälle an Werkzeugmaschinen werden die Werkstücke, Werkzeuge, Spannmittel und Bruchstücke in diese Richtung abgeschleudert.

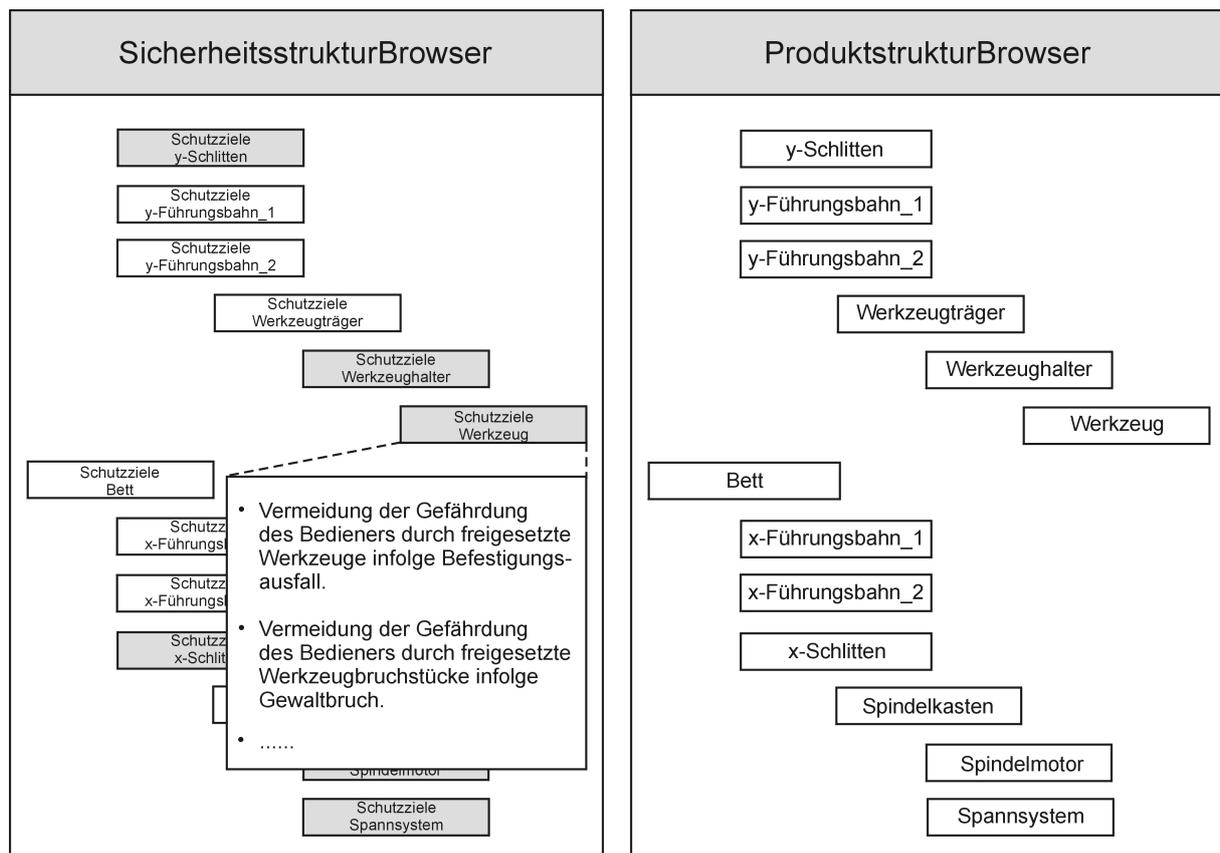
Alle weiteren Flugrichtungen abgeschleuderter Elemente an Werkzeugmaschinen, beispielsweise hervorgerufen durch eine Reflektion eines freigesetzten Teils am Werkzeugmaschinenrundkörper, werden durch einen Gefahrenbereich zweiter Ordnung beschrieben. Darüber hinaus sind im Simulationssystem IGRIP auch die Bereiche zu kennzeichnen, in denen der Bediener dem Risiko einer Verletzung durch technologisch bedingte Bewegungen von Maschinenbaugruppen oder -bauteilen ausgesetzt ist.

	Frontdrehmaschine	Vertikal-Drehmaschine	Gegenspindel-Drehmaschine
Gefahrenbereich 1. Ordnung			
Gefahrenbereich 1. Ordnung mit Verfahrweg z-Achse			
	Konsolfräsmaschine	Tischportalfräsmaschine	Kreuzbetfräsmaschine
Gefahrenbereich 1. Ordnung			
Gefahrenbereich 1. Ordnung mit Verfahrweg z-Achse			

**Bild 5-15:** Gefahrenbereiche erster Ordnung an Dreh- und Fräsmaschinen [211]

### Schutzzieldefinition

Aus dem Ergebnis der Gefahrenanalyse werden anschließend die im Rahmen der Produktentwicklung zu erfüllenden sicherheitstechnischen Schutzziele abgeleitet und den Teil- bzw. Untersystemen der Maschine im *SicherheitsstrukturBrowser* zugeordnet, **Bild 5-16 links**.

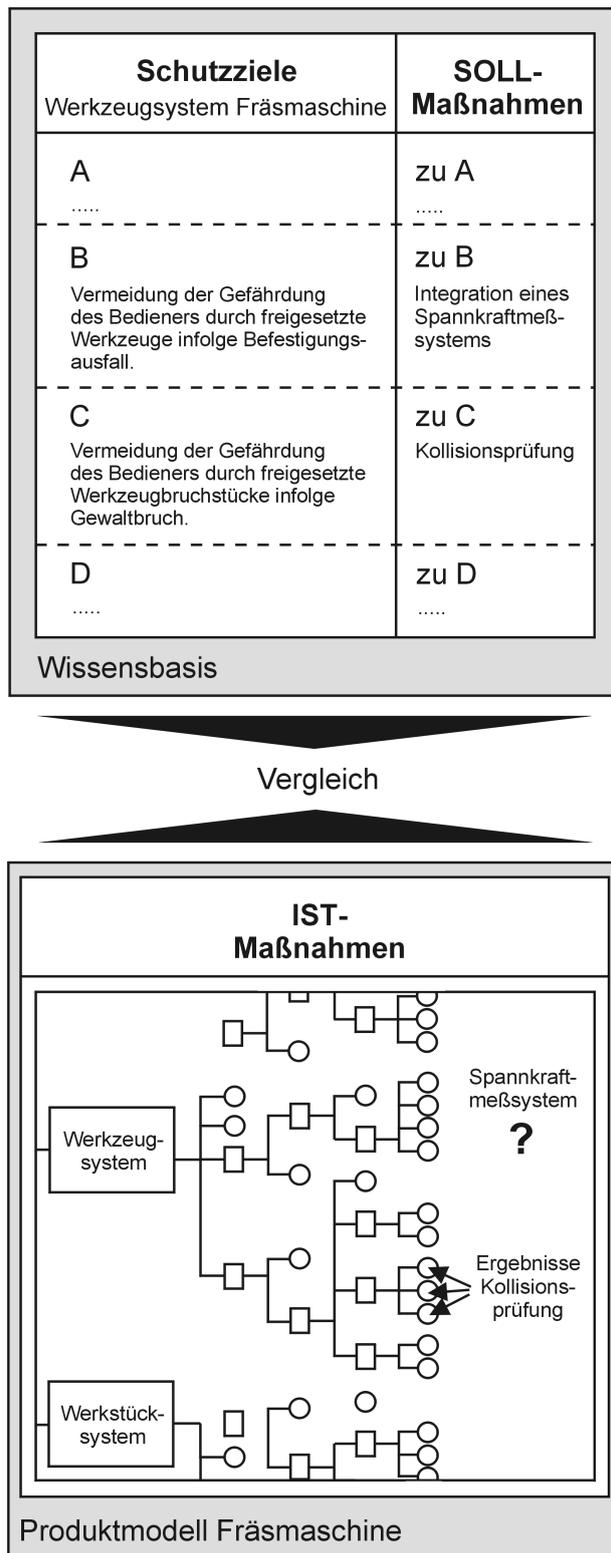


**Bild 5-16:** Zuordnung sicherheitstechnischer Schutzziele im *SicherheitsstrukturBrowser* (links); *ProduktstrukturBrowser* (rechts)

Dadurch entsteht parallel zur Gliederung der Werkzeugmaschine im *ProduktstrukturBrowser*, Bild 5-16 rechts, eine Gliederung des Sicherheitsziels *Gefahrenfreiheit* im *SicherheitsstrukturBrowser* des Rechnersystems.

### Soll-Ist-Maßnahmenvergleich

Zur Erfüllung der zuvor definierten Schutzziele erfolgt im nächsten Arbeitsschritt die Ermittlung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen. Dazu werden zunächst im Rahmen eines Soll-Ist-Maßnahmenvergleichs die geforderten mit den bereits in das Produktmodell der Werkzeugmaschine integrierten Sicherheitsmaßnahmen verglichen, **Bild 5-17**.

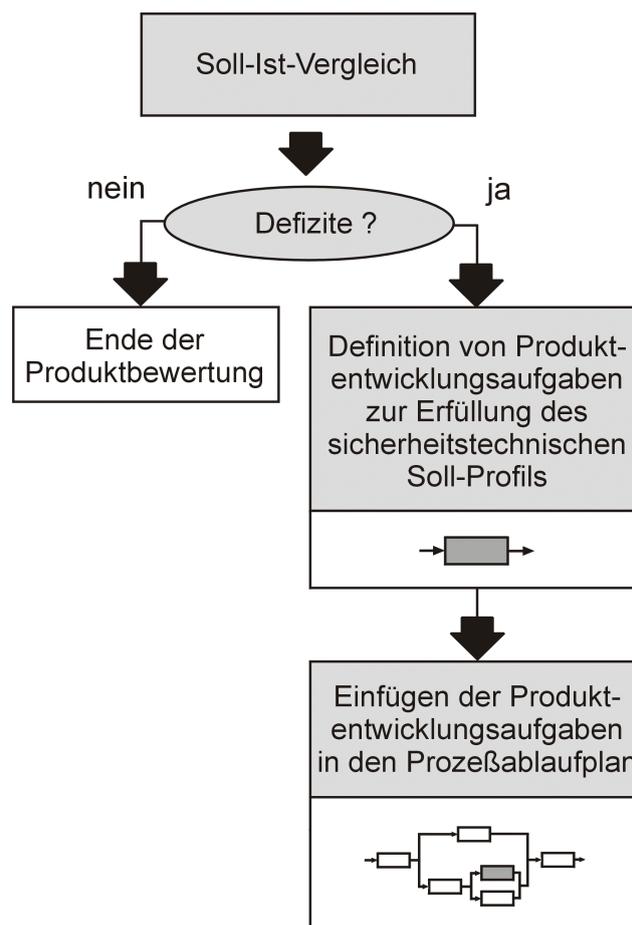


**Bild 5-17:** Soll-Ist-Maßnahmenvergleich für das Beispiel „Werkzeugsystem einer Fräsmaschine“

Fehlende, gleichzeitig aber zur Erfüllung des Soll-Profiles notwendige Sicherheitsmaßnahmen werden basierend auf einer sicherheitstechnisch orientierten Prozeßoptimierung in das Produktmodell der Werkzeugmaschine abgebildet.

### 5.4.3 Prozeß- und Produktoptimierung

Zur Beseitigung der im Rahmen des Soll-Ist-Vergleiches festgestellten Defizite erfolgt zunächst die Definition der Produktentwicklungsaufgaben, deren Ziel die Integration der fehlenden sicherheitstechnischen Maßnahmen ist. Diese werden anschließend in den Prozeßablaufplan eingefügt, **Bild 5-18**.



**Bild 5-18:** Definition und Einfügen von Produktentwicklungsaufgaben zur Beseitigung der sicherheitstechnischen Defizite

Eine sogenannte Kollisionsfunktion überprüft daraufhin die Reihenfolgebeziehungen zwischen den einzelnen Aufgaben und veranlaßt, falls inhaltliche Überschneidungen auftreten, eine Neugenerierung des Prozeßablaufplans. Anschließend erfolgt das Ausführen der neu implementierten Produktentwicklungsaufgaben und damit die sicherheitstechnische Optimierung des Produktes.

Für das Anwendungsbeispiel „Sicherheitsgerechte Werkzeugmaschinenentwicklung“ werden Hinweise zur Dimensionierung und Gestaltung von Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik während der Aufgabenausführung durch die Wissensbasis *Maschinensicherheit* zur Verfügung gestellt, siehe Kapitel 6. Zusätzlich erfolgt die Beurteilung von Sicherheitsmaßnahmen, die im Versagensfall stoßartig belastet werden können, mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM), Kapitel 8.

## **6 Aufbau einer Wissensbasis *Maschinensicherheit***

### **6.1 Allgemeines**

Grundlage des konzipierten Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten ist eine prototypisch realisierte Wissensbasis *Maschinensicherheit*, in die neben Erkenntnissen aus Schadensfällen spanender Werkzeugmaschinen auch Hinweise zur Dimensionierung und Gestaltung von Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik abgebildet wurden.

### **6.2 Anforderungen**

Um das gesammelte Schadensfall-, Dimensionierungs- und Gestaltungswissen im Rahmen der sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung gezielt bereitstellen zu können, wird die Wissensbasis in Wissensbausteine gegliedert. In den Wissensbausteinen werden die Daten einzelner Bereiche strukturiert zusammengefaßt. Eine Ergänzungsmöglichkeit der Wissensbasis um weitere Wissensbausteine ist vorzusehen.

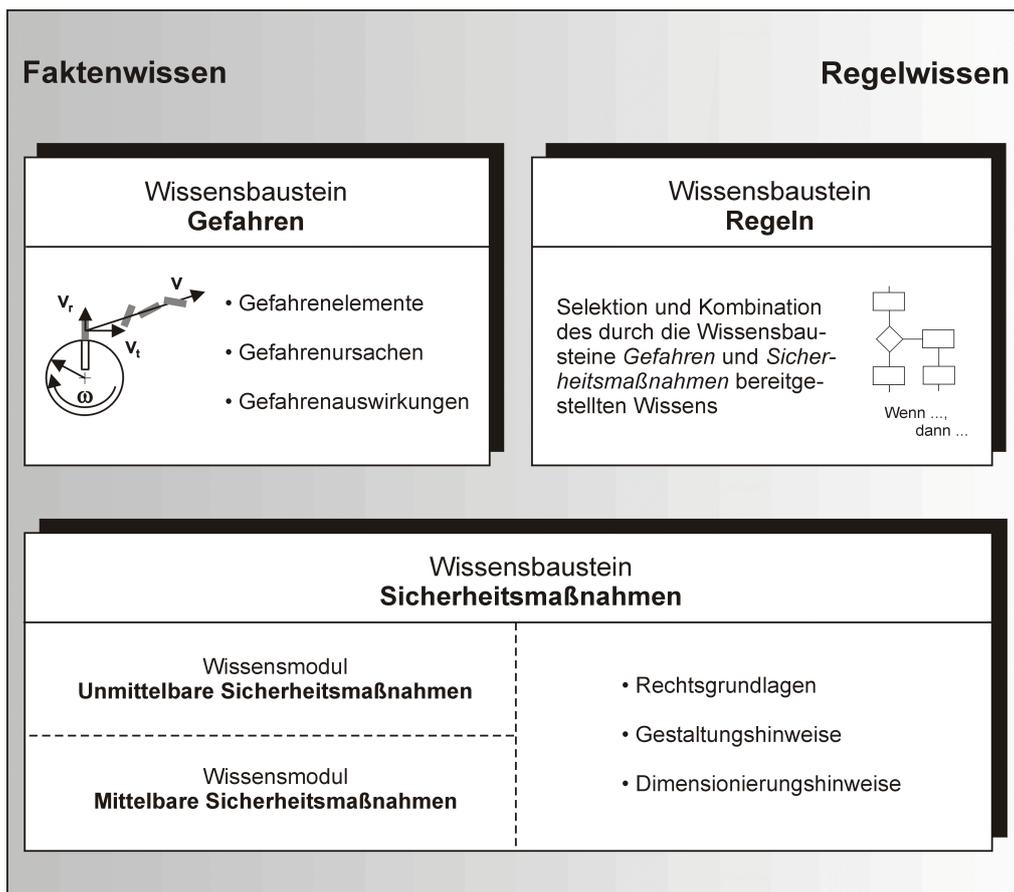
Hauptaufgabe der Wissensbasis ist das Speichern, Verwalten und anwendungsfallbezogene Bereitstellen des zur sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung benötigten Dimensionierungs- und Gestaltungswissens. Dazu müssen neben Funktionen zur Eingabe und zum Abbilden von neuem Wissen auch Funktionen zum Ändern, Löschen und Ermitteln von vorhandenem Wissen realisiert werden. Der Datenbestand ist mit Hilfe einer Konsistenzüberwachungsmethode auf Widersprüche zu kontrollieren. Inkonsistenzen, die festgestellt werden, sind dem Systembenutzer anzuzeigen.

Zur datentechnischen Anbindung der Wissensbasis an die Module des Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten müssen geeignete Schnittstellen definiert werden.

Ebenso ist eine komfortable und einheitliche grafische Benutzerschnittstelle zu spezifizieren, um eine breite Akzeptanz der Wissensbasis in der praktischen Ingenieurarbeit zu erzielen. Aus ergonomischer und handhabungstechnischer Sicht wird eine durchgängige Lösung für das Gesamtsystem gefordert. Unter dem Kriterium der Benutzerfreundlichkeit ist darüber hinaus die Bereitstellung einer leistungsfähigen Hilfefunktion von Bedeutung.

### 6.3 Strukturieren der Wissensbasis

Voraussetzung für eine gezielte Bereitstellung des im Rahmen des sicherheitsgerechten Produktentwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen benötigten Wissens ist eine Strukturierung der Wissensbasis in geeignete Bausteine, **Bild 6-1**.



**Bild 6-1:** Bausteine der Wissensbasis *Maschinensicherheit*

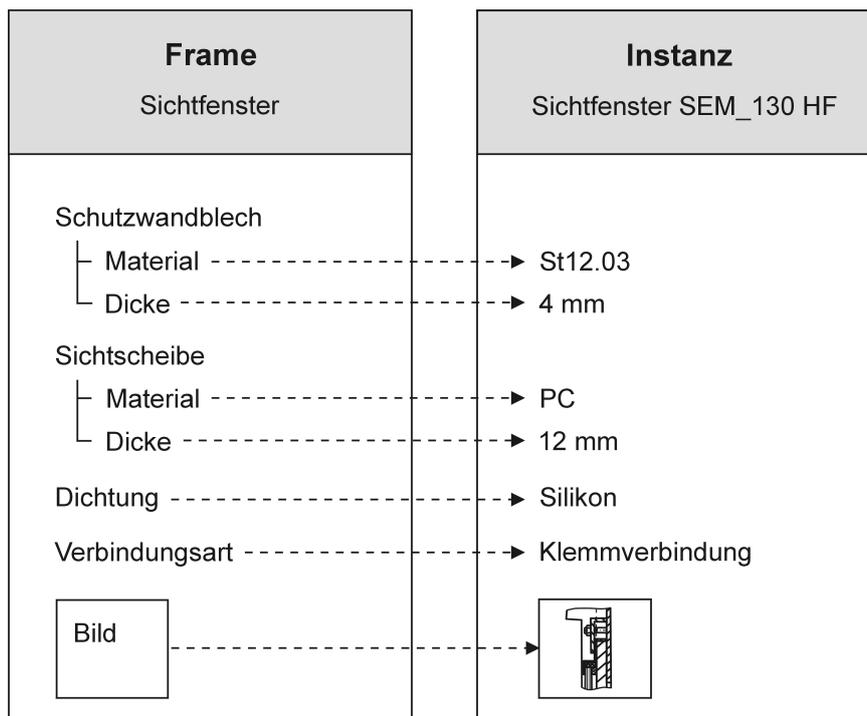
In den Wissensbaustein *Gefahren* werden Erkenntnisse aus Schadensfällen an Werkzeugmaschinen abgebildet. Ziel ist es, den Konstrukteur durch die Bereitstellung von Wissen zu Gefahrenelementen, Gefahrenursachen und Gefahrenauswirkungen bei der Analyse der von der Maschine ausgehenden Schadenswirkungen zu unterstützen. Rechtsgrundlagen sowie Hinweise zur sicherheitsgerechten Dimensionierung und Gestaltung von unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitsmaßnahmen an Werkzeugmaschinen werden in den Wissensbaustein *Sicherheitsmaßnahmen* implementiert. Dieser wird entsprechend in die Wissensmodule *Unmittelbare Sicherheitsmaßnahmen* und *Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen* unterteilt.

Mechanismen, die das vorhandene Wissen zu Schadensfällen sowie Hinweisen zur Dimensionierung und Gestaltung von Sicherheitsmaßnahmen analysieren und problemlösungsorientiert bereitstellen, werden in den Wissensbaustein *Regeln* abgebildet.

#### 6.4 Wissensrepräsentation

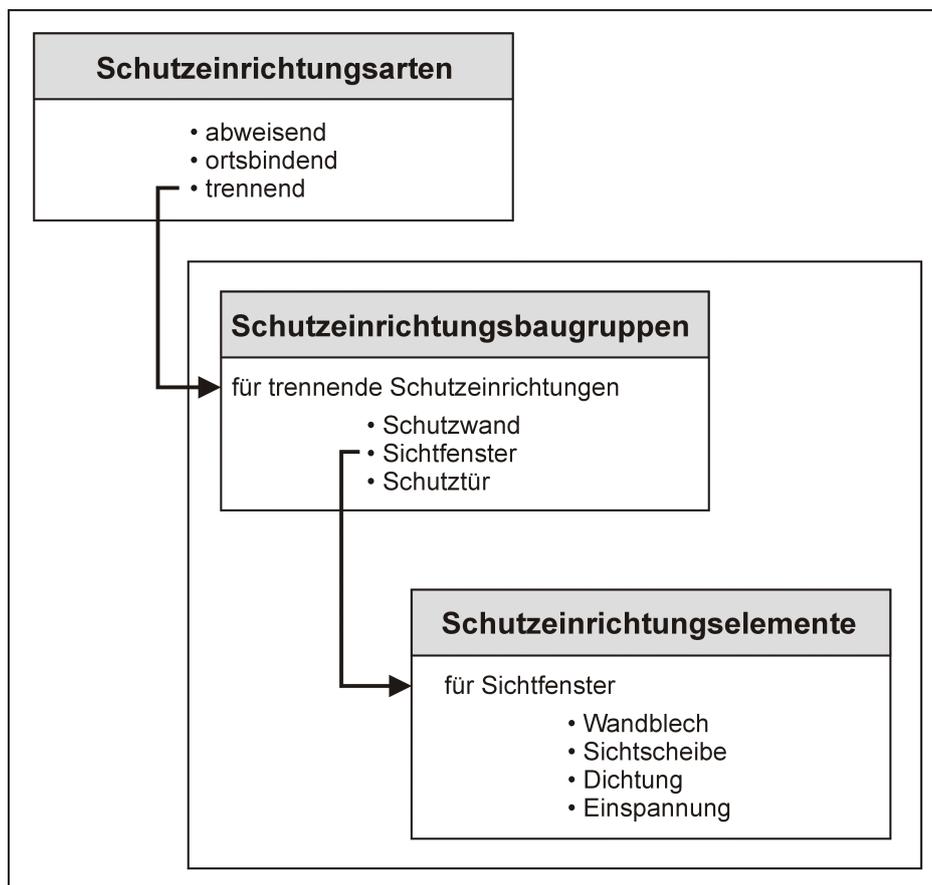
Grundlage der Wissensrepräsentation ist eine Beschreibung und Strukturierung der abzubildenden Wissensobjekte. Unter Wissensobjekten sollen in diesem Zusammenhang einerseits Elemente der Werkzeugmaschine verstanden werden, von denen während des Betriebes eine Gefährdung ausgehen kann, andererseits Baugruppen und Bauteile von Sicherheitsmaßnahmen. Gefahren-Wissensobjekte werden in den Wissensbaustein *Gefahren*, Maßnahmen-Wissensobjekte in den Wissensbaustein *Sicherheitsmaßnahmen* implementiert.

Die Beschreibung der Wissensobjekte erfolgt mit Hilfe von Frames und Instanzen. Frames definieren die allgemeine Datenstruktur der Objekte, Instanzen enthalten als individuelle Ausprägung der Frames die Werte der Objektattribute, **Bild 6-2**.



**Bild 6-2:** Frame- und Instanz-Darstellung für das Beispiel der Schutzeinrichtungsbaugruppe *Sichtfenster*

Wissensobjekte, die in ausgewählten Merkmalen übereinstimmen, werden zu einer Klasse zusammengefaßt, **Bild 6-3**. Auf diese Weise reduziert sich einerseits der Aufwand bei der Wissensimplementierung, da beim Zufügen eines neuen Objektes die Eigenschaften der Klasse vererbt werden können, andererseits kann durch die Verwendung der Klassenmerkmale als Suchfilter das Auffinden von Wissensobjekten erleichtert werden.

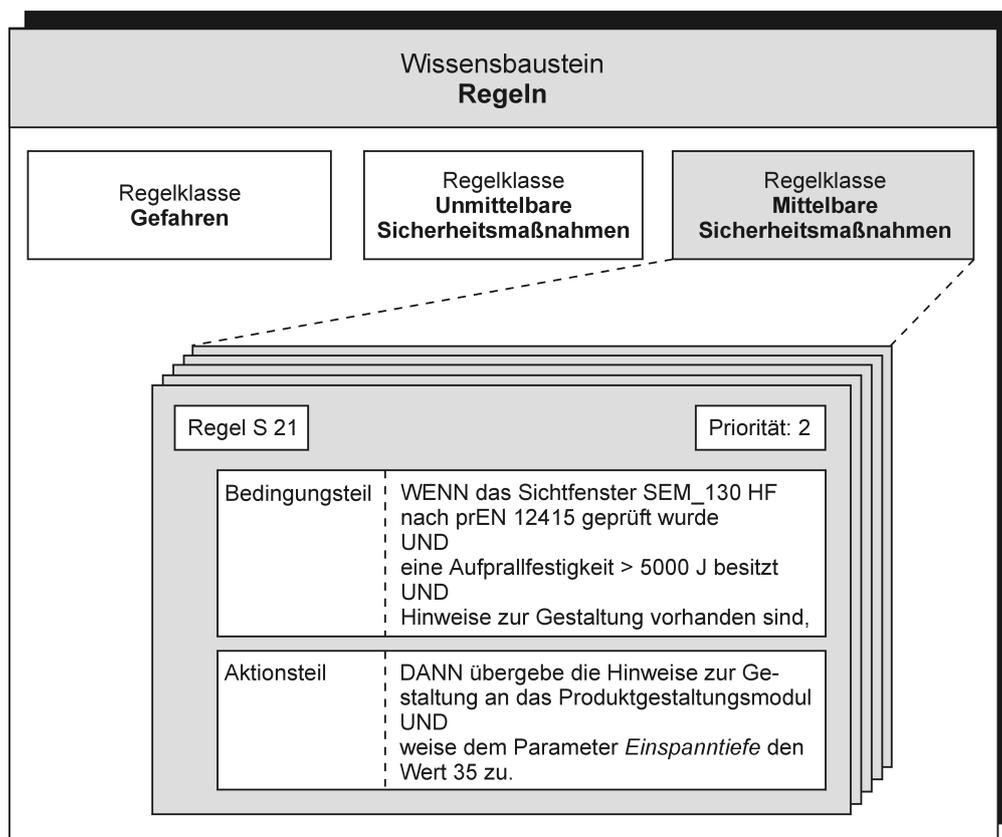


**Bild 6-3:** Klassifikation von Wissensobjekten am Beispiel der mittelbaren Sicherheitsmaßnahme *Schutzeinrichtung*

Im Anschluß an die Beschreibung und Strukturierung der Wissensobjekte erfolgt die Formulierung der Beziehungen zwischen den Wissensobjekten in Form von Regeln. Auch hier werden analog zur Strukturierung der Wissensobjekte Klassen eingeführt, **Bild 6-4**. Die prinzipielle Beschreibungsform ist in den einzelnen Regelklassen identisch. Jede Regel besteht aus einem Bedingungsteil und einem Aktionsteil:

*Wenn Bedingung X und Y, dann Aktion Z.*

Im Bedingungsteil sind alle Voraussetzungen aufgeführt, die erfüllt werden müssen, um die im Aktionsteil definierten Handlungen und Aktionen auszuführen. Der Inhalt des Aktionsteils kann wiederum den Bedingungsteil einer neuen Regel darstellen. Um Konflikte bei der Regelbearbeitung zu vermeiden, werden den Regeln zusätzlich Prioritäten zugewiesen. In den Fällen, bei denen der Bedingungsteil mehrerer Regeln erfüllt ist, kommt die Regel zur Anwendung, die die höchste Priorität besitzt. Auf diese Weise wird gleichzeitig der Aufwand bei der Regelbearbeitung reduziert, d. h. die Überprüfung kann mit denjenigen Regeln begonnen werden, die die höchste Priorität besitzen.



**Bild 6-4:** Definition von Regelklassen

## 6.5 Realisierung

### 6.5.1 Allgemeines

Die Realisierung der Wissensbasis erfolgte in der Programmiersprache C++, einer Erweiterung von C um Konzepte zum objektorientierten Programmieren (OOP). Die

grafische Bedieneroberfläche wurde unter Nutzung des Systems *X Windows* in Verbindung mit der Oberfläche *OSF/Motif* erstellt. Die Speicherung statischer Datenbestände, wie beispielsweise von Werkstoffangaben, erfolgte in der relationalen Datenbank INGRES, Skizzen und Konstruktionszeichnungen wurden im CAD-System Pro/ENGINEER, Version 20.0 [161], erstellt und abgelegt.

### **6.5.2 Wissensbaustein *Gefahren***

Zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Ermittlung möglicher von der Maschine ausgehender Gefährdungen wurden Erkenntnisse aus Schadensfällen an Werkzeugmaschinen in den Wissensbaustein *Gefahren* abgebildet.

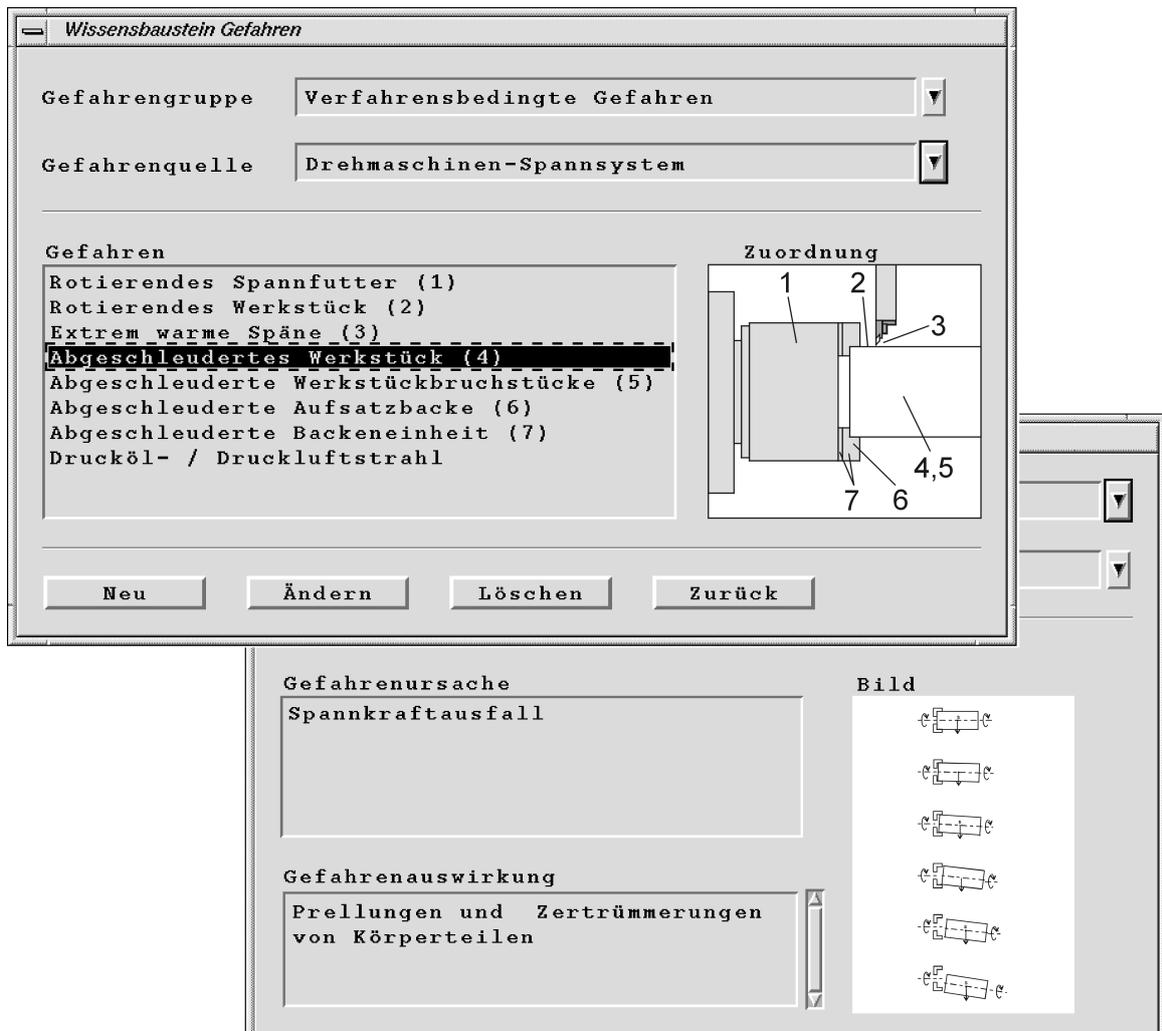
Im Jahr 1997 sind etwa 41.000 meldepflichtige Arbeitsunfälle im Betrieb an Maschinen der Metallbe- und -verarbeitung angezeigt worden [152]. Davon ereigneten sich etwa 18 % an Drehmaschinen, 11 % an Schleifmaschinen und 8 % an Fräsmaschinen. 33 % der Maschinenunfälle wurden durch das Werkzeug bzw. die Arbeitseinrichtung ausgelöst. Werkstück- oder Werkzeugbruchstücke, die in aller Regel durch plötzliches Versagen den Unfall auslösten, sind für 32 % der Maschinenunfälle verantwortlich. Bei jedem zehnten Unfall wurde die Spann- bzw. Haltevorrichtung für Werkzeug oder Werkstück als auslösender Gegenstand genannt. Die untersuchten Maschinenunfälle ereigneten sich überwiegend beim Bedienen bzw. Rüsten der Maschinen (ca. 75 %). Bei Wartungs- oder Instandsetzungsarbeiten traten ca. 18 % der Unfälle auf.

Das Wissen zu Schadensfällen an spanenden Werkzeugmaschinen wurde, angelehnt an eine von LEHMANN [119] vorgeschlagene Gliederung von Gefahren an spanenden Werkzeugmaschinen, in den drei Gefahrengruppen *maschinenbedingte*, *tätigkeitsbedingte* und *verfahrensbedingte Gefahren* in die Wissensbasis implementiert. Gefahren, die auf die spezielle konstruktive Lösung einer Werkzeugmaschine zurückzuführen sind, definierte LEHMANN [119] als maschinenbedingte Gefahren. Gefahren, die physisch oder psychisch auf das Bedienpersonal wirken, wurden als tätigkeitsbedingte Gefahren bezeichnet. Als verfahrensbedingte Gefahren charakterisierte LEHMANN [119] Gefahren, die aus dem Fertigungsverfahren resultieren. Beispiele für verfahrensbedingte Gefahren an Werkzeugmaschinen werden in **Tabelle 6-1** zusammengefaßt.

Gefahr	Gefahrenquelle	Energie-merkmal	Wirkungen auf das Bedienpersonal
technologisch bedingte Bewegungen	rotatorisch und translatorisch bewegte Funktionselemente von Werkzeug- und Werkstückbewegungen	kinetisch	Quetsch- und Schnittwunden, Prellungen und Gliederverluste
technologisch bedingte Temperaturen	Werkzeug Werkstück Späne Motor Getriebe Lagerungen	thermisch	Verbrennungen Sekundärurfälle
vernebelte, verspritzte Hilfsstoffe	Hilfsstoffzubehör Wirkstelle	chemisch	Atemorganschäden Hauterkrankungen Sichtbehinderungen Sekundärurfälle
freigesetzte Funktionselemente infolge <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewaltbruch</li> <li>• Dauerbruch</li> <li>• Verformung</li> <li>• Ausfall des Verbindungselements</li> </ul>	Werkzeug Werkzeugspannmittel Werkstück Werkstückspannmittel	kinetisch	Schnittwunden, Prellungen und Zertrümmerungen von Körperteilen, Sekundärurfälle

**Tabelle 6-1:** Verfahrensbedingte Gefahren an Werkzeugmaschinen [119]

Das Abbilden der Schadensfallerkennnisse an Werkzeugmaschinen in den Wissensbaustein *Gefahren* erfolgte in Abhängigkeit von der Gefahrengruppe und der Gefahrenquelle über die in **Bild 6-5 links** dargestellte Benutzeroberfläche. Ursachen, die den einzelnen Gefahren zugrundeliegen können, sowie Auswirkungen auf das Bedienpersonal werden über eine zweite Eingabemaske implementiert, **Bild 6-5 rechts**. Ergänzt wird die textuelle Beschreibung der Gefahrenursachen und -auswirkungen durch eine grafische Darstellung des zu erwartenden Schadensbewegungsverlaufs.



**Bild 6-5:** Abbilden von Schadensfallwissen in den Wissensbaustein *Gefahren*

### 6.5.3 Wissensbaustein *Sicherheitsmaßnahmen*

Aufgabe des Wissensbausteins *Sicherheitsmaßnahmen* ist es, dem Konstrukteur im Rahmen des sicherheitsgerechten Produktentwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen Dimensionierungs- und Gestaltungswissen zu Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik bereitzustellen. Der Wissensbaustein *Sicherheitsmaßnahmen* wird in zwei Wissensmodule *Unmittelbare Sicherheitsmaßnahmen* und *Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen* unterteilt.

## Unmittelbare Sicherheitsmaßnahmen

Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik sollen dazu beitragen, die Baugruppen bzw. Bauteile der Werkzeugmaschine derart zu gestalten, daß eine Funktionsstörung oder ein Versagen während der Einsatzzeit vollständig vermieden (Prinzip des sicheren Bestehens) bzw. die durch eine Funktionsstörung oder durch ein Versagen hervorgerufene Gefahr ohne schwerwiegende Folgen für das Bedienpersonal ist (Prinzip des beschränkten Versagens) [168]. **Tabelle 6-2** faßt Beispiele für Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen zusammen.

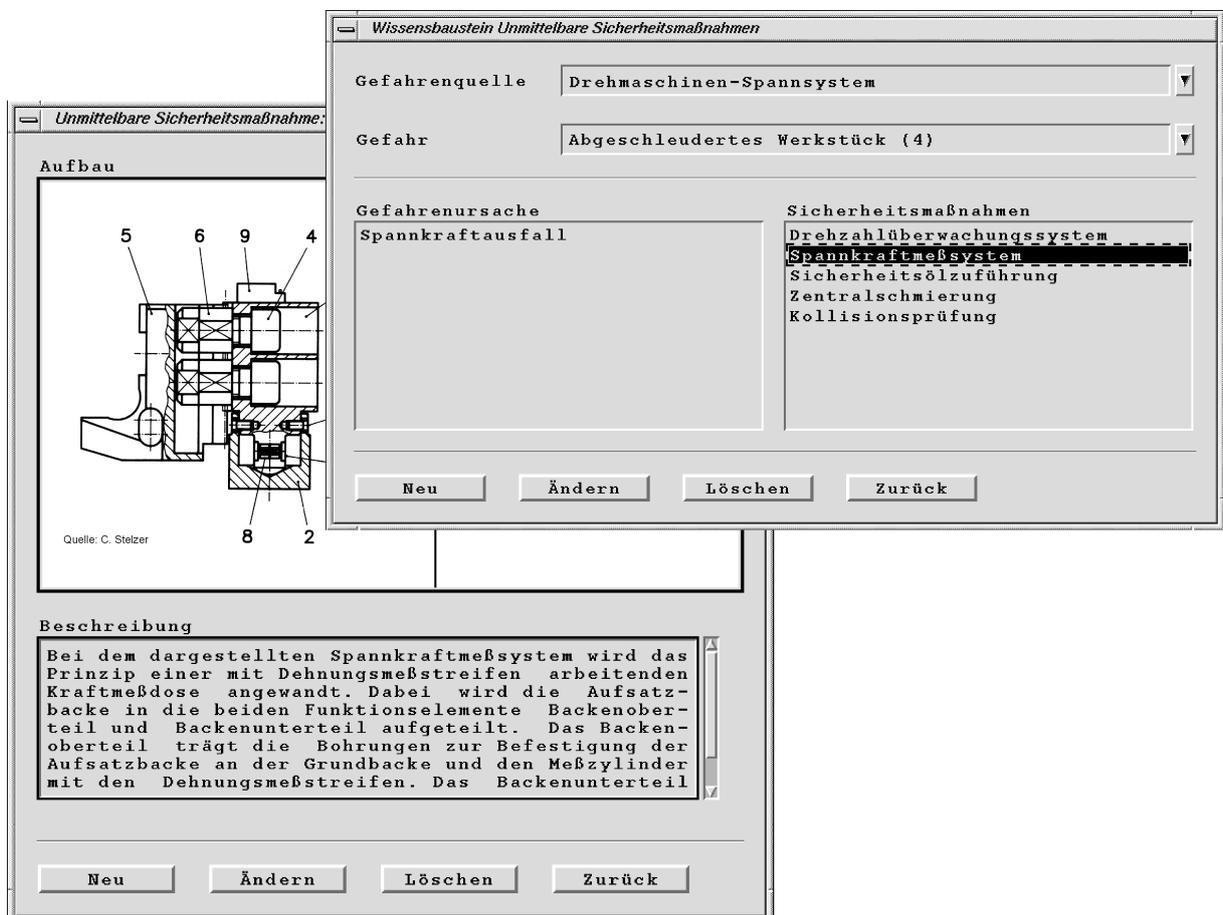
Gefahrenquelle	Gefahr	Anforderung	Maßnahmenbeispiel der unmittelbaren Sicherheitstechnik
Rotatorisch und translatorisch bewegte Funktionselemente des Werkzeug- und Werkstücksystems	Technologisch bedingte Bewegungen	Unzugänglichkeit	Wahl geeigneter Sicherheitsabstände und Bewegungsspielräume
Werkzeug Werkzeugspannmittel Werkstück Werkstückspannmittel	Freigesetzte Funktionselemente	Vermeidung der Freisetzung	Zwangsformschluß, Sollsicherheiten Verbindungselement, Überwachungssysteme, Prozeßsimulation
Stromführende Baugruppen	Fehlgeleitete elektrische Energie	Abschirmung	Isolierung, Überspannungssicherung
Sämtliche Baugruppen und Bauteile	Werkstoffversagen	Hohe mechanische Festigkeit	Betriebsfestigkeitsnachweis, Berechnung der Sicherheit gegen Dauerbruch

**Tabelle 6-2:** Beispiele für Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen

Um den Konstrukteur bei der Dimensionierung, Gestaltung und Integration von unmittelbaren Sicherheitsmaßnahmen zu unterstützen, werden in den Wissensbaustein

*Unmittelbare Sicherheitsmaßnahmen* in Abhängigkeit von der Gefahrenquelle und der möglichen Gefahr Maßnahmenbeispiele der unmittelbaren Sicherheitstechnik abgebildet. Insbesondere werden Maßnahmen für die Baugruppen bzw. Bauteile implementiert, die im Schadensfall eine Gefährdung des Bedieners infolge kinetischer Energiefreisetzung hervorrufen können. Diese Schadensfälle stellen an Werkzeugmaschinen die Hauptgefährdung für das Betriebspersonal dar [211].

**Bild 6-6 rechts** zeigt die Benutzeroberfläche zur Abbildung von unmittelbaren Sicherheitsmaßnahmen in die Wissensbasis. Beispielhaft dargestellt sind Maßnahmen, die zur Vermeidung der Gefahr *Abgeschleudertes Werkstück infolge Spannkraftausfall* an Drehmaschinen beitragen. Ergänzt wird die Eingabe der unmittelbaren Sicherheitsmaßnahmen durch eine Skizze sowie textuelle Beschreibung des jeweiligen Lösungsprinzips, **Bild 6-6 links**.



**Bild 6-6:** Benutzeroberflächen zur Eingabe, Darstellung und Beschreibung unmittelbarer Sicherheitsmaßnahmen

## **Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen**

Als Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik werden an Werkzeugmaschinen vorwiegend trennende Schutzeinrichtungen eingesetzt. Hauptanforderung an Komponenten und Materialien trennender Schutzeinrichtungen ist eine hohe Aufprallfestigkeit im Schadensfall.

Zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Modellierung aufprallfester trennender Schutzeinrichtungen enthält der Wissensbaustein *Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen* neben Rechtsgrundlagen und Werkstoffempfehlungen auch Hinweise zur Gestaltung und Dimensionierung der Komponenten trennender Schutzeinrichtungen unter Zugrundelegung der im Schadensfall zu erwartenden Belastungen. Die implementierten Hinweise basieren auf einem von SPUR und ISING [211] erarbeiteten Stand der Technik zu trennenden Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen.

## **Rechtsgrundlagen**

Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen, die bei der Dimensionierung und Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen zu berücksichtigen sind, werden in den harmonisierten Europäischen Normen definiert. Wesentliche Inhalte sollen auszugsweise in den Wissensbaustein *Sicherheitsmaßnahmen* abgebildet werden, wobei die Gliederung der harmonisierten Sicherheitsnormen in Typ A-Normen, Typ B-Normen und Typ C-Normen zugrundegelegt wird [158].

Die Basis der europäischen Normengebung bilden die Typ A-Normen als allgemeingültige Sicherheitsgrundnormen. Darauf bauen die Typ B-Normen auf, die Sicherheitsanforderungen für Bauteile, Baugruppen sowie Sicherheits- und Schutzsysteme enthalten. Die Typ C-Normen konkretisieren die Sicherheitsanforderungen für bestimmte Produktgruppen oder Produkte.

Wichtige Typ A-, B- und C-Normen zur Dimensionierung und Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen werden in **Tabelle 6-3** zusammengefaßt. Das Implementieren wesentlicher Inhalte der in Tabelle 6-3 aufgeführten Grund-, Gruppen- und Produktnormen ist über die in **Bild 6-7** dargestellte Benutzeroberfläche möglich. Neben der Referenznummer der Norm, dem Kurztitel und dem Normentyp werden der Anwendungsbereich, wichtige Definitionen sowie schlagwortartig grundlegende Inhalte der Norm abgebildet.

	<b>Norm</b>	<b>Titel</b>
<b>Typ A</b>	EN 292, Teil 1	Sicherheit von Maschinen. Grundsätzliche Terminologie und Methodik.
	EN 292, Teil 2	Sicherheit von Maschinen. Technische Leitsätze und Spezifikationen.
<b>Typ B</b>	EN 294	Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrstellen mit den oberen Gliedmaßen
	EN 349	Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen
	EN 418	NOT-AUS Einrichtung
	EN 614-1	Ergonomische Gestaltungsgrundsätze
	prEN 811	Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den unteren Gliedmaßen
	prEN 842	Optische Gefahrensignale
	prEN 953	Gestaltung und Konstruktion von trennenden Schutzeinrichtungen
	prEN 954-1	Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen; Gestaltungsleitsätze
	prEN 999	Annäherungsgeschwindigkeit von Körperteilen für die Anordnung von Schutzeinrichtungen
	EN 1088	Verriegelungseinrichtungen mit und ohne Zuhaltung
prEN 1127-1	Explosionsschutz	
<b>Typ C</b>	EN 12415	Werkzeugmaschinen – Sicherheit – kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren
	prEN 12417	Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Bearbeitungszentren

**Tabelle 6-3:** Typ A-, B- und C-Normen zur Dimensionierung und Gestaltung trennender Schutzeinrichtungen

Wissensbaustein Rechtsgrundlagen

Ref. Nr. EN 953

Kurztitel Gestaltung und Konstruktion von trennenden Schutzeinrichtungen

Typ Sicherheitsgruppennorm

Anwendungsbereich und Zweck

Diese Europäische Norm legt die Anforderungen an die Gestaltung und Konstruktion von trennenden Schutzeinrichtungen fest, die in erster Linie dem Schutz von Personen gegen mechanische Gefährdungen dienen.

Definition

- Feststehende trennende Schutzeinrichtungen
- Bewegliche trennende Schutzeinrichtungen
- Mechanische Gefährdungen

Inhalte

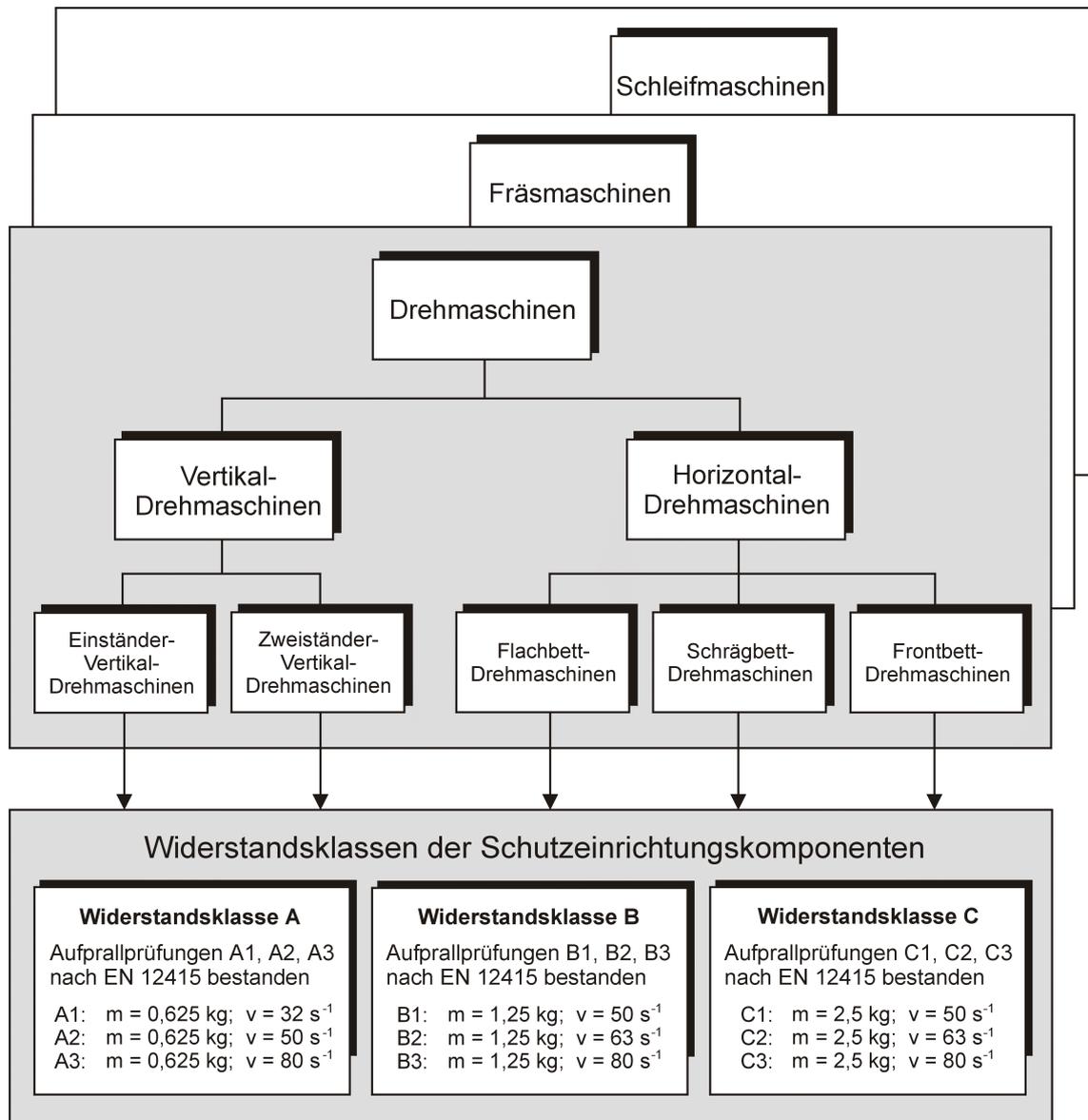
- \* Bewertung der Risiken, die sich aus den Gefährdungen der jeweiligen Werkzeugmaschine ergeben.
- \* Hinweise zur Auswahl von trennenden Schutzeinrichtungen
  - Auswahl nach erforderlicher Zugriffsart
  - Auswahl nach dem Ort der Gefährdung

Neu Ändern Löschen Zurück

**Bild 6-7:** Benutzeroberfläche zum Abbilden von normativ definiertem Sicherheitswissen

### **Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise**

Zur Unterstützung der aufprallfesten Modellierung der Komponenten trennender Schutzeinrichtungen sind Hinweise zu ihrer Gestaltung und Dimensionierung in die Wissensbasis implementiert worden. Die Gliederung erfolgte maschinentypbezogen in Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise für Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinenschutzvorrichtungen, **Bild 6-8**.



**Bild 6-8:** Maschinentypbezogene Gliederung der Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise für trennende Schutzeinrichtungen

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der einzelnen konstruktiven Lösungen ist deren Aufprallfestigkeit im Schadensfall. Daher wurden die Schutzeinrichtungskomponenten Widerstandsklassen zugeordnet. So charakterisiert beispielsweise die Widerstandsklasse A für Drehmaschinen, daß die dieser Klasse zugeordneten Baugruppen und Bauteile Aufpralluntersuchungen entsprechend den Prüfklassen A1, A2 und A3 nach EN 12415 [256] widerstehen konnten.

**Bild 6-9** stellt exemplarisch das Datenblatt zur Erfassung der Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise für die Schutzeinrichtungsbaugruppe *Schutztür* einer Horizontal-Drehmaschine mit Schrägbett dar, die für im Schadensfall auftretende Stoßbelastungen entsprechend Widerstandsklasse B geeignet ist.

The drawing shows a vertical safety door assembly. It includes a top guide (Türführung oben) with rollers (1, 2) and a bottom guide (Türführung unten) with rollers (9, 10). A window assembly (Sichtfenster) is shown with a frame (4) containing a polycarbonate sheet (5) and safety glass (6). The door plate (Schutztürblech) (8) is attached to the window frame. The window construction (Sichtfenster-Aufbau) shows the polycarbonate sheet (5) and safety glass (6) held together by a clamping connection (7).

**Wissensobjekt:**  
Schutztür einer Horizontal-Drehmaschine mit Schrägbett

**Widerstandsklasse:** B

**Beschreibung:**  
Die Schutztür wird außenseitig am Drehmaschinenbett geführt, oben über zwei Laufrollen (1,2), unten über eine Laufrolle (10). Umgriffe (3) und Verkrallungen (9) verhindern ein Herausschleudern der gesamten Tür. Das Sichtfenster besteht aus einer Polycarbonatscheibe (5), die innen-seitig vor Kühlschmiermitteln durch eine Sicherheitsglasscheibe (6), außenseitig vor Kühlmitteldämpfen durch eine Oberflächenbeschichtung (7) geschützt wird. Über eine Klemmverbindung (4) wird der Scheibenverbund im Fensterrahmen befestigt.

**Material- u. Dimensionierungshinweise:**

Schutzwandblech	
Material .....	St12.03
Dicke .....	4 mm
Polycarbonatsichtscheibe	
Material .....	MAKROLON®
Dicke .....	12 mm
Sicherheitsglas	
Material .....	SECURIT®
Dicke .....	10 mm
Dichtung .....	Silikon

Quelle: PCC-Pittler GmbH

**Bild 6-9:** Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise für die Schutzeinrichtungsbaugruppe *Schutztür* einer Horizontal-Drehmaschine mit Schrägbett

Die Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise wurden komponentenspezifisch in die Wissensbasis abgebildet. **Bild 6-10** zeigt die Eingabemaske zur Abbildung der Hinweise zur Komponente *Sicherheitsfenster* der Baugruppe *Schutztür* nach Bild 6-9.

Wissensbaustein Gestaltungs- u. Dimensionierungshinweise

Gestaltungsobjekt

Bezeichnung

Abmaße

---

Aufbau

nach: SEGE GmbH

Beschreibung

Bei dem dargestellten Sicherheitsfenster handelt es sich um ein Polycarbonat-Glas-Verbundfenster. Der Scheibenverbund, bestehend aus einer Polycarbonatscheibe der Dicke 12 mm, einer Sicherheitsglasscheibe der Dicke 10 mm und einer zusätzlichen transparenten Kunststoffscheibe, wird über eine umlaufende Leiste in den Fensterrahmen geklemmt.

**Bild 6-10:** Abbilden von Gestaltungs- und Dimensionierungshinweisen für das Beispiel *Sicherheitsfenster*

Neben der grafischen Darstellung der Schutzeinrichtungskomponente werden für die jeweilige Lösung zusätzlich Aufbau, Abmaße und geeignete Materialien erläutert. Ergänzt werden die Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise durch Prüfergebnisse experimenteller Aufpralluntersuchungen, **Bild 6-11**.

Auslegungsobjekt	Sicherheitsfenster				
Bezeichnung	V300				
Abmaße	460 mm x 460 mm				Werkstoffe
Pruefergebnisse nach	pr EN 12415				
Prüfparameter			Prüfergebnisse		
Projektilmasse	Aufprallgeschw.	Aufprallenergie	Beultiefe	Durchriß	Durchschuß
1,25 kg	50 m/s	1562 J	3,0 mm	nein	nein
1,25 kg	63 m/s	2480 J	2,8 mm	nein	nein
2,5 kg	50 m/s	3124 J	3,6 mm	nein	nein
2,5 kg	63 m/s	4960 J	4,2 mm	nein	nein

Widerstandsklassen

Das Diagramm zeigt die Widerstandsklassen A1 bis C3 über der Aufprallenergie (0 bis 10,0 kJ) und der Projektilmasse (625g bis 2500g). Die Klassen sind durch horizontale Balken dargestellt, die die Energiegrenzen für jede Klasse zeigen.

Klasse	Min. Aufprallenergie (kJ)	Max. Aufprallenergie (kJ)
A1	0	2,0
A2	0	1,0
B1	0	1,5
A3	0	2,0
B2	0	2,5
C1	0	4,0
B3	0	3,0
C2	0	5,0
C3	0	10,0

Neu    Ändern    Löschen    Zurück

**Bild 6-11:** Implementieren von Prüfergebnissen

Bei der Abbildung wird zwischen Prüfergebnissen nach EN 12415 [256] und prEN 12417 [257] unterschieden. Beschußprüfungen nach EN 12415 beurteilen Schutzeinrichtungsbaugruppen für den Einsatz an numerisch gesteuerten Drehmaschinen und Drehzentren, Beschußprüfungen nach prEN 12417 beurteilen die Eignung der Schutzeinrichtungsbaugruppen für den Einsatz an Bearbeitungszentren. Neben Ergebnissen von Aufpralluntersuchungen wurden auch Angaben über die im Rahmen der Prüfungen bestandenen Widerstandsklassen implementiert.

Ergänzt werden die Prüfergebnisse durch Angaben zu den Kennwerten der getesteten Materialien, **Bild 6-12**. Neben Kennwerten, die das linear-elastische und viskoplastische Verhalten beschreiben, wurden auch Werkstoffgrößen implementiert, die Aussagen über das chemische und thermische Verhalten unter betrieblichen Einsatzbedingungen erlauben.

Wissensbaustein Werkstoffe

Werkstoffart nichtmetallisch, anorganisch ▼

Werkstoffgruppe Kunststoffe ▼

Werkstoff Polycarbonat (PC) - MAKROLON ▼

Eigenschaft	Richtwert	Einheit
Dichte $\rho$	1,2	g/cm <sup>3</sup>
Durchschlagfestigkeit $E_D$	35	kV/mm
E-Modul (Kurzzeitwert)	2400	MPa
Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$ für 0 ... 50°C	$65 \cdot 10^{-6}$	1/K
Maximale Dauergebrauchstemperatur	115	°C
Oberflächenwiderstand $R_{OA}$	$> 10^{14}$	$\Omega$

Hersteller ROEHM GmbH, Darmstadt

Neu    Ändern    Löschen    Zurück

**Bild 6-12:** Benutzeroberfläche zum Abbilden von Werkstoffkennwerten

In einer ersten Gliederungsebene wird in metallische, nichtmetallisch-anorganische und nichtmetallisch-organische Werkstoffe unterteilt. Daraufhin erfolgt eine Aufschlüsselung der Werkstoffarten in Werkstoffgruppen, wie beispielsweise die Einteilung der nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffarten in Kunststoffe, Keramiken, etc. Die dritte Gliederungsebene beschreibt die Ausführungen der einzelnen Werkstoffgruppen. Ausführungen der Werkstoffgruppe *Kunststoffe*, die im Maschinenschutz eingesetzt werden, sind neben Polymethylmethacrylaten (PMMA) vor allem Polycarbonate (PC). Ergänzt werden die Angaben zu den Materialkenngrößen durch Informationen über die Materialhersteller.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Wissensbasis *Maschinensicherheit* für den Anwendungsfall einer sicherheitsgerechten Werkzeugmaschinenentwicklung die Möglichkeit bietet, einerseits sicherheitstechnisches Wissen strukturiert abzubilden, andererseits dieses Wissen im Rahmen der Baugruppen-/Bauteilauslegung problemlösungsorientiert auszulesen.

## 7 Realisierung eines Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten

### 7.1 Allgemeines

Ausgehend von der Beschreibung des Prototypaufbaus wird die Funktionalität der Bausteine des Systems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Produkten und Prozessen am Beispiel einer sicherheitsgerechten Drehmaschinenentwicklung erläutert.

### 7.2 Prototypaufbau

Basiskomponenten des entwickelten Systems sind das *Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Prozessen*, das *Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Produkten* und das *Modul zur sicherheitsintegrierten Optimierung von Prozessen und Produkten*, **Bild 7-1**.

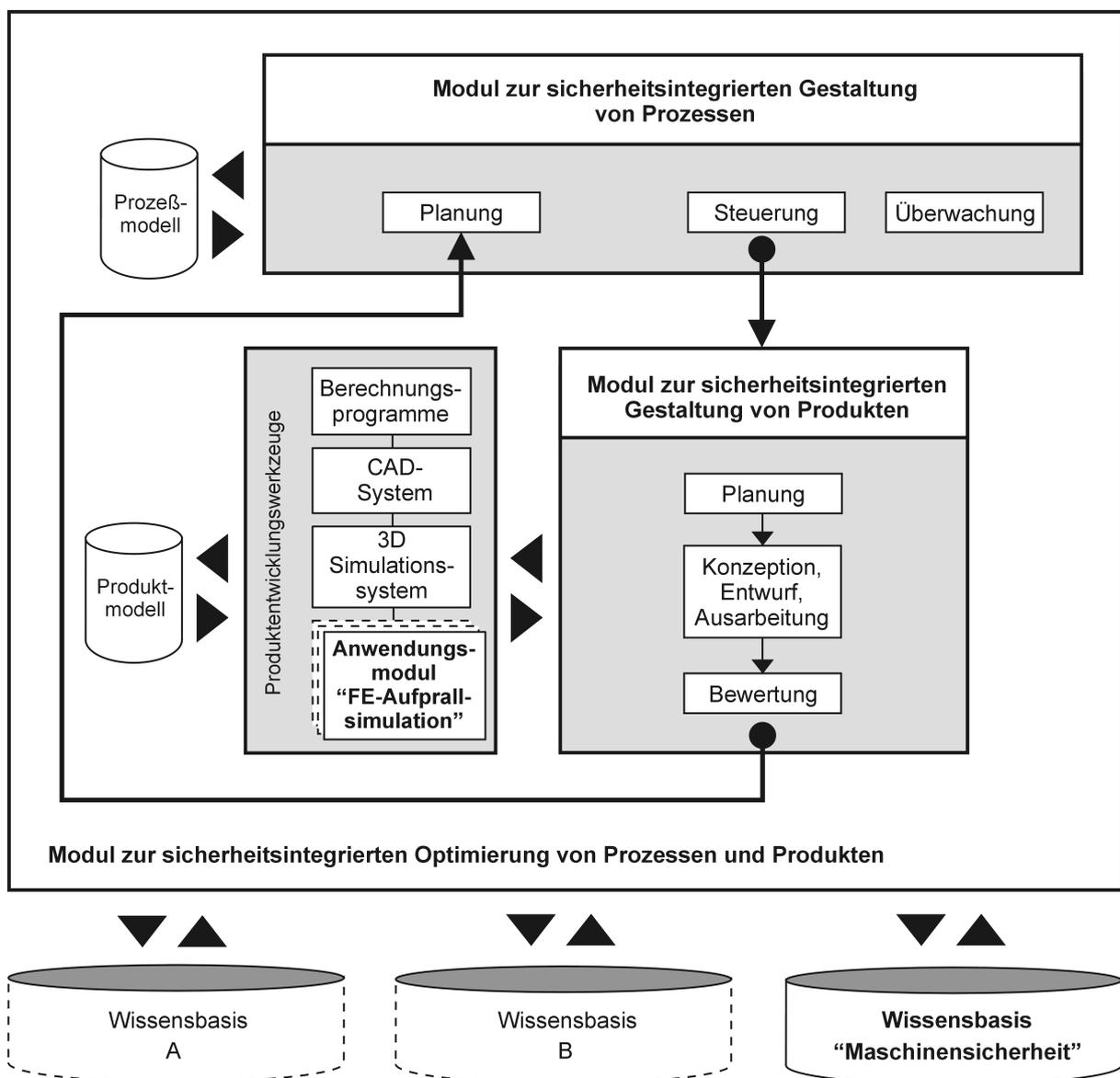
Aufgabe des Prozeßgestaltungsmoduls ist die Planung, Steuerung und Überwachung des Produktentwicklungsprozesses unter besonderer Berücksichtigung sicherheitstechnischer Anforderungen. Unter Zugrundelegung der Prozeßplanung unterstützt das Produktgestaltungsmodul die sicherheitsgerechte Gestaltung sowie sicherheitstechnische Bewertung des Produktes.

Die Produktgestaltung wird über die Steuerungsfunktion des Prozeßgestaltungsmoduls aktiviert. Dabei werden Rechnerwerkzeuge wie Berechnungsprogramme, ein CAD-System, ein 3D-Bewegungssimulationssystem sowie anwendungsfallsspezifische Softwarebausteine eingesetzt. Im Anschluß an die Ausführung der Produktentwicklungsaufgaben findet eine sicherheitstechnische Produktbewertung statt. Ziel ist es, die Einhaltung der im Rahmen der Produktplanung definierten Sicherheitsanforderungen zu überprüfen.

Gestaltungsbezogene sicherheitstechnische Defizite, die im Rahmen der Produktbewertung festgestellt wurden, werden durch das Modul zur sicherheitsintegrierten Optimierung von Prozessen und Produkten beseitigt. Dazu wird der Prozeßablaufplan um Aufgaben zur Beseitigung der Sicherheitsdefizite ergänzt und anschließend neu generiert.

Das Speichern von Informationen zum aktuellen sowie zu bereits durchgeführten Entwicklungsprozessen erfolgt im Prozeßmodell, das Abbilden der während der Produktgestaltung erzeugten Daten in das Produktmodell.

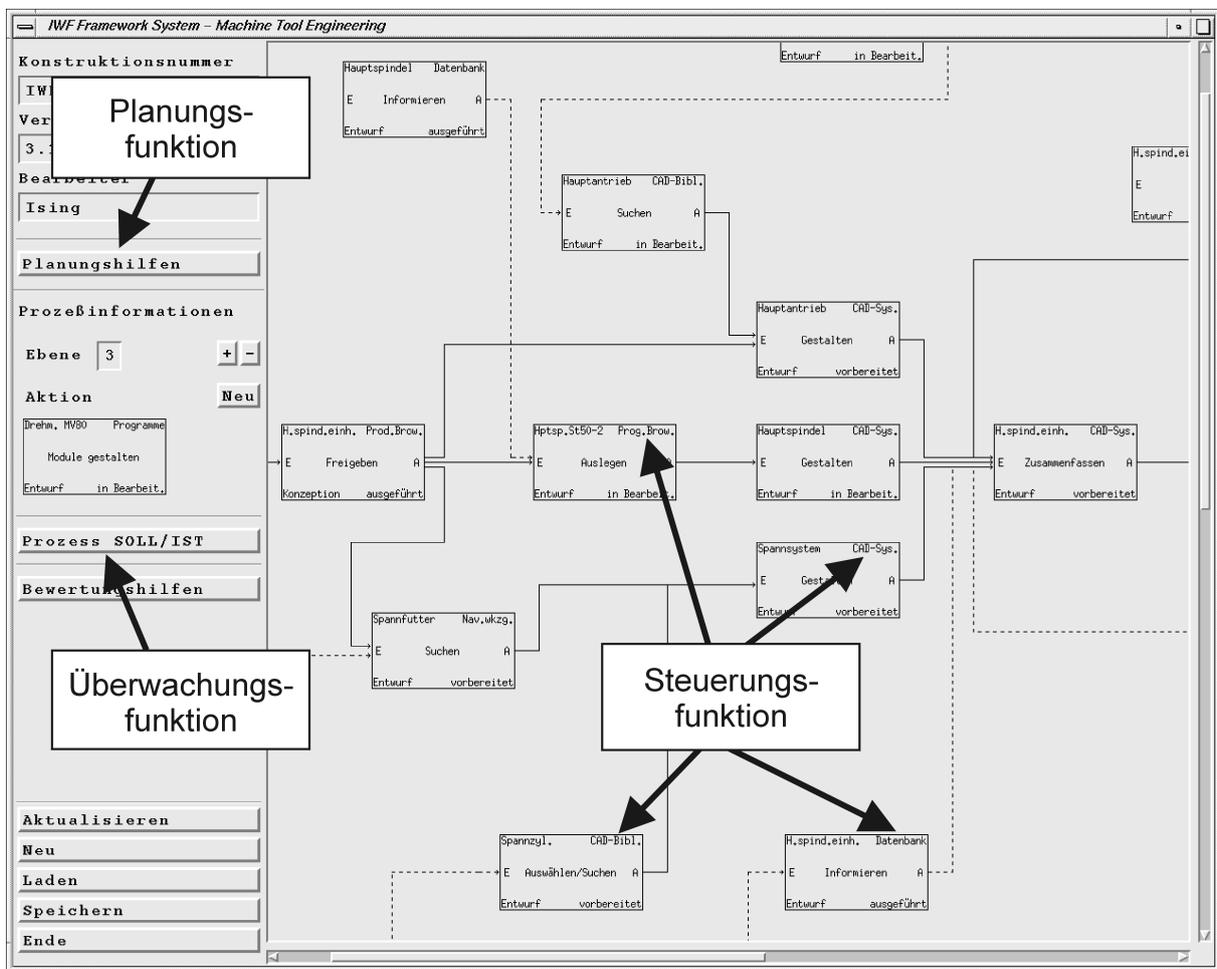
Grundlage des Gesamtsystems sind produktspezifische Wissensbasen. Prototypisch wurde eine Wissensbasis *Maschinensicherheit* entwickelt und an das Gesamtsystem angebunden. Diese enthält Hinweise zur sicherheitsgerechten Dimensionierung und Gestaltung von Maschinenbaugruppen und -bauteilen.



**Bild 7-1:** Aufbau des Prototypsystems zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten

### 7.3 Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Prozessen

Die Bereitstellung von Funktionen zur Prozeßplanung, -steuerung und -überwachung erfolgt durch einen zweigeteilten grafischen Editor, **Bild 7-2**. Über eine Menüleiste werden Funktionen zur Planung und Überwachung der Prozesse aufgerufen, eine Zeichenfläche unterstützt die Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses. Die Prozeßsteuerung erfolgt über sensitive Bereiche innerhalb der Symbole der Produktentwicklungsaufgaben.



**Bild 7-2:** Zweigeteilter grafischer Editor des Prozeßgestaltungsmoduls mit Funktionen zur Planung, Steuerung und Überwachung

### 7.3.1 Prozeßplanung

Grundlage der Prozeßplanung ist die Ermittlung der bei der Gestaltung des Produktes zu erfüllenden sicherheitstechnischen Anforderungen. Die Sicherheitsanforderungen werden in Abhängigkeit von der Entwicklungsaufgabe und der Baugruppe aus der Wissensbasis des Rechnersystems ausgelesen, **Bild 7-3**.

Anforderungsbereich

Entwicklungsaufgabe

Baugruppe

Ein Ausfall der Spannkraft ist zu verhindern. Es besteht die Gefährdung des Bedieners durch freigesetzte Elemente des Spannsystems mit hoher kinetischer Energie.

Maßnahmebeispiele gegen zum Spannkraftausfall führende Vorgänge:

Vorgang	Forderung	Maßnahmebeispiel
Energieausfall	Beibehaltung der Spannkraft	Sicherheitsölauführung
Kollision	zwangsläufige Kollisionsprüfung	Prozeßsimulation
Spannkraftbestimmung	Antriebsentkopplung	Rutschkupplung
	Berechenbarkeit der Backenfliehkraft	Angabe des Backenschwerpunkts im Katalog
	Kenntnis der wirksamen Spannkraft	aktive Spannkraftüberwachung
	Wartungszwang	Integration der Spannkraftmessung in die Maschinensteuerung
Überdrehzahl	Wartungsfreiheit	Zentralschmierung
	Vermeidung der Freisetzung von Backeneinheit und Fliehkraft	Formschlüssige Verriegelung, verschlossene Führungsnuten
	Fliehkraftminderung	Gestaltoptimierung, Werkstoffoptimierung
Backenwechsel	Sicherstellung des Formschlusses zwischen Grund- und Aufsatzbacke	mechanischer Zwangsformschluß
	zwangsläufige Funktionsbewegungen	mechanische Betätigung
	zuverlässige Hubendlagenüberwachung	Standardisierung der Hubwege, Begrenzung der Endschaltpositionen

Quelle: W. Lehmann

**Bild 7-3:** Auslesen von sicherheitstechnischen Anforderungen aus der Wissensbasis des Rechnersystems, beispielhaft dargestellt für die Baugruppe *Drehmaschinen-Spannsystem*

Unter Zugrundelegung der zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen erfolgt daraufhin die Planung des Produktentwicklungsprozesses. Dabei kann der Produktentwickler auf im Prozeßmodell gespeichertes Erfahrungswissen über sicherheitstechnisch op-

timierte Produktentwicklungsprozesse zurückgreifen. Mittels einer Ähnlichkeitssuche werden sicherheitstechnisch optimierte Teilaufgaben mit großer Ähnlichkeit zur aktuellen Problemstellung ermittelt und in den laufenden Prozeß integriert.

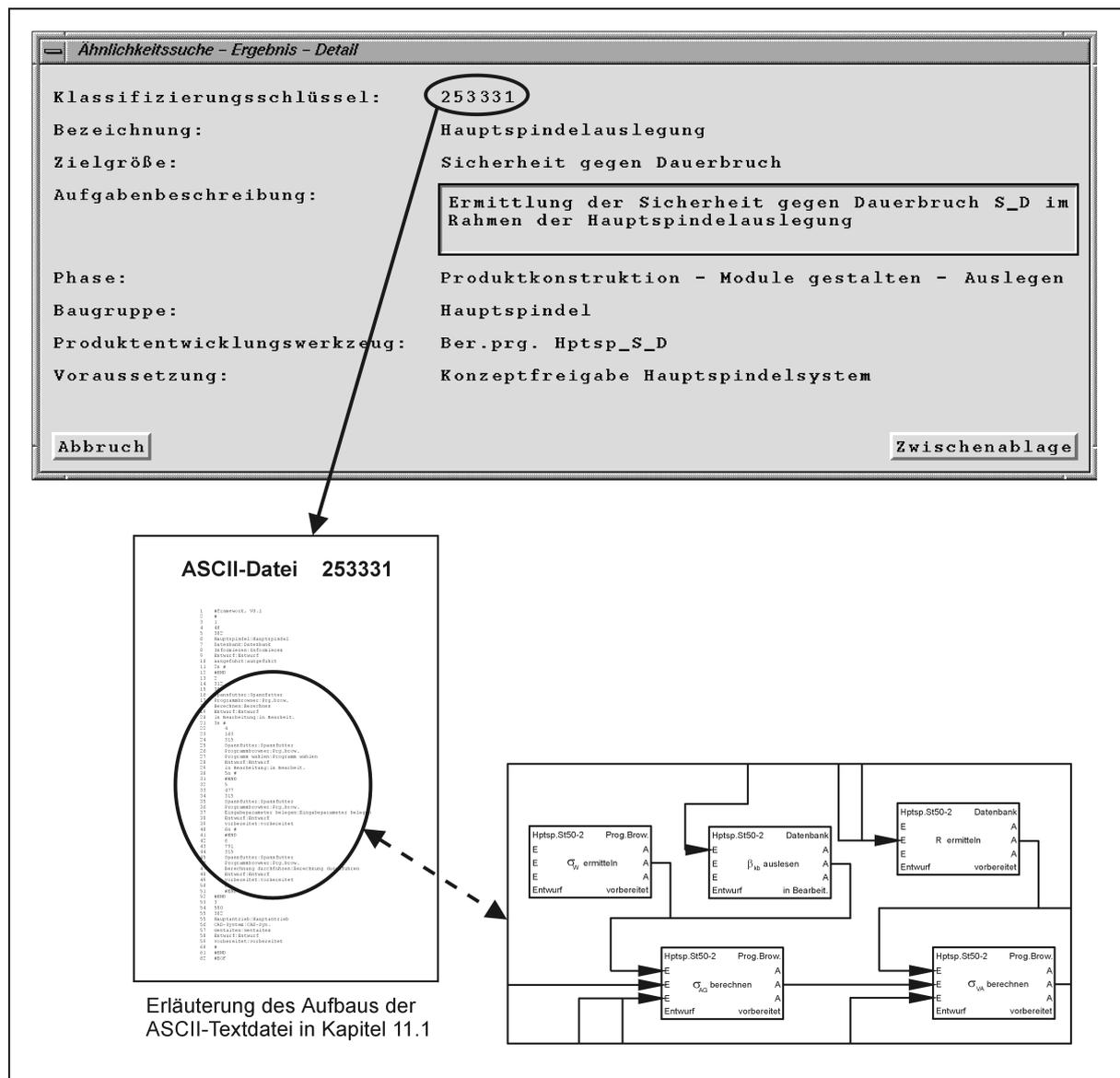
Dazu wird in einer ersten Dialogmaske eine Klasse von ähnlichen Produktentwicklungsaufgaben ausgewählt. Dies erfolgt entweder durch die Eingabe eines Klassifizierungsschlüssels oder durch das Markieren der die aktuelle Aufgabenstellung beschreibenden Merkmale (z.B. *Produktkonstruktion* und *Module gestalten* und *Auslegen*). Durch das Belegen des Sachmerkmals *Baugruppe* in einer zweiten Dialogmaske wird die Suche nach den die sicherheitsgerechte Gestaltung der Baugruppe unterstützenden Teilaufgaben eingeleitet.

Im Rahmen der Suche werden die im Prozeßmodell gespeicherten, sicherheitstechnisch optimierten Produktentwicklungsprozesse und deren Teilaufgaben hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit mit der aktuellen Problemstellung analysiert. Die Anzeige gefundener ähnlicher Produktentwicklungsaufgaben erfolgt in einem Ergebnisfenster, **Bild 7-4 oben**.

Eindeutig identifiziert wird jede Produktentwicklungsaufgabe durch den *Klassifizierungsschlüssel*, dessen Stellenanzahl von der Anzahl der Hierarchieebenen abhängig ist. Das Sachmerkmal *Bezeichnung* ordnet die Produktentwicklungsaufgabe einer Aufgabenklasse zu, das Merkmal *Zielgröße* zeigt die Größe an, die im Rahmen der Aufgabendurchführung ermittelt wird. Eine ausführliche Erläuterung der Aufgabe ist Inhalt des Sachmerkmals *Aufgabenbeschreibung*. In den darauffolgenden Zeilen erfolgt die Zuordnung der Produktentwicklungsaufgabe zu einer Produktentwicklungs-*Phase*, die Definition der die Aufgabendurchführung betreffenden *Baugruppe* und die Anzeige des zur Ermittlung der Zielgröße geeigneten *Produktentwicklungswerkzeuges*. Die Aufgabe, nach deren Bearbeitung die Attribute zur Ausführung der Produktentwicklungsaufgabe vorliegen, wird durch das Merkmal *Voraussetzung* definiert. Ergänzt wird die Beschreibung der Produktentwicklungsaufgabe durch eine unter der gleichen Kennung in einer ASCII-Datei gespeicherten Aktionsvorgangsfolge, die dem Produktentwickler eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Zielgröße vorgibt.

Basierend auf den dargestellten Detailinformationen trifft der Konstrukteur die Entscheidung, ob die ermittelte Produktentwicklungsaufgabe und die aktuelle Aufgabenstellung ähnlich sind. Ist dies der Fall, so werden die Werte der Sachmerkmale sowie die in der ASCII-Datei gespeicherte Aktionsvorgangsfolge, **Bild 7-4 unten links**, in

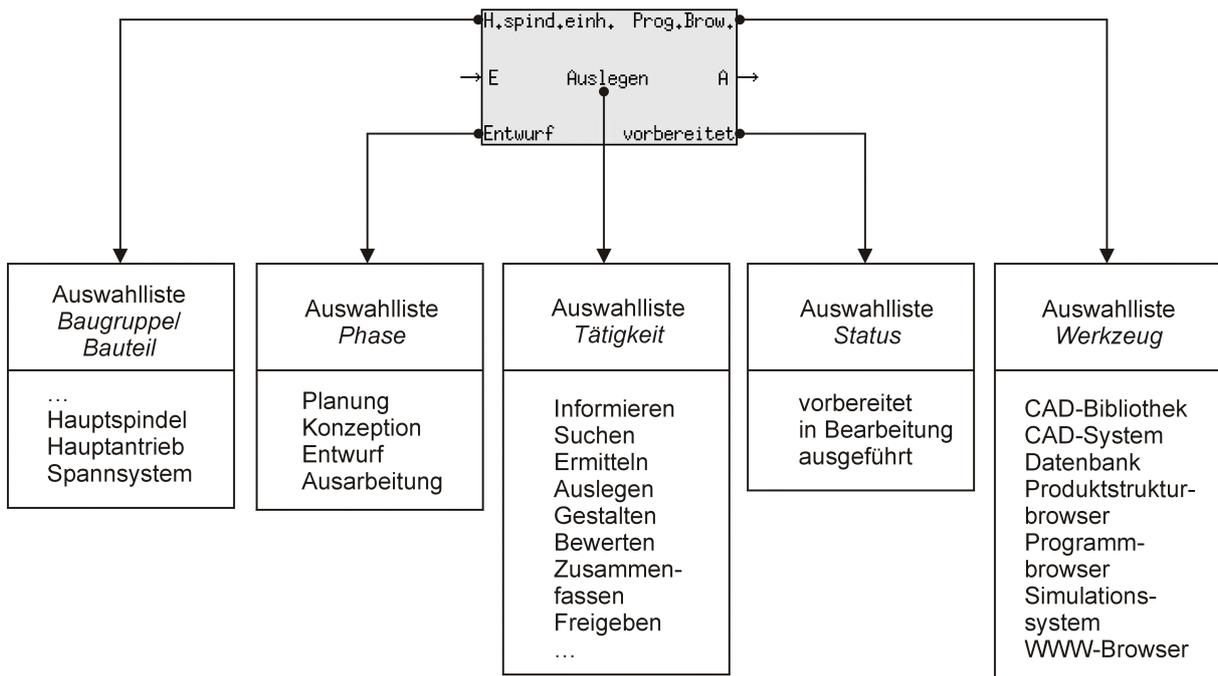
eine Zwischenablage kopiert. Im weiteren Verlauf der Planung besitzt der Konstrukteur dann die Möglichkeit, die in der Zwischenablage gespeicherten Angaben auszu-lesen und in die Zeichenebene des Prozeßgestaltungseditors zu importieren, siehe Kapitel 7.3.2.



**Bild 7-4:** Detailinformationen zu einer gefundenen ähnlichen Lösung (oben) und Speicherung der konkretisierenden Aktionsvorgangsfolge (unten rechts) in einer ASCII-Textdatei (unten links)

### 7.3.2 Prozeßgestaltung

Die Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses in Form von Einzelmodellierungsaktionen und Reihenfolgebeziehungen erfolgt in der Zeichenebene des Prozeßgestaltungsmoduls unter Anwendung der Modellierungstechnik IDEFO [154]. Einzelmodellierungsaktionen im Rahmen dieses Ansatzes beinhalten neben Angaben zur Baugruppe/ zum Bauteil, zur Entwicklungsphase und zur Tätigkeit auch Informationen zum Bearbeitungsstatus sowie dem für die Ausführung der Aktion geeigneten Produktentwicklungswerkzeug, **Bild 7-5**. Die Inhalte in den Textfeldern der Einzelmodellierungsaktionen können über Auswahllisten verändert werden.



**Bild 7-5:** Auswahllisten zu den Textfeldern einer Einzelmodellierungsaktion

Die Einträge in den Auswahllisten *Baugruppe/ Bauteil* und *Tätigkeit* sind dabei von der hierarchisch übergeordneten Produktmodellierungsaktion abhängig. Wurde beispielsweise in der ersten Modellierungsebene eine die Baugruppe *Hauptspindelinheit* betreffende Aktion definiert, so werden zur Definition von Aktionen in der zweiten Modellierungsebene nur die Unterbaugruppen der Hauptspindelinheit (*Hauptspindel*, *Hauptantrieb* und *Spannsystem*) in der Auswahlliste *Baugruppe* angezeigt.

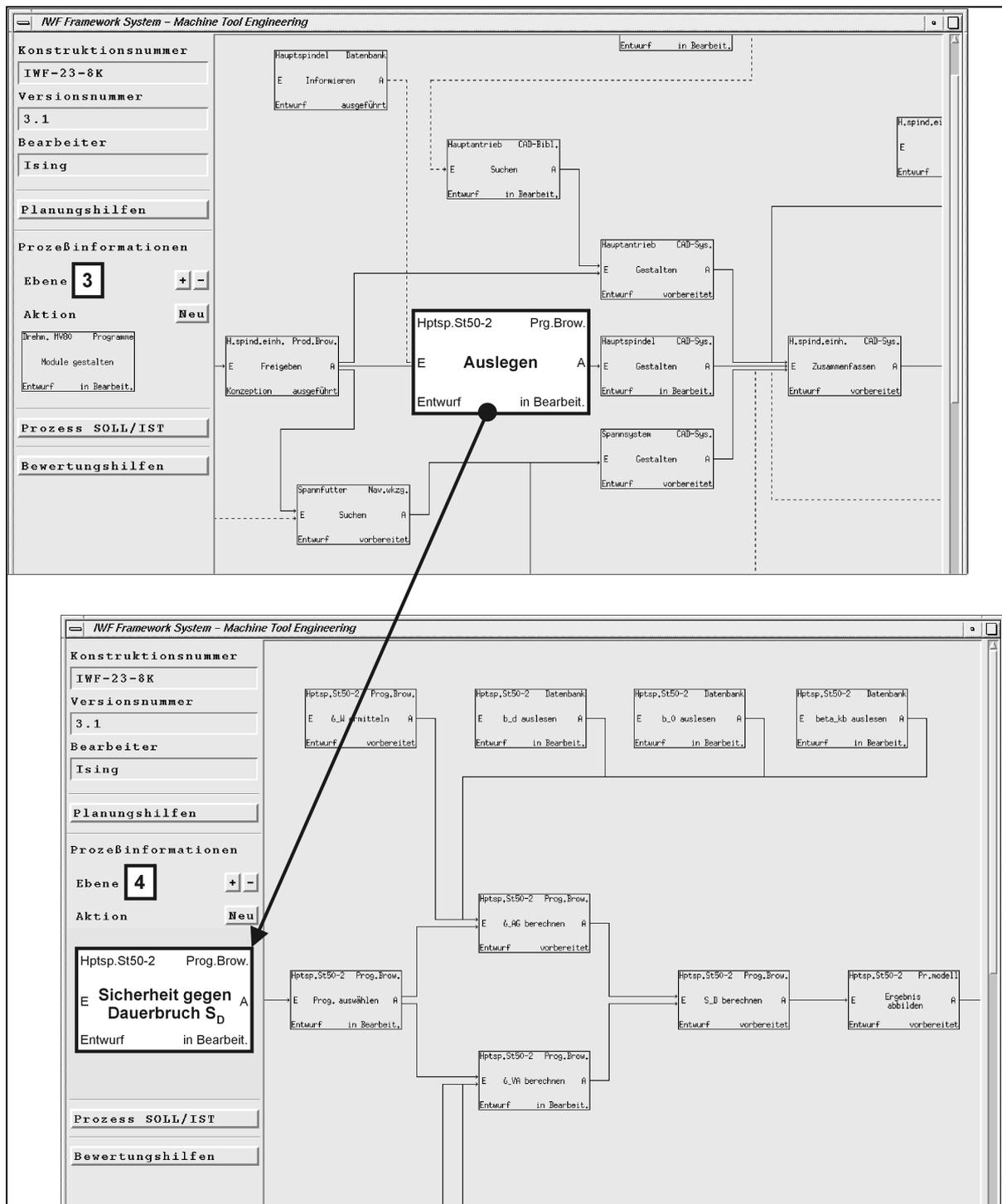
Im Gegensatz dazu nehmen die Inhalte der Auswahllisten *Phase*, *Status* und *Werkzeug* nur vordefinierte Attribute an. Über die Auswahlliste *Werkzeug* kann der Konstrukteur sämtliche im Rahmen der Entwicklung zur Verfügung stehenden Rechnerwerkzeuge, Datenbanken und Bibliotheken selektieren.

Die den Auswahllisten zugrundeliegenden Angaben werden im Prozeßmodell in Form von ASCII-Textdateien gespeichert, siehe Anhang Kapitel 11.1. In gleicher Weise erfolgt die Abbildung der Reihenfolgebeziehungen zwischen den Einzelmodellierungsaktionen, siehe Anhang Kapitel 11.2. Mit Hilfe der vorgestellten Beschreibungsmethode besteht die Möglichkeit, Produktentwicklungsprozesse systematisch zu verfeinern und strukturiert in das Prozeßmodell abzubilden.

Beispielhaft ist in **Bild 7-6 oben** ein Ablaufplan zur Entwicklung der Baugruppe *Hauptspindereinheit* einer Horizontal-Drehmaschine dargestellt. Dieser gliedert sich in die Kernaufgaben *Suchen eines Spannfutters*, *Gestalten eines Hauptantriebes*, *Auslegen* und *Gestalten der Hauptspindel*, *Gestalten des Spannsystems* und *Zusammenfassen* der Baugruppen zur *Hauptspindereinheit*.

In **Bild 7-6 unten** wird das Ergebnis einer Ähnlichkeitssuche für die im Rahmen der Entwicklung der Hauptspindereinheit durchzuführende Produktentwicklungsaufgabe *Auslegen der Hauptspindel* dargestellt. Dem Konstrukteur wird eine Aktionsvorgangsfolge vorgeschlagen, die ihn bei der sicherheitsgerechten Auslegung der Hauptspindel, in diesem Fall bei der Ermittlung des Sicherheitskennwertes *Sicherheit gegen Dauerbruch  $S_D$* , unterstützt.

Die zur Berechnung der einzelnen Parameter des Kennwertes *Sicherheit gegen Dauerbruch  $S_D$*  notwendigen Berechnungsprogramme sind über das Textfeld *Produktentwicklungswerkzeug* der jeweiligen Modellierungsaktion angebunden. Bereits vorliegende Eingabewerte der Berechnungsprogramme werden durch das in [219] beschriebene Rechnerwerkzeug zur Suche, Analyse und Verarbeitung von Produktdaten bereitgestellt.



**Bild 7-6:** Beispielhafte Ablaufstruktur zur Entwicklung der Hauptspindeleinheit einer Horizontal-Drehmaschine (oben) und Vorschlag einer Aktionsvorgangsfolge zur Unterstützung der sicherheitsgerechten Auslegung der Hauptspindel als Ergebnis einer Ähnlichkeitssuche (unten)

### 7.3.3 Prozeßsteuerung und -überwachung

Durch die Steuerungsfunktion des Prozeßgestaltungsmoduls wird das Ausführen der Produktmodellierungsaktionen veranlaßt. Eine Überwachungsfunktion vergleicht den tatsächlichen mit dem geplanten Prozeßverlauf, **Bild 7-7**. Die Soll-Zustände der Produktentwicklungsaufgaben resultieren aus den Vorgaben der Zeit- und Ressourcenplanung und werden aus dem Prozeßmodell ausgelesen. Die Ist-Zustände entsprechen dem momentanen Bearbeitungsstatus der Aufgaben. Sofern Abweichungen zwischen den geplanten und den tatsächlichen Zuständen der Aufgaben festgestellt werden, erfolgt eine Anpassung der Prozeßablauffolge. Dabei ist es Zielsetzung, durch das Einleiten von Maßnahmen, wie die Neu- oder Alternativdefinition sowie die Aufteilung oder das Zusammenfassen von Aufgaben, Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand zu beseitigen.

Aktion		Phase	SOLL	IST	Maßnahme erforderlich	
					ja	nein
H. spind. einh.	Freigeben	Konzeption	ausgeführt	ausgeführt	◇	◆
Hauptspindel	Auslegen	Entwurf	in Bearbeitung	vorbereitet	◆	◇
Spannfutter	Suchen	Entwurf	vorbereitet	vorbereitet	◇	◆
Hauptantrieb	Gestalten	Entwurf	in Bearbeitung	vorbereitet	◆	◇
Hauptspindel	Gestalten	Entwurf	in Bearbeitung	in Bearbeitung	◇	◆
Spannsystem	Gestalten	Entwurf	vorbereitet	vorbereitet	◇	◆
H. spind. einh.	Zusammenfassen	Entwurf	vorbereitet	vorbereitet	◇	◆

Abbruch OK

**Bild 7-7:** Soll-/ Ist-Vergleich der Prozeßzustände

## 7.4 Modul zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Produkten

### 7.4.1 Produktplanung und -gestaltung

Unter Zugrundelegung der sicherheitstechnisch optimierten Prozeßablauffolge erfolgt die Gestaltung des Produktes. Dazu werden die innerhalb des Prozeßgestaltungsmoduls integrierten Produktentwicklungswerkzeuge eingesetzt. Das Bereitstellen von sicherheitsspezifischen Daten während der Produktgestaltung erfolgt aus der Wissensbasis *Maschinensicherheit*.

Grundlage der Baugruppen- und Bauteileauslegung ist die Erzeugnisstruktur der Werkzeugmaschine, die die Maschinenbaugruppen und -bauteile der Werkzeugma-

schine in hierarchischer Form darstellt. Zur Bestimmung der Eigenschaften werden den Baugruppen und Bauteilen in der Erzeugnisstruktur entsprechende Berechnungsprogramme zugeordnet, wobei fehlende Eingabeparameter erkannt und über entsprechende Eingabefenster vom Benutzer abgefragt werden. Bei fehlerfreier Durchführung des Berechnungsprogramms erfolgt ein Vergleich der generierten Daten mit den bereits im Produktmodell existierenden Daten. Befindet sich der neue Wert außerhalb der Toleranzbreite eines bereits bestehenden Wertes, so liegt ein Konsistenzproblem vor, auf das der Benutzer mittels eines Dialoges aufmerksam gemacht wird.

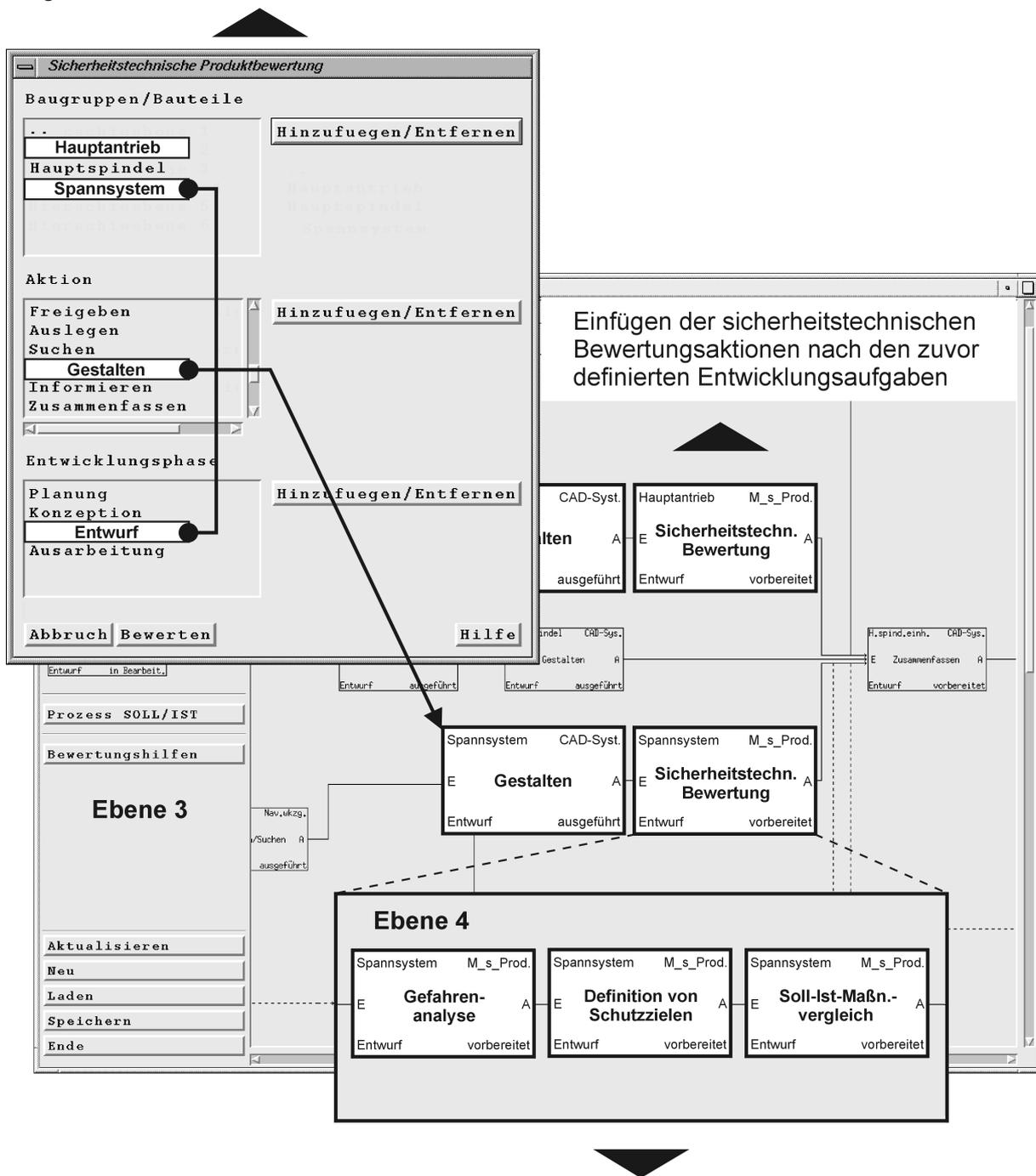
Die detaillierte Gestaltung der Werkzeugmaschinenkomponenten wird durch das 3D-CAD-System Pro/ENGINEER [161] unterstützt. Die Übergabe von Berechnungsergebnissen erfolgt dabei über Schnittstellendialoge. Eine CAD-Bibliothek enthält Geometriemodelle von Maschinenbaugruppen und Sicherheitsmaßnahmen in parametrisierter Form. Durch Veränderung der variablen Bemaßungen können Modelle beliebiger Dimension erzeugt werden.

Im Simulationssystem IGRIP werden den geometrischen Modellen kinematische und dynamische Beschreibungen zugeordnet. Die Übergabe der Geometriemodelle vom CAD- an das Simulationssystem erfolgt dabei über die in beiden Systemen implementierten Standard-Schnittstellen IGES, VDAFS oder das Render-Dateiformat. Die Bewegungssimulation gestattet eine Kollisionskontrolle zwischen den einzelnen Baugruppen während des Bearbeitungsprozesses.

#### 7.4.2 Produktbewertung

Die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen während der Produktgestaltung wird durch eine im Anschluß an die einzelnen Produktentwicklungsaufgaben durchzuführende sicherheitstechnische Bewertung überprüft. Dazu werden zunächst *die* Produktentwicklungsaufgaben festgelegt, nach denen eine sicherheitstechnische Bewertung durchzuführen ist, **Bild 7-8 oben**. Anschließend werden nach diesen definierten Aufgaben sicherheitstechnische Bewertungsaktionen eingefügt, **Bild 7-8 Mitte**. Die Konkretisierung der Bewertungsaktionen erfolgt in der nächsten Hierarchieebene durch die Teilaktionen *Gefahrenanalyse*, *Definition von Schutzzielen* und *Soll-Ist-Maßnahmenvergleich*, **Bild 7-8 unten**. Im folgenden werden die Inhalte der einzelnen Bewertungsteilaktionen beschrieben.

Definition der Produktentwicklungsaufgaben, nach denen eine sicherheitstechnische Bewertung durchzuführen ist.



Ausführen der Bewertungsteilaktionen durch das Modul zur sicherheitsintegrierten Produktgestaltung (M\_s\_Prod.)

**Bild 7-8:** Definieren und Einfügen sicherheitstechnischer Bewertungsaktionen in den Prozeßablaufplan

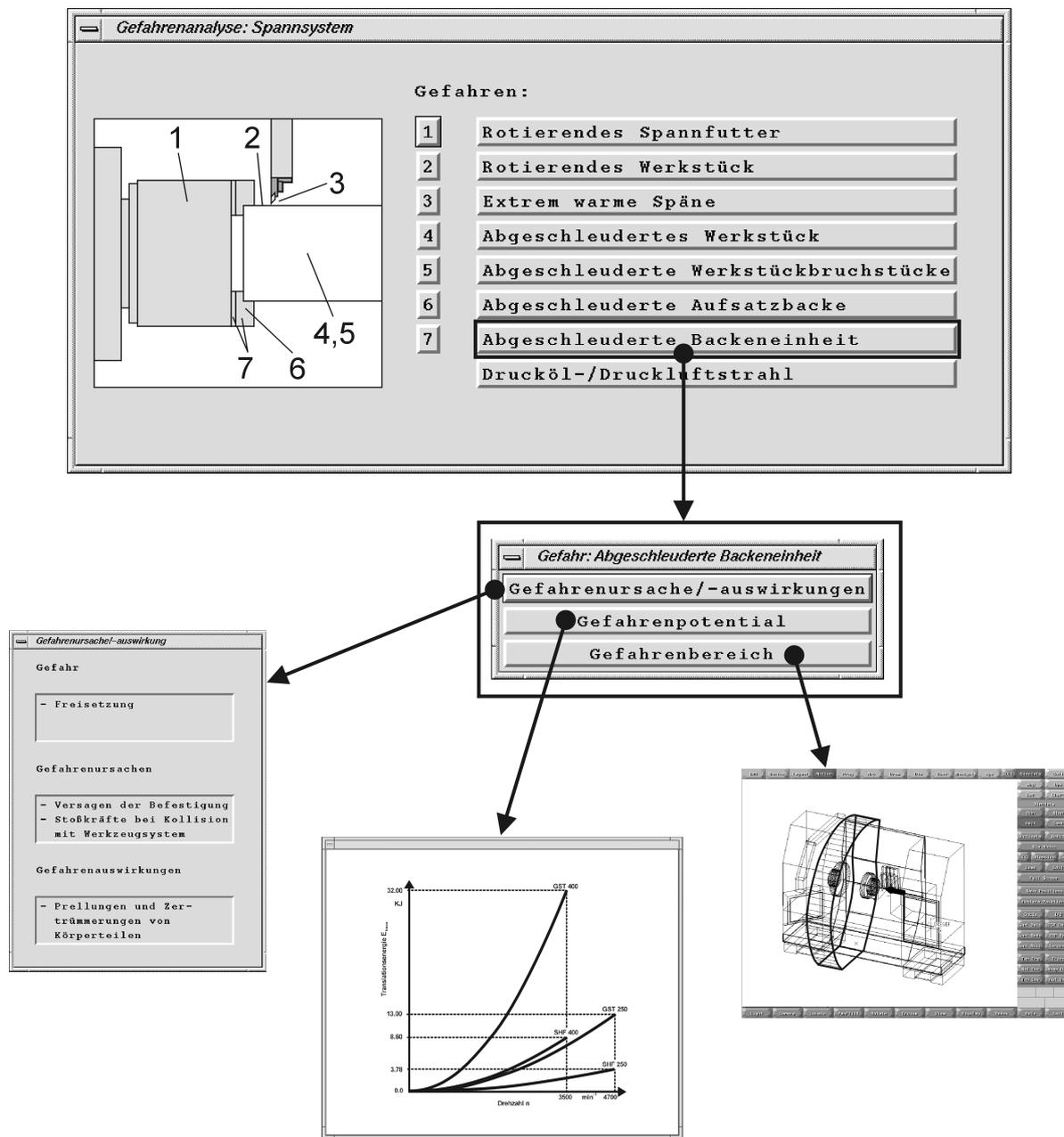
## Gefahrenanalyse

Im Rahmen einer Gefahrenanalyse werden die von der beispielhaft konzipierten Drehmaschine ausgehenden bauteilbezogenen Gefahren, deren Ursachen und Auswirkungen sowie mögliche Gefahrenbereiche ermittelt, **Bild 7-9**. Grundlage der Gefahrenanalyse ist das in der Wissensbasis *Maschinensicherheit* gespeicherte Erfahrungswissen zu Schadensfällen spanender Werkzeugmaschinen.

Als Ergebnis einer Wissensbasiskonsultation werden im *SicherheitsstrukturBrowser* die von der jeweiligen Baugruppe ausgehenden Gefahren aufgezeigt und die Gefahrenquellen in einer Skizze der Baugruppe gekennzeichnet. Bei den Gefahrenelementen, deren Schadenswirkung in einer Freisetzung kinetischer Energie besteht, erfolgt zusätzlich zur Anzeige von Informationen über mögliche Gefahrenursachen und -auswirkungen die Berechnung der im Schadensfall zu erwartenden translatorischen Energie. Die ermittelten Translationsenergien sind Auslegungsgrundlage für eine im späteren Verlauf der Produktentwicklung durchzuführende Dimensionierung der Maschinenschutzeinrichtung.

Die Darstellung der Gefahrenbereiche an der konzipierten Werkzeugmaschine erfolgt im Simulationssystem IGRIP [157]. Dazu werden die Bereiche, in denen der Bediener dem Risiko einer Verletzung durch technologisch bedingte Bewegungen von Maschinenbaugruppen oder durch abgeschleuderte Elemente wie Werkzeug-, Werkstück- oder Spannmittelbruchstücke ausgesetzt ist, durch die das räumliche Ausmaß der Gefährdung symbolisierende Volumenkörper gekennzeichnet. Zu diesem Zweck wird das Geometriemodell der Drehmaschine vom CAD- an das Simulationssystem übertragen und dort um die zuvor mit Hilfe von Auslegungsprogrammen berechneten Volumenkörper ergänzt.

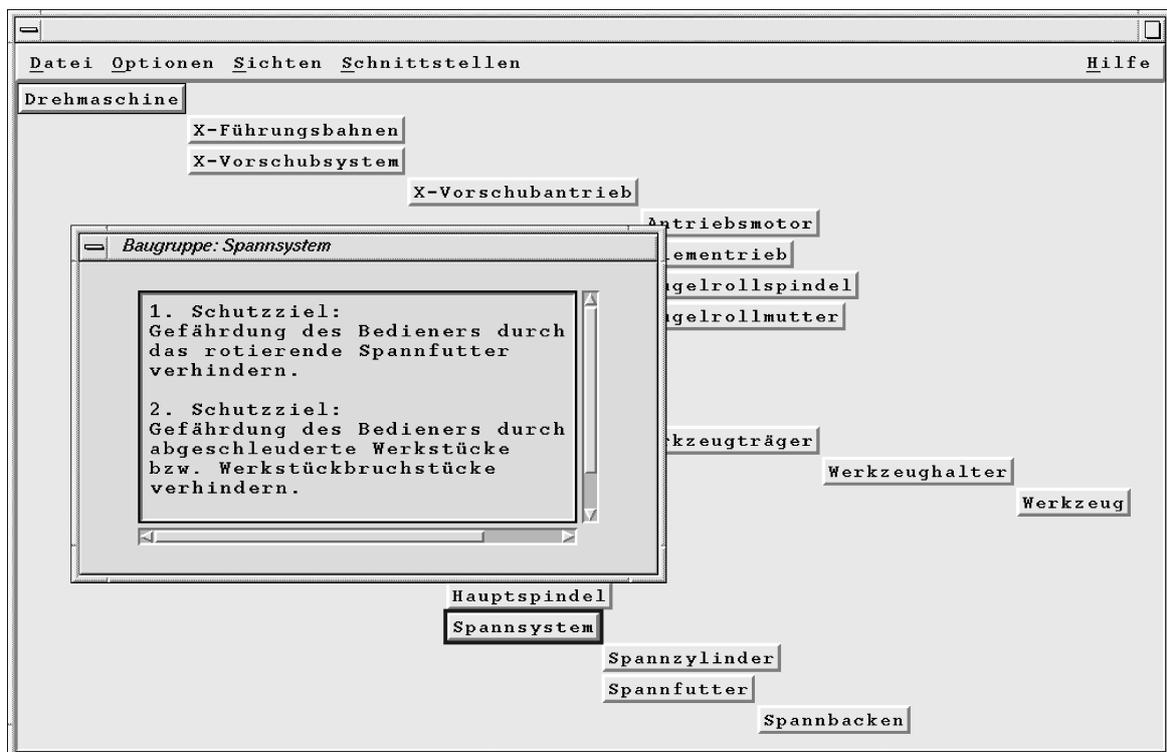
Die Resultate der Gefahrenanalyse werden in einem Ergebnisprotokoll zwischengespeichert. Unter Zugrundelegung der Ergebnisse erfolgt anschließend die Ermittlung der im weiteren Verlauf der Produktentwicklung zu erfüllenden sicherheitstechnischen Schutzziele.



**Bild 7-9:** Ergebnis der Gefahrenanalyse, dargestellt am Beispiel der Baugruppe *Drehmaschinen-Spannsystem*

**Schutzzieldefinition**

Zur Schutzzieldefinition wird der Inhalt des Ergebnisprotokolls der Gefahrenanalyse ausgewertet und den Baugruppen bzw. Bauteilen der Werkzeugmaschine im *SicherheitsstrukturBrowser* Teil- bzw. Unterziele des Gesamtziels *Gefahrenfreiheit* zugeordnet, **Bild 7-10**.



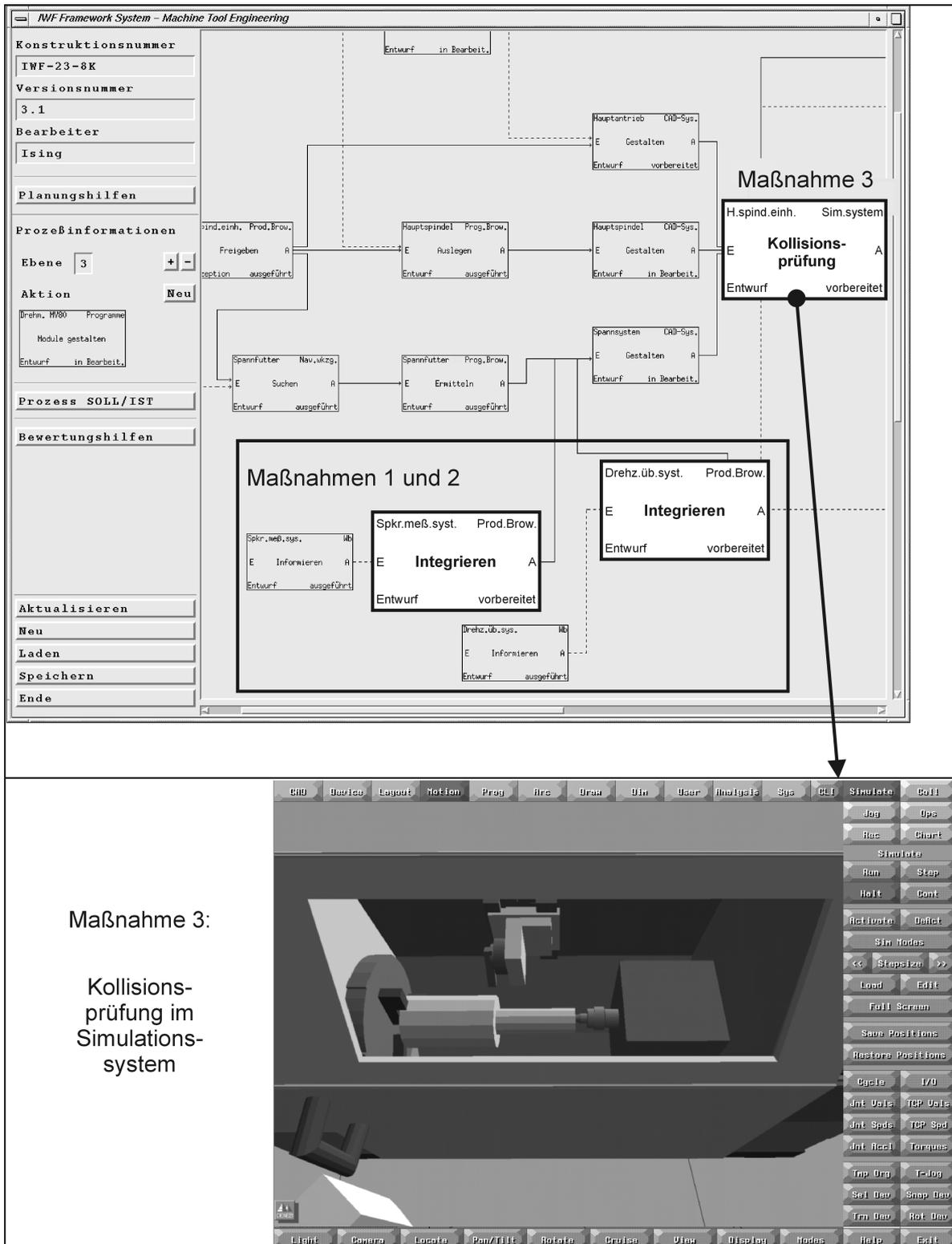
**Bild 7-10:** Baugruppenspezifische Zuordnung von Schutzzielen im *SicherheitsstrukturBrowser*

Auf diese Weise entsteht parallel zur detaillierten Gliederung und Spezifizierung der Maschine in der Erzeugnisstruktur eine Gliederung des Ziels „Sichere Maschine“ im *SicherheitsstrukturBrowser*.

### Soll-Ist-Maßnahmenvergleich

Im Rahmen eines Soll-Ist-Maßnahmenvergleichs werden die erforderlichen mit den bereits in das Produktmodell der Werkzeugmaschine integrierten sicherheitstechnischen Maßnahmen verglichen. In dem in **Bild 7-11** dargestellten Beispiel, bei dem eine durch die Baugruppe *Spannsystem* zu erwartende Gefährdung des Bedieners durch abgeschleuderte Werkstücke infolge Spannkraftausfall zu verhindern ist, wurden als Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs die Defizite „nicht vorhandenes Drehzahlüberwachungssystem“, „nicht integriertes Spannkraftmeßsystem“ sowie „nicht durchgeführte Kollisionsprüfung“ ermittelt.





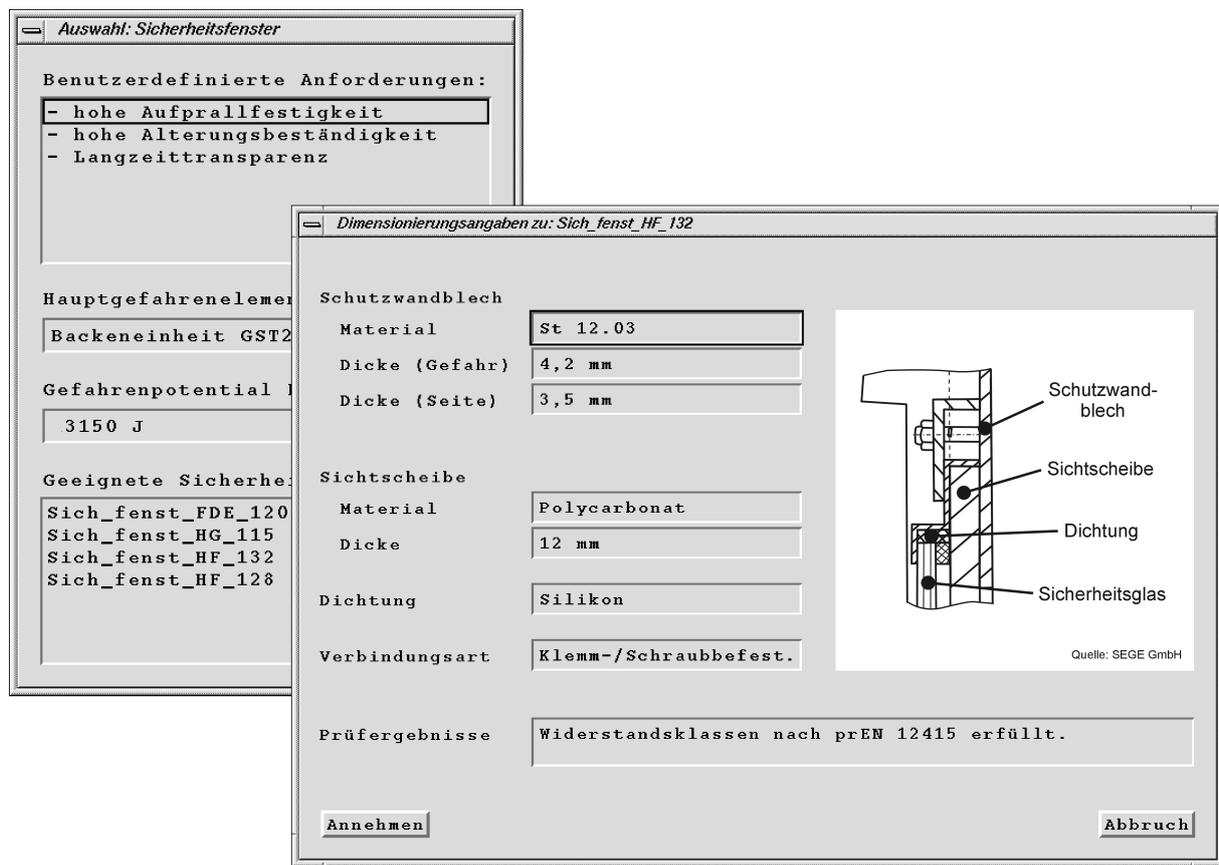
**Bild 7-12:** Programmtechnische Realisierung der sicherheitstechnischen Prozeßoptimierung und Ausführen der Aufgabe „Kollisionsprüfung im Simulationssystem“ zur Beseitigung des entsprechenden Sicherheitsdefizites

In **Bild 7-12 unten** ist beispielhaft die geforderte Kollisionsprüfung im Simulationssystem IGRIP dargestellt, die ein Aufeinandertreffen von Werkstück- und Werkzeugsystem während des Bearbeitungsprozesses und ein damit verbundenes Ausbrechen von Werkstückbruchstücken verhindern soll. Ergebnis des Optimierungsprozesses ist ein Werkzeugmaschinenmodell, das sämtliche Anforderungen der unmittelbaren Sicherheitstechnik erfüllt.

Ein Restrisiko an Werkzeugmaschinen infolge abgeschleuderter Werkstück-, Spannmittel- oder Werkzeugbruchstücke kann jedoch nicht vollständig durch Maßnahmen der unmittelbaren Sicherheitstechnik verhindert werden. Zum Schutz des Bedienpersonals werden daher an Werkzeugmaschinen zusätzlich Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik eingesetzt. Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik an Drehmaschinen sind trennende Schutzeinrichtungen. Die Auswahl, Dimensionierung und Gestaltung der Komponenten trennender Schutzeinrichtungen erfolgt mit Unterstützung des Moduls zur sicherheitsintegrierten Gestaltung von Produkten. Dieses Modul greift auf den Wissensbaustein *Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen* der Wissensbasis *Maschinensicherheit* zu, in den Dimensionierungs- und Gestaltungshinweise zu Komponenten trennender Schutzeinrichtungen implementiert wurden. Die Vorgehensweise bei der Auslegung und Gestaltung von Maßnahmen der mittelbaren Sicherheitstechnik wird im folgenden anhand des Beispiels „Trennende Schutzeinrichtung einer Horizontal-Drehmaschine“ demonstriert.

Zur Ermittlung der für den Anwendungsfall geeigneten Schutzeinrichtungsbaugruppen startet der Konstrukteur eine Suchanfrage in der Wissensbasis des Rechnersystems nach ausgeführten konstruktiven Lösungen. Eingangsgrößen sind die definierten Anforderungen an die Schutzeinrichtungsbaugruppen sowie die im Schadensfall zu erwartende und im Rahmen der Gefahrenanalyse ermittelte maximale translatorische Energie abgeschleuderter Elemente des Werkzeug-/Spannmittelspektrums, **Bild 7-13 links**.

Als Ergebnis des Suchvorganges werden Standardlösungen für Schutzeinrichtungsbaugruppen dargestellt, die im Rahmen experimenteller Beschußuntersuchungen hinsichtlich ihrer Aufprallfestigkeit analysiert wurden und Belastungen in der geforderten energetischen Größenordnung standgehalten haben. Neben Angaben zu Materialien, Mindestdicken, Werkstoffen und Prüfergebnissen erfolgt die Darstellung der gewählten Lösung in Form einer Prinzipskizze, **Bild 7-13 rechts**.

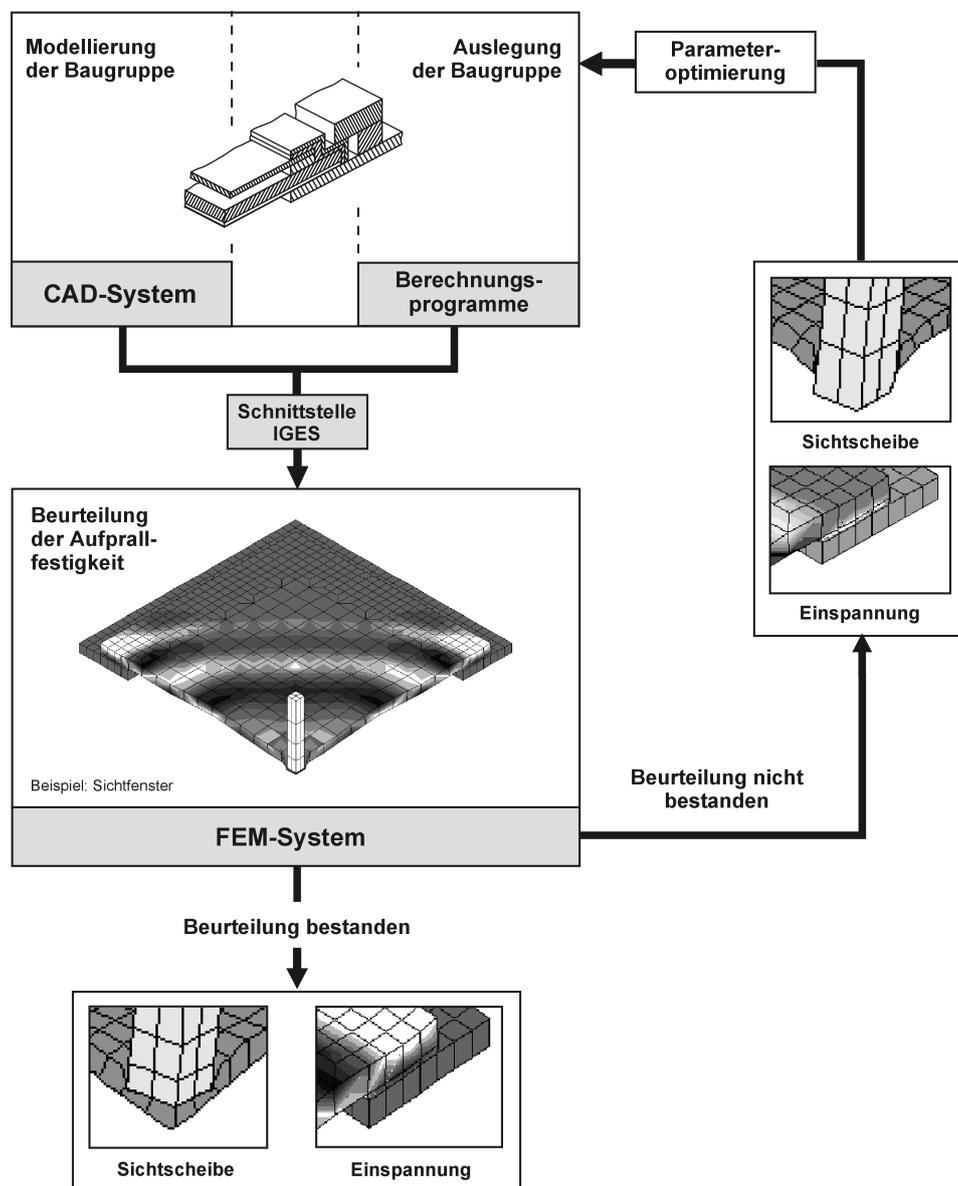


**Bild 7-13:** Eingangsgrößen der Suchanfrage und Anzeige einer geeigneten Lösung für das Beispiel *Sichtfenster*

Bei der Gestaltung der Schutzeinrichtungsbaugruppen wird der Konstrukteur durch eine CAD-Bibliothek unterstützt, in die geometrische Modelle von Standardlösungen in parametrisierter Form abgebildet wurden. Konstruktive Lösungen, die von den in der CAD-Bibliothek gespeicherten und im Rahmen von Beschußuntersuchungen nach EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] geprüften Standardlösungen abweichen, müssen hinsichtlich ihrer Aufprallfestigkeit analysiert werden. Dies erfolgt im Rahmen des rechnergestützten, sicherheitsintegrierten Produktentwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen durch die Simulation des Aufprallprüfverfahrens nach EN 12415 bzw. prEN 12417 mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Zur Beurteilung der Aufprallfestigkeit wird das CAD-Modell der zu prüfenden Schutzeinrichtungsbaugruppe über die Geometrieschnittstelle IGES an das Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“ übergeben. Basiskomponente des Anwendungsmoduls ist das FEM-Programmsystem MARC/MENTAT [159], mit dessen Hilfe hochdy-

namische Aufprallvorgänge realitätsnah abgebildet werden können. Im FEM-Programmsystem wird das Strukturmodell der zu prüfenden Baugruppe generiert und die Simulation der Aufprallprüfung durchgeführt, **Bild 7-14**. Die Arbeitsschritte der Modellierung, Auslegung und Beurteilung werden dabei solange wiederholt, bis die Baugruppe die Aufprallprüfung erfolgreich bestanden hat. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionalität des Anwendungsmoduls „FE-Aufprallsimulation“ erfolgt in Kapitel 8 anhand eines Beispiels.



**Bild 7-14:** Vorgehensweise bei der rechnerunterstützten Beurteilung trennender Schutzeinrichtungen am Beispiel *Sichtfenster* [217]

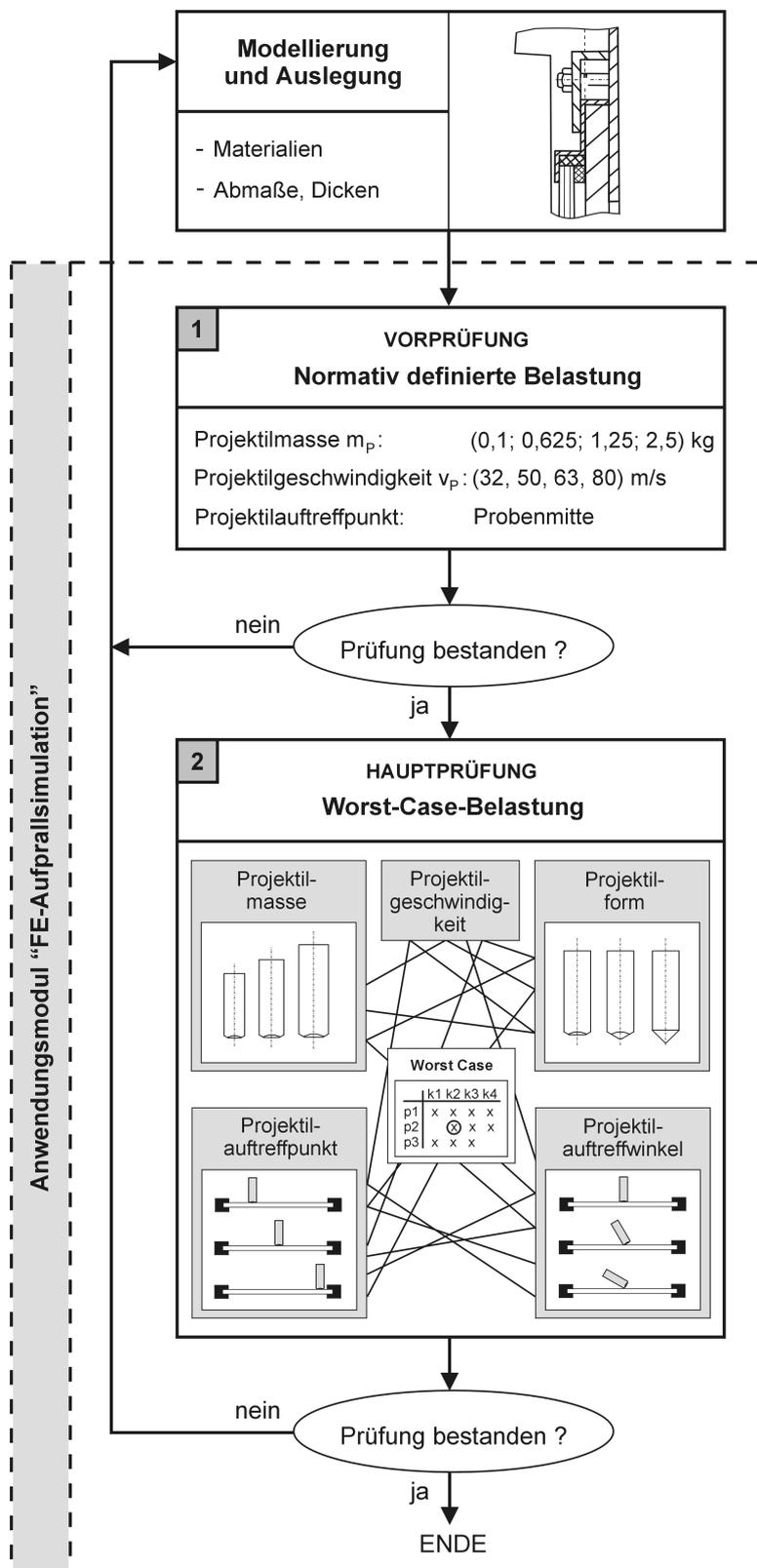
## 8 Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“

### 8.1 Allgemeines

Zur Ermittlung der Aufprallfestigkeit von Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen wird in den Europäischen Normen EN 12415 [256] und prEN 12417 [257] ein Prüfverfahren beschrieben, bei dem allseitig fest eingespannte Proben, im folgenden als Prüfobjekt bezeichnet, mit zylindrischen Körpern stoßartig beansprucht werden. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn das Prüfobjekt dem Aufprall des Projektils widersteht und im Material keine Schädigungen wie An- oder Durchrisse aufgetreten sind. Variiert werden im Rahmen der normativen Aufprallfestigkeitsuntersuchungen die Parameter *Projektilmasse* und *Projektilgeschwindigkeit*.

Unberücksichtigt bleibt allerdings in diesem Zusammenhang der Einfluß von Parameterveränderungen, wie beispielsweise der *Projektilform*, des *Projektilauftrittswinkels* oder des *Projektilauftrittspunktes*. Normativ festgelegt ist die Durchführung der Aufprallfestigkeitsuntersuchungen mit einem zylindrischen Körper stumpfer Stirnfläche, der unter einem Winkel von 90° mittig auf das Prüfobjekt auftrifft. Reale Schadensfälle an Werkzeugmaschinen zeichnen sich jedoch meist dadurch aus, daß scharfkantige Bruchstücke unkontrolliert in den Arbeitsraum der Maschine abgeschleudert werden. In den seltensten Fällen treffen diese bei eingespannten Schutzeinrichtungskomponenten, wie beispielsweise dem Sichtfenster, in der Mitte auf. Es ist davon auszugehen, daß das Rückhaltevermögen der Schutzeinrichtungsmaterialien bei realen Schadensfällen an Werkzeugmaschinen um ein Vielfaches geringer ist als die unter normativen Prüfbedingungen ermittelten Aufprallfestigkeiten [232].

Um Schutzeinrichtungsbaugruppen und -materialien für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall bereits im Konstruktionsstadium ausreichend rückhaltessicher zu dimensionieren, wurde der Systembaustein zur sicherheitsintegrierten Produktgestaltung um ein Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“ ergänzt. Diesem Anwendungsmodul ist eine optimierte Prüfablauffolge zur Beurteilung von Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen zugrundegelegt worden, **Bild 8-1**.



**Bild 8-1:** Optimierte Prüfablauffolge zur Beurteilung von Materialien trennender Schutzeinrichtungen als Grundlage des Moduls „FE-Aufprallsimulation“

Wesentliches Kennzeichen der neuen Vorgehensweise ist eine im Anschluß an die normative Prüfung stattfindende Worst-Case-Aufprallfestigkeitsbeurteilung. Dabei werden die Prüfparameter derart miteinander kombiniert, daß diese im Material eine größtmögliche Belastung hervorrufen.

Wie bereits erwähnt, erfolgt unter Zugrundelegung des von der jeweiligen Werkzeugmaschine ausgehenden Gefährdungspotentials zunächst die überschlägige Modellierung und Auslegung der jeweiligen Schutzeinrichtungsbaugruppe sowie die anschließende Übergabe des Modells an das Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“. Die Aufprallfestigkeit der Baugruppe bzw. des Materials wird anschließend in einer ersten Prüfstufe (Vorprüfung) in Anlehnung an die in EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] definierten Prüfbedingungen beurteilt. Ein Materialversagen führt zu einem Rücksprung zum Arbeitsschritt *Modellierung und Auslegung* und dem dortigen Anpassen der konstruktiven Parameter.

In einer zweiten Prüfstufe (Hauptprüfung) erfolgt die Ermittlung des Rückhaltevermögens des Prüfobjektes für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall (Worst Case). Dazu werden zunächst Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Einfluß einzelner Prüfparameter, wie beispielsweise der Projektilform oder des Projektilauftreffpunktes, auf das Aufprallverhalten der Schutzeinrichtungsbaugruppe analysiert wird. Basierend auf den Ergebnissen werden im nächsten Schritt *die* Prüfparameter-einstellungen miteinander kombiniert, die in den Einzeluntersuchungen eine größtmögliche Schädigung des Materials verursachten. Ein Nicht-Bestehen der Worst-Case-Aufprallfestigkeitsbeurteilung führt im Anschluß an die Optimierung der Konstruktionsparameter zu einem nochmaligen Durchlaufen des zweistufigen Prüfvorganges.

Eine besondere Bedeutung innerhalb trennender Schutzeinrichtungen kommt dem Sicherheitsfenster zu, da sich dieses im unmittelbaren Wirkungsbereich von Werkzeug, Werkstück und Spannmittелеlementen befindet [211]. Im Rahmen von Simulationsrechnungen ist exemplarisch das in Sicherheitsfenstern trennender Schutzeinrichtungen eingesetzte Material MAKROLON 281 der Firma Röhm GmbH, Darmstadt [273], hinsichtlich dessen Verhaltens bei hochdynamischer Beanspruchung analysiert worden.

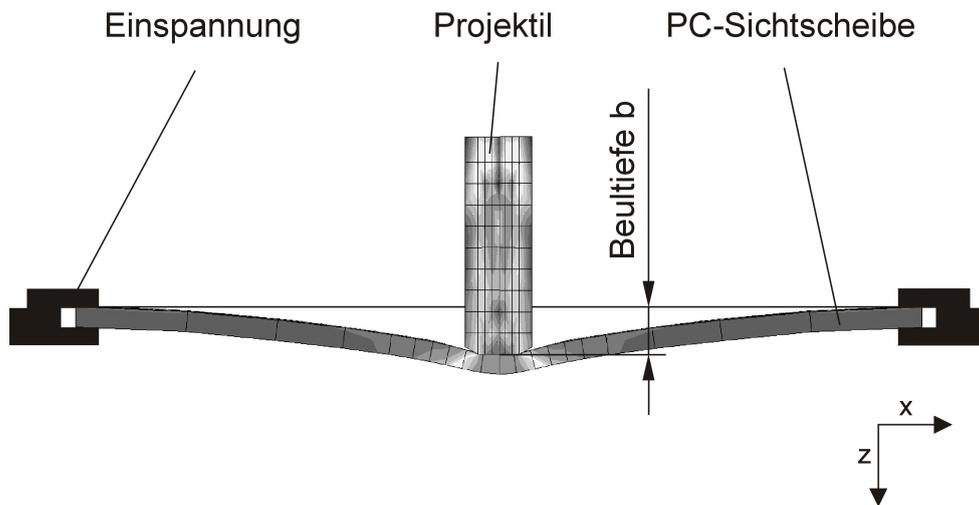
Schwerpunkt der ersten Prüfstufe war dabei die Beurteilung des Einflusses der Sichtscheibeneinspannung auf das Rückhaltevermögen der Sicherheitsfenster. Die Belastung erfolgte entsprechend der normativ festgelegten Prüfbedingungen.

Als Einzelparameter wurden in der zweiten Prüfstufe die Projektilform, der Projektilaufreffwinkel und der Projektilaufreffpunkt variiert. Aus den Ergebnissen der Einzeluntersuchungen ist ein Worst-Case-Belastungsfall für das Sichtscheibenmaterial MAKROLON 281 abgeleitet worden.

Durchgeführt wurden die Aufprallfestigkeitsbeurteilungen mit einer Projektilmasse  $m_P = 1,25 \text{ kg}$  und einer Projektilgeschwindigkeit  $v_P = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  entsprechend Widerstandsklasse B1 nach EN 12415 [256]. Die Widerstandsklasse B1 bildet den Schadensfall „Abschleudern einer gehärteten Standard-Aufsatzbacke der Masse  $m_{AB} = 1,25 \text{ kg}$  von Drehmaschinenspannfuttern mit einem Spanndurchmesser  $D_{sp}$  zwischen 130 und 250 mm bei einer Umfangsgeschwindigkeit von  $v_u = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ “ ab. Aus dieser Prüfung resultierende Dimensionierungshinweise sind Mindestanforderungen für eine rückhaltesichere Auslegung von trennenden Schutzeinrichtungen an Drehmaschinen.

Neben den im Kontaktbereich bzw. an der Einspannstelle des Sichtscheibenmaterials auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES wurden auch die unmittelbar an der Stirnfläche des Projektils auftretenden Stoßkräfte sowie der Beultiefeverlauf im Projektilaufreffpunkt während der Stoßbelastung analysiert. Insbesondere die zu erwartende Maximalstoßkraft  $F_{Smax}$  ist eine wichtige Kenngröße bei der Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen. Eine Ermittlung der Maximalstoßkraft  $F_{Smax}$  im Projektilaufreffpunkt ist im Rahmen experimenteller Beschußuntersuchungen nicht möglich.

Unter der Beultiefe  $b$  soll dabei im folgenden die Wegdifferenz  $\Delta z$  in z-Richtung zwischen dem Knoten mit maximaler Biegung im Projektilaufreffpunkt und den Elementknoten der Sichtscheibenkante im Einspannbereich des Sichtfensters verstanden werden, **Bild 8-2**.

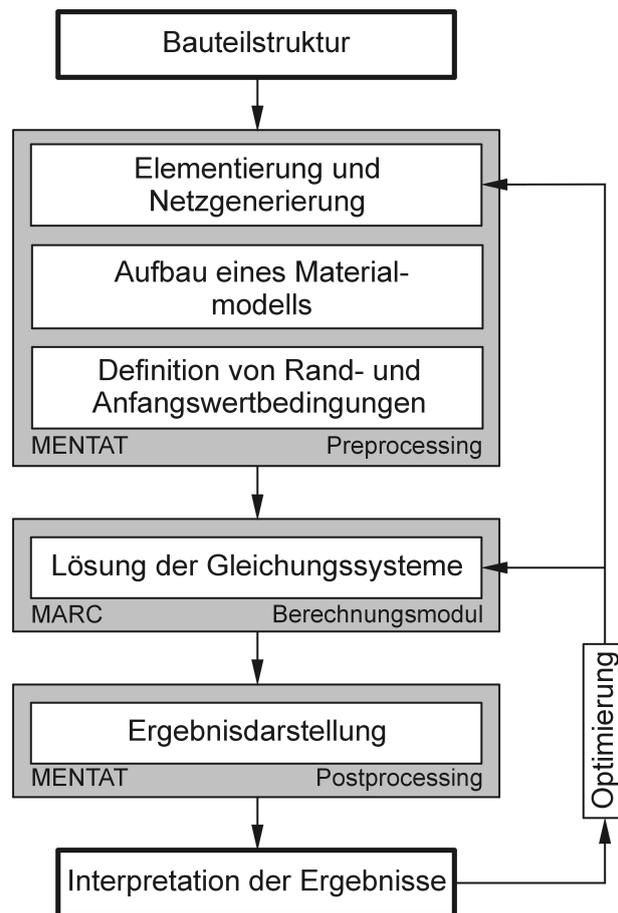


**Bild 8-2:** Definition der Beultiefe  $b$

Die Ergebnisse der Worst-Case-Aufprallfestigkeitsbeurteilungen wurden mit den unter normativen Prüfbedingungen erzielten Resultaten verglichen. Eine Verifizierung der FE-Ergebnisse erfolgte durch experimentelle Beschußuntersuchungen.

## 8.2 Grundlagen der Methode der Finiten Elemente

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) ist ein leistungsfähiges Berechnungsverfahren zur Analyse komplexer Fragestellungen im Ingenieurwesen. Dabei wird die zu untersuchende Struktur durch eine Vielzahl von Elementen, die über Knotenpunkte zu einem Gesamtsystem (Netz) miteinander verbunden werden, approximiert. Die Steifigkeits-, Massen- und Dämpfungsmatrizen der einzelnen Elemente ergeben sich aus den Materialgesetzen, den Kompatibilitätsbedingungen für die Verschiebungen und den Gleichgewichtsbedingungen [8]. Durch die additive Überlagerung der Elementmatrizen werden die Systemmatrizen gewonnen. Die Definition von Randbedingungen, wie beispielsweise Kräfte oder Einspannungen, erfolgt an den Knotenpunkten der FEM-Struktur. Unter Zugrundelegung der auf diese Weise gewonnenen mathematischen Beschreibung wird die Berechnung der Knotenpunktverschiebungen durchgeführt. Die FE-Berechnung von technischen Problemstellungen umfaßt die in **Bild 8-3** dargestellten Arbeitsschritte. Nachfolgend werden zunächst die Arbeitsschritte der Modellbildung für das Anwendungsbeispiel „Sichtfenster einer trennenden Schutzeinrichtung“ beschrieben.



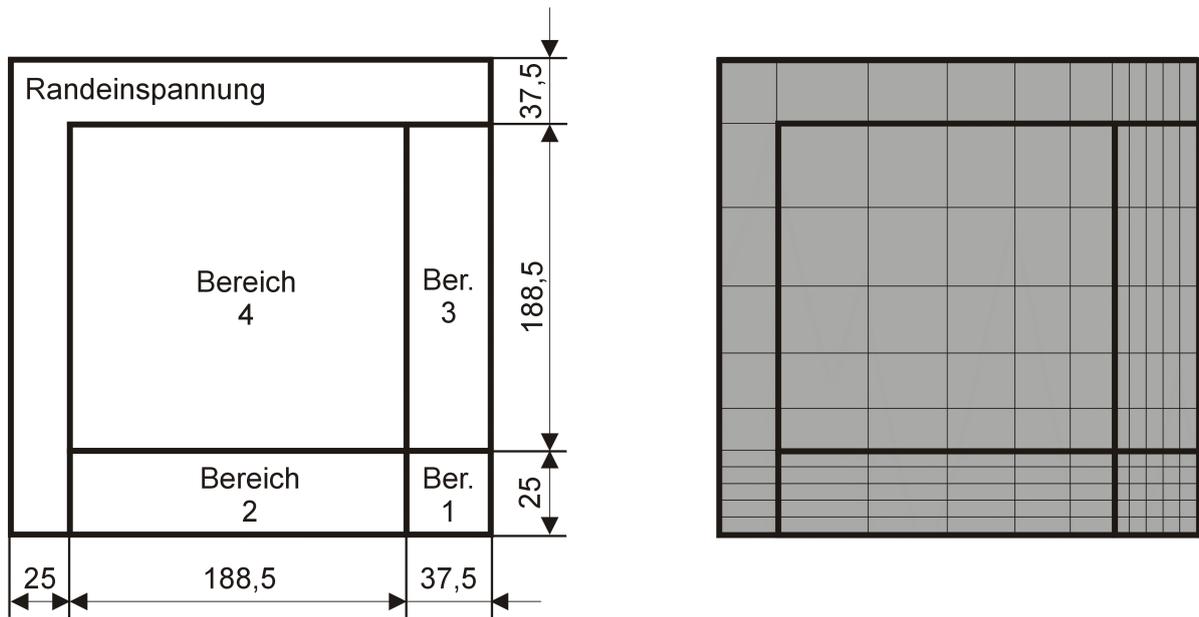
**Bild 8-3:** Arbeitsschritte bei der FE-Berechnung von technischen Problemstellungen [nach 159]

### 8.3 Aufbau des FE-Modells „Sichtfenster“

#### 8.3.1 Elementierung und Netzgenerierung

Bei der Auswahl der Elementtypen für Prüfobjekt und Projektil führt die Forderung nach einer dreidimensionalen Analyse zu einer Eingrenzung des Elementtypenspektrums auf Tetraeder- und Hexaederelemente. Vergleichende Untersuchungen zeigten, daß Hexaederelemente sowohl für die Modellierung des Prüfobjektes als auch für die Modellierung der Projektile am besten geeignet sind.

Unter Ausnutzung von Modellsymmetrien zur Reduzierung der Rechenzeit wurde das Strukturmodell der zu analysierenden Probe generiert. **Bild 8-4** stellt die Vernetzung des Viertel-Strukturmodells für Aufprallsimulationen dar, bei denen das Prüfobjekt durch das Projektil mittig belastet wird.



**Bild 8-4:** Vernetzung des Viertel-Strukturmodells bei mittlerer Aufprallbelastung

Sämtliche auf dem Prüfobjekt definierten Bereiche 1, 2, 3 und 4 verfügen über jeweils 25 Elemente. Da das Ergebnis der Aufprallsimulation maßgeblich von der Gestaltung des Kontaktbereichs zwischen den Stoßpartnern abhängt, ist die Netzstruktur des Strukturmodells im Bereich 1 verfeinert worden.

### 8.3.2 Materialmodell

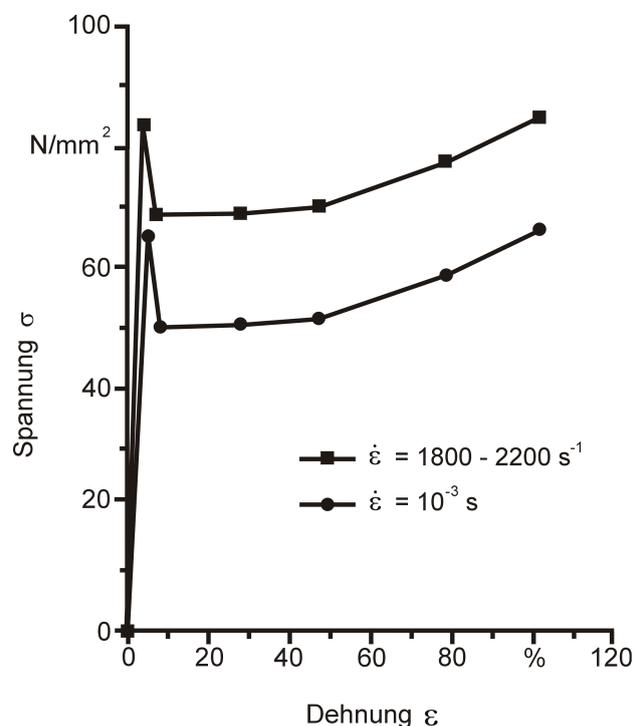
Die Modellierung des Materialverhaltens und das damit verbundene Abbilden der Materialkennwerte ist für die Genauigkeit der FEM-Berechnung von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch das in Sicherheitsfenstern trennender Schutzeinrichtungen eingesetzte Polycarbonat MAKROLON 281 der Firma Röhm GmbH, Darmstadt [273], hinsichtlich des Aufprallverhaltens analysiert. Neben Kennwerten der linear-elastischen und plastischen Werkstoffverformung sind Dämpfungsparameter und Versagenskriterien zur realitätsnahen Abbildung des Materialverhaltens in das FE-Modell abgebildet worden.

#### Kennwerte der linear-elastischen und plastischen Werkstoffverformung

Die Beschreibung des Werkstoffverhaltens im Bereich elastischer und plastischer Verformung erfordert

- die Definition der Spannungs-Dehnungs-Kurve in Abhängigkeit von der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$ ,
- die Formulierung der Fließbedingung sowie
- die Abbildung einer Verfestigungsregel.

Die quasi-statische Spannungs-Dehnungs-Kurve für das im Rahmen dieser Arbeit analysierte Sichtscheibenmaterial MAKROLON 281 der Firma Röhm GmbH wurde [273] entnommen. WRIGHT, FLECK und STRONGE [247] führten Untersuchungen durch, bei denen Kennwerte des Sichtscheibenmaterials für hochdynamische Belastungsfälle ermittelt wurden. Es zeigte sich auch hier, daß ein Erhöhen der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  zu einem Verschieben der quasi-statischen Referenzfließkurven hin zu einer höheren Lage innerhalb der Diagramme führte. **Bild 8-5** stellt die den Simulationsrechnungen in dieser Arbeit zugrundegelegten Spannungs-Dehnungs-Kurven für MAKROLON 281 dar.



**Bild 8-5:** Spannungs-Dehnungs-Kurven für MAKROLON 281 bei unterschiedlichen Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon}$

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, ist das Verschieben der quasi-statischen Referenzfließkurve auch bei diesem Material darauf zurückzuführen, daß die

äußere Beanspruchung während der kurzzeitigen Stoßbelastung nicht vollständig durch molekulare Abgleitprozesse innerhalb des Materials abgebaut werden kann.

Als Fließbedingung wurde dem Werkstoffmodell für MAKROLON 281 die Fließbedingung nach VON MISES zugrundegelegt, mit der bei einer Stoßbelastung auftretende mehrachsige Spannungszustand auf den bei einachsiger Beanspruchung ermittelten Werkstoffkennwert für Fließen umgerechnet wird. Da bei der simulierten Stoßbeanspruchung nur ein Belastungs-/ Entlastungszyklus auftritt, konnte die Grundeinstellung des FE-Programmsystems MARC/MENTAT, eine isotrope Verfestigungsregel, übernommen werden.

### Dämpfungsparameter

Dämpfung ist die Fähigkeit eines Werkstoffes, die Energie, die während mechanischer Schwingungen oder Wellenausbreitungen entsteht, in seiner Struktur zu verteilen und aufzunehmen [8]. Im Rahmen dieses Ansatzes wurde das RAYLEIGH'sche Dämpfungsmodell verwendet. Dabei wird die Dämpfungsmatrix  $C$  näherungsweise durch Addition der mit Dämpfungskoeffizienten multiplizierten Massenmatrix  $M$  und Steifigkeitsmatrix  $K$  bestimmt:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (8.1)$$

mit:  $C$  : Dämpfungsmatrix,

$M$  : Massenmatrix,

$K$  : Steifigkeitsmatrix,

$\alpha$  : Dämpfungskoeffizient der Massenmatrix  $M$  und

$\beta$  : Dämpfungskoeffizient der Steifigkeitsmatrix  $K$ .

Beide Dämpfungskoeffizienten sind sowohl abhängig vom Material als auch von der Geometrie der betrachteten Struktur. Für das im Rahmen dieser Untersuchungen analysierte Material MAKROLON 281 mit den Abmaßen 500 mm x 500 mm und der Dicke 12 mm beträgt  $\alpha = 2,2060$  und  $\beta = 2,9395 \cdot 10^{-6}$ .

Exakt ist die RAYLEIGH'sche Dämpfung allerdings nur für die erste und zweite Eigenfrequenz. Das Materialverhalten bei höherfrequenten Eigenschwingungen wird durch die RAYLEIGH'sche Dämpfung angenähert. Diese Annäherung ist jedoch für

die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse ausreichend, da höherfrequente Schwingungen schnell abklingen und damit nur einen geringen Einfluß auf die Systemantwort besitzen.

### **Versagenskriterien**

Als Materialversagen wird im Rahmen dieses Ansatzes vereinfachend ein Zustand definiert, bei dem die Dehnung der Elemente des Strukturmodells in z-Richtung die Bruchdehnung des Materials überschreitet. Die betroffenen Elemente werden daraufhin durch eine in das FE-System implementierte Programmroutine gelöscht. Auf diese Weise ist die Darstellung von An- und Durchrissen innerhalb des FE-Modells möglich.

#### **8.3.3 Rand- und Anfangswertbedingungen**

Die Definition der Rand- und Anfangswertbedingungen erfolgte basierend auf den in EN 12415 [256] und prEN 12417 [257] definierten Prüfbedingungen. Das in diesen Normen geforderte kraftschlüssige Spannen der Prüfkörper in der Aufnahmevorrichtung der Beschußeinrichtung wird im FE-Modell durch die Fesselung der translatorischen Freiheitsgrade der Elementknoten im Randbereich gewährleistet. Als Anfangswert wurde den Projektilknoten der jeweilige in EN 12415 bzw. prEN 12417 definierte Wert der Projektilaufprallgeschwindigkeit zugewiesen. Die Probekörperknoten befinden sich zu Beginn der Aufprallsimulation in Ruhe.

### **8.4 Ergebnisse der Simulationsrechnungen**

#### **8.4.1 Beurteilung des Einflusses einzelner Prüfparameter**

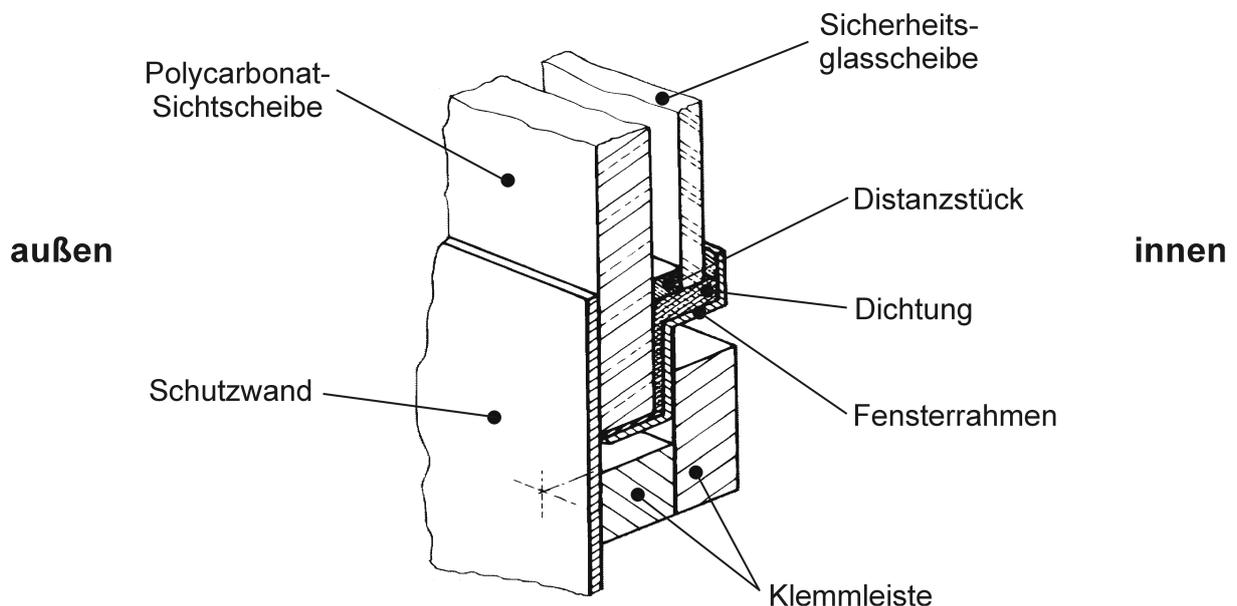
##### **8.4.1.1 Einfluß der Einspannungsart**

Die Art der Sichtscheibeneinspannung ist ein entscheidender Faktor für die Güte der Schutzfunktion eines Sicherheitsfensters [273]. **Tabelle 8-1** gibt einen Überblick über die derzeit in Sicherheitsfenstern trennender Schutzeinrichtungen für Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinen eingesetzten Einspannungsarten.

	Einspannungsart			
	Kleb- verbindung	Schraub- verbindung	Klemm- verbindung mit Profilgummi	Klemm- verbindung ohne Profilgummi
Drehmaschinen	27 %	20 %	13 %	40 %
Fräsmaschinen	16 %	6 %	6 %	72 %
Schleifmaschinen	22 %	30 %	13 %	35 %

**Tabelle 8-1:** Einspannungsarten für Sichtscheiben in Sicherheitsfenstern trennender Schutzeinrichtungen an Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinen [273]

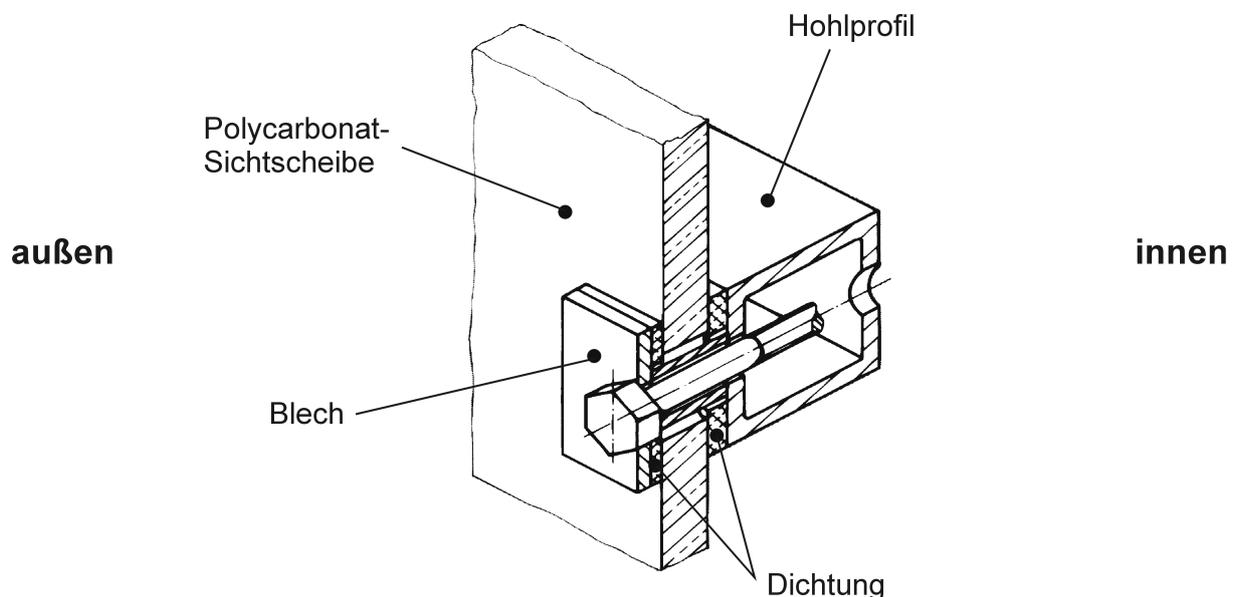
Die Befestigung von Sichtscheiben in Sichtfenstern trennender Schutzeinrichtungen erfolgt mittels Kleb-, Schraub- oder Klemmverbindungen. Am häufigsten wird sowohl in trennenden Schutzeinrichtungen an Dreh- und Fräsmaschinen sowie in trennenden Schutzeinrichtungen an Schleifmaschinen die Einspannungsart „Klemmverbindung ohne Profilgummi“ angewendet, **Bild 8-6**.



**Bild 8-6:** Klemmverbindung ohne Profilgummi [273]

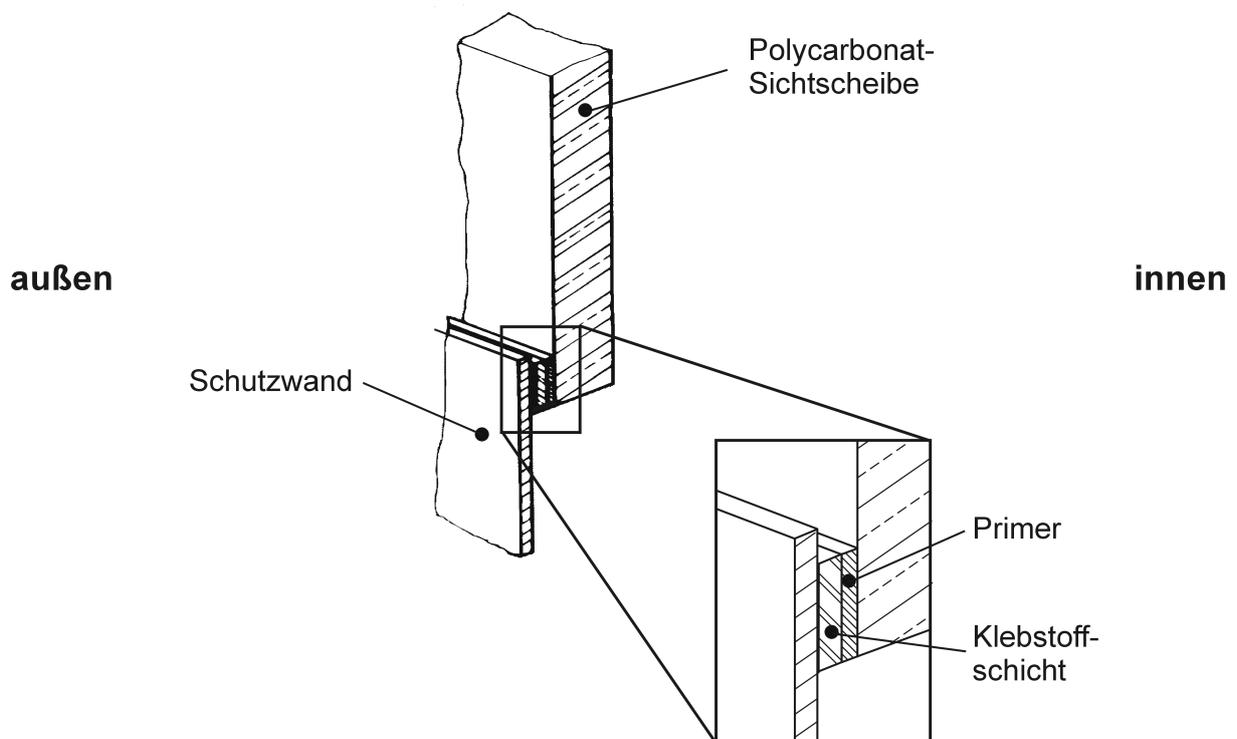
Polycarbonat-Sichtscheibe und Sicherheitsglas befinden sich in der in Bild 8-6 dargestellten Lösung durch ein Distanzstück getrennt in einem Fensterrahmen und werden über eine Klemmleiste in die Fensteröffnung der trennenden Schutzeinrichtung geklemmt. Aufgabe des Sicherheitsglases ist es dabei, die PC-Scheibe vor Kühlschmiermittel oder heißen Spänen zu schützen. Ein Eindringen von Kühlschmiermittel in die Klemmleiste wird durch eine umlaufende Dichtung verhindert.

Im Vergleich dazu zeigt **Bild 8-7** eine Möglichkeit, Polycarbonat-Sichtscheiben mittels einer Schraubverbindung zu befestigen. Auch hier verhindert die innenseitige Dichtung das Eindringen von Kühlschmiermittel. Ein ausreichendes Dehnungsspiel bei der Bohrlochdimensionierung unterbindet schädliche Materialspannungen infolge auftretender Längenänderungen des Scheibenmaterials durch Temperaturschwankungen und Feuchteeinwirkung.



**Bild 8-7:** Schraubverbindung [273]

Den Aufbau einer Klebverbindung stellt **Bild 8-8** dar. In der gezeigten Lösung wird die Polycarbonat-Sichtscheibe von innen gegen den Fensterausschnitt der Schutzeinrichtung geklebt. Zur Steigerung der Festigkeit der Klebverbindung wurden die Fügeflächen mit einem Primer vorbehandelt.



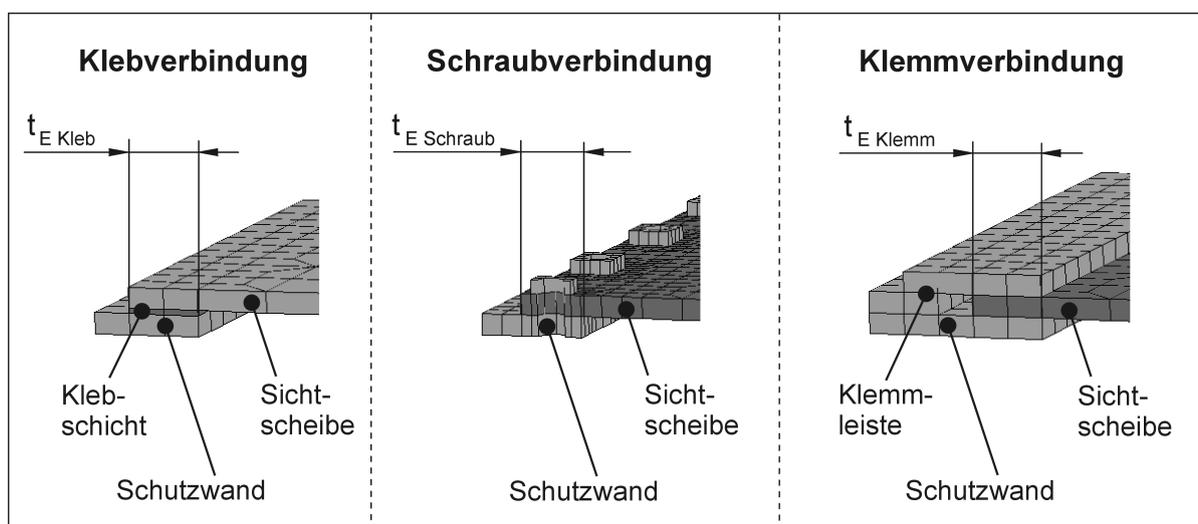
**Bild 8-8:** Klebverbindung [273]

Im Rahmen von Simulationsrechnungen galt es zu prüfen, welche Einspannungsart bei hochdynamischer Belastung das größtmögliche Rückhaltevermögen besitzt. Dazu ist das FE-Modell des Sichtfensters in den Randbereichen entsprechend der jeweiligen Einspannsituation modifiziert worden, **Bild 8-9**. Auf eine Modellierung der innenseitig angeordneten Sicherheitsglasscheibe wurde verzichtet, da deren Aufgabe ausschließlich der Schutz der Polycarbonat-Sichtscheibe vor Kühlschmiermittel ist und sie demzufolge keine Rückhaltewirkung besitzt.

Die Modellierung der Klebverbindung erfolgte durch das Einfügen einer 2 mm dicken Elementschicht zwischen Schutzwand und Polycarbonat-Sichtscheibe. Die Eigenschaften der Elementschicht entsprechen dabei denen eines von der Firma Röhm GmbH, Darmstadt, empfohlenen PUR-Klebstoffes [273]. Sämtliche in Kontakt mit der Klebschicht befindlichen Knoten der Schutzwand und der Polycarbonat-Sichtscheibe wurden an diese gefesselt. Ein Lösen der Klebung ist damit im Modell nicht möglich. Als Startwert für die Breite der Klebschicht, im folgenden als Einspanntiefe  $t_{E\text{ Kleb}}$  bezeichnet, wurde der Wert  $t_{E\text{ Kleb}} = 35\text{ mm}$  gewählt.

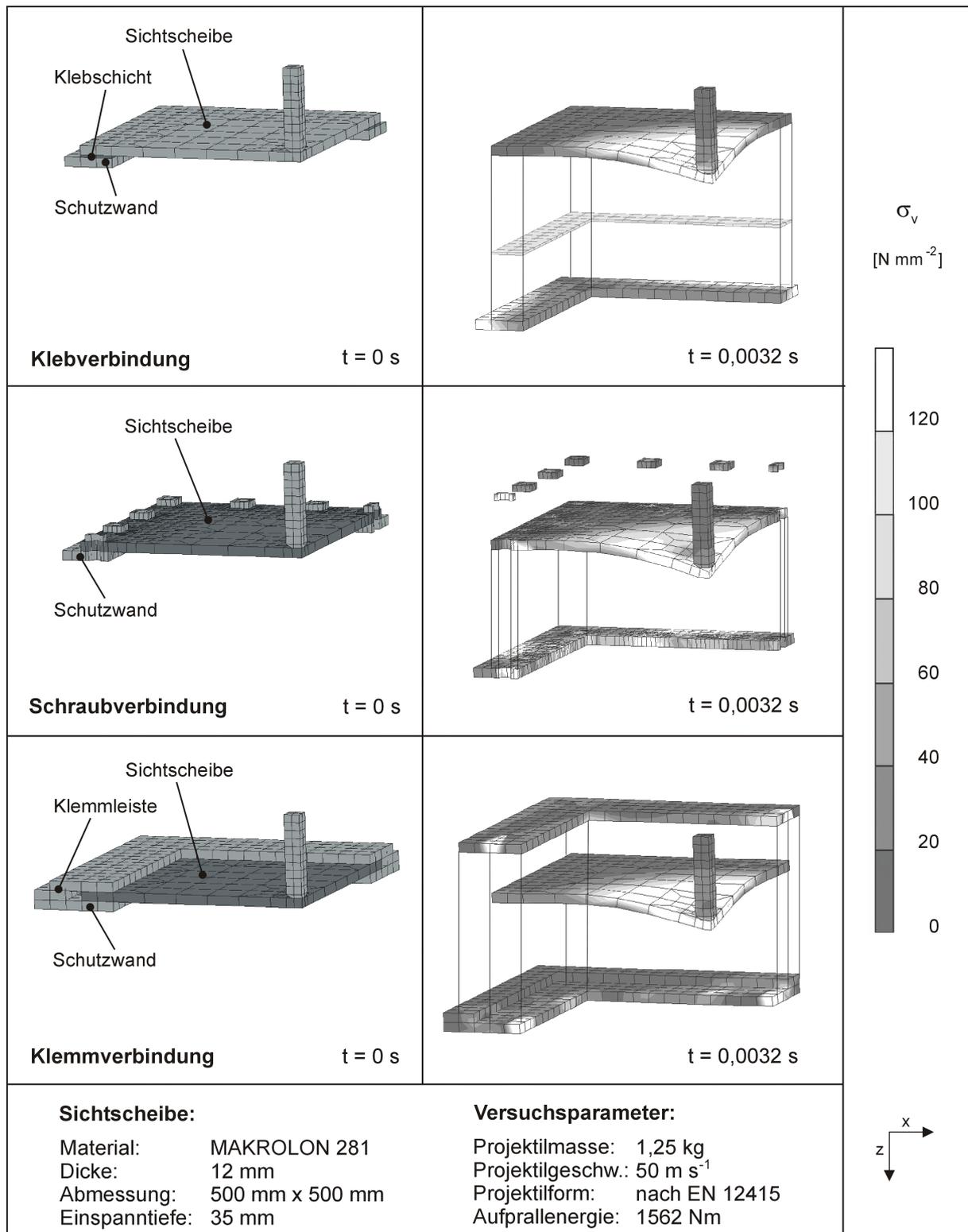
Im Modell des Sichtfensters mit Schraubverbindung ist die Sichtscheibe mittels 24 Sechskantschrauben DIN 933-M14-10.9 auf der Schutzwand fixiert worden. Die Eigenschaften der Befestigungsschrauben wurden durch sogenannte Aktuator-elemente nachgebildet. Unter Aktuatorelementen werden Stabelemente verstanden, die in Abhängigkeit von ihrer Länge Klemmkräfte erzeugen, die den unter realen Bedingungen auftretenden Kräften nahezu entsprechen. Im Bereich des Bohrloches ist die Netzstruktur des FE-Modells zur Steigerung der Aussagefähigkeit der FE-Berechnungen verfeinert worden.

Die Modellierung der Klemmverbindung erfolgte durch das Einklemmen der Polycarbonat-Sichtscheibe zwischen zwei einlagige Elementschichten, die einerseits die Schutzwand, andererseits die angeschweißte Klemmleiste repräsentieren. Dabei wurden sämtliche in Kontakt mit der Sichtscheibe befindlichen Knoten der Schutzwand und der Klemmleiste an diese gefesselt. Auch diesem Einspannungsmodell ist zunächst eine Einspanntiefe  $t_{E \text{ Klemm}} = 35 \text{ mm}$  zugrundegelegt worden.



**Bild 8-9:** Modelle der Einspannungsarten *Klebverbindung*, *Schraubverbindung* und *Klemmverbindung*

Die Beurteilung der Widerstandsfähigkeit der Einspannungsarten erfolgte bei einer Belastung entsprechend der Widerstandsklasse B1 nach EN 12415. Das Ergebnis der Simulationsrechnungen zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Stoßkraft  $F_{S_{\max}}$  ( $t = 0,0032 \text{ s}$ ) ist in **Bild 8-10 rechts** dargestellt. Zum Vergleich stellt **Bild 8-10 links** die Einspannungsmodelle im Ausgangszustand dar.



**Bild 8-10:** Ergebnisse der Simulationsrechnungen bei Variation der Sichtscheibeneinspannung (rechts); Ausgangszustand (links)

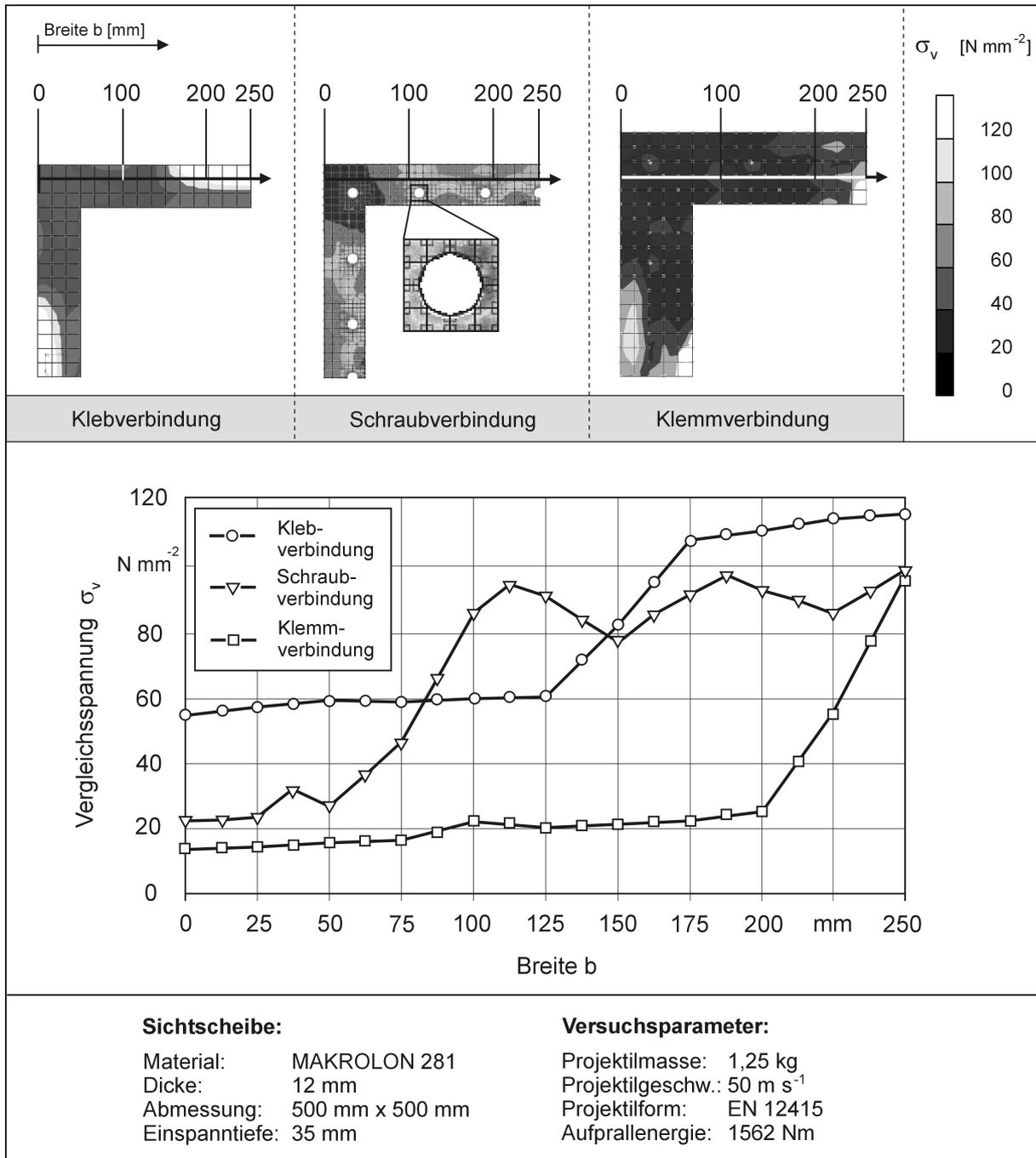
Sämtliche Einspannungsarten konnten der Aufprallbelastung von  $E_{kin} = 1562 \text{ Nm}$  widerstehen. Ein Materialversagen nach EN 12415 [256] hat nicht stattgefunden.

Neben der Sichtscheibenmitte war insbesondere die Schutzwand im Einspannbereich einer starken Beanspruchung ausgesetzt. Hier erreichten die VON MISES Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  Maximalwerte von 100 bis  $120 \text{ N mm}^{-2}$ . **Bild 8-11** verdeutlicht dieses Ergebnis und stellt für die einzelnen Einspannungsarten den Vergleichsspannungsverlauf in der Schutzwand an der Kante der Polycarbonat-Sichtscheibe dar.

Es zeigt sich, daß die auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES in der Schutzwand an der Kante der Polycarbonat-Sichtscheibe sowohl bei der Kleb- als auch bei der Schraubverbindung insgesamt ein höheres Niveau annehmen als bei der Klemmverbindung. Diese liegen um den Faktor 3 über den Werten der in der Klemmverbindung auftretenden Spannungen. Das bedeutet, daß die Stoßbelastung der Sichtscheibe durch die Klemmverbindung wesentlich besser aufgenommen bzw. abgebaut wird als durch die Schraub- bzw. Klebverbindung. Dies kann im wesentlichen auf die vorhandenen Bewegungsfreiräume der Sichtscheibe in der Klemmverbindung zurückgeführt werden. Ein Bewegen der Sichtscheibe unter Belastung ist dagegen sowohl in der Kleb- als auch in der Schraubverbindung nicht möglich.

Sämtlichen Kurven ist gemeinsam, daß die Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  zur Mitte der Schutzwand im Einspannbereich ( $b = 250 \text{ mm}$ ) ansteigen. Dieses kann bei quadratischen Probekörpern darauf zurückgeführt werden, daß die durch den Stoßvorgang ausgelösten und sich halbkreisförmig durch die Sichtscheibe ausbreitenden Stoßwellen zunächst in den mittleren Einspannbereichen und erst später, zum Teil in abgeschwächter Form, in den eckennahen Einspannbereichen ankommen.

Spannungserhöhungen treten zudem bei der Schraubverbindung in unmittelbarer Nähe der Bohrlöcher auf. Ursache dafür ist die durch die Bohrlöcher hervorgerufene Kerbwirkung im Material. Da außerdem einzelne Elemente im Umfeld der Bohrlöcher das Versagenskriterium überschreiten, besteht in diesen Bereichen die Gefahr der Anrißbildung.



**Bild 8-11:** Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES in der Schutzwand an der Kante der Polycarbonat-Sichtscheibe bei Variation der Art der Einspannung

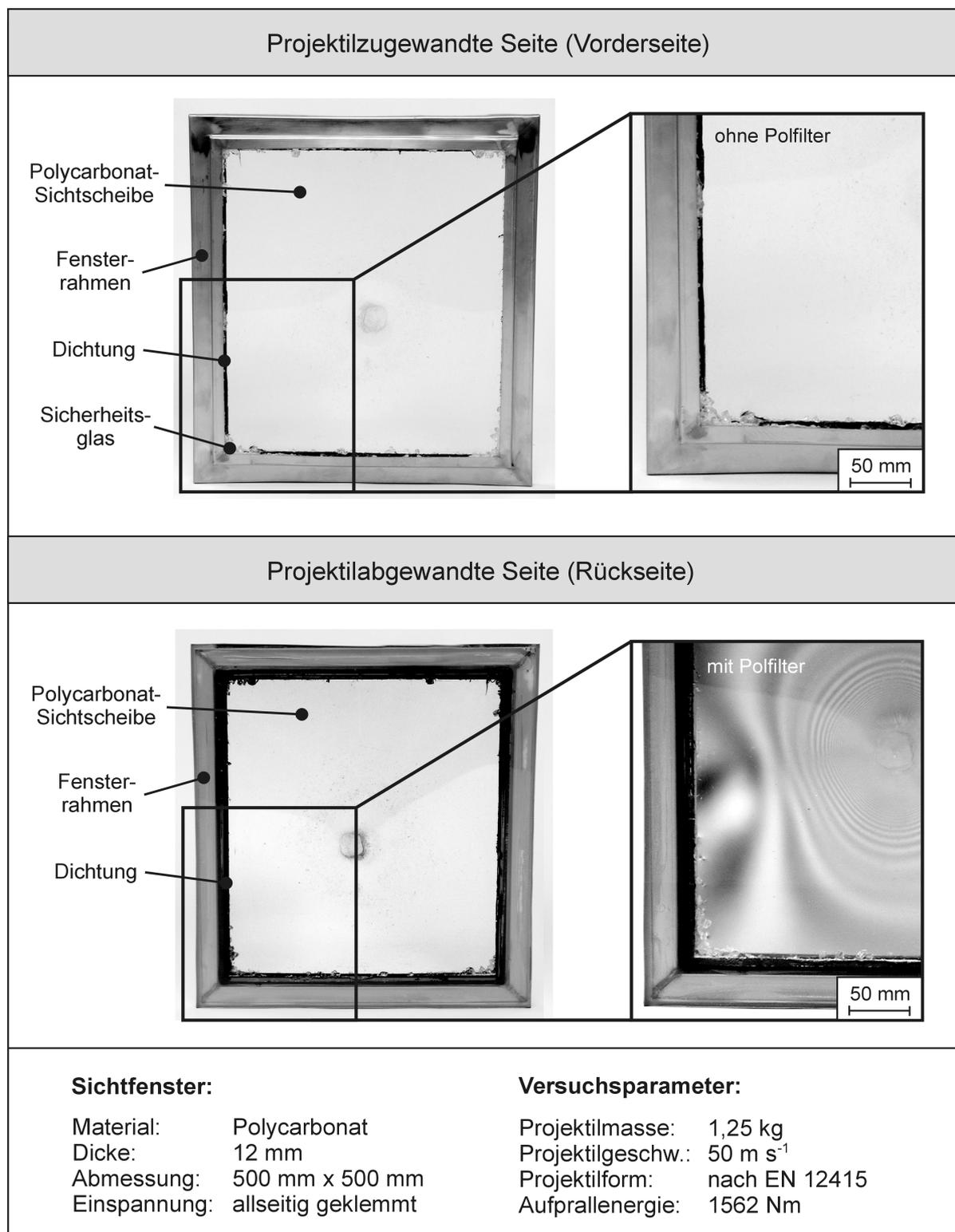
Die Ergebnisse der FE-Untersuchungen für die Widerstandsklasse B1 wurden tendenziell auch bei Belastungen entsprechend den Widerstandsklassen A1, A2, A3, B2, B3, C1 und C2 nach EN 12415 bestätigt. Demzufolge ist die Klemmverbindung zur Einspannung von Sichtscheiben in trennenden Schutzeinrichtungen am besten geeignet.

Die Verifizierung des Ergebnisses der FE-Untersuchungen auf eine Klemmverbindungslösung entsprechend Bild 8-6 durch eine experimentelle Beschußprüfung zeigt **Bild 8-12**. Oben dargestellt ist die projektilzugewandte Seite des Sichtfensters (Vorderseite), unten dargestellt die projektilabgewandte Seite (Rückseite).

Die Sichtscheibendicke  $d_{Sch}$  beträgt in diesem Beispiel 12 mm, die Sicherheitsglasdicke  $d_{GI} = 10$  mm und die Breite des Luftspalts zwischen Sichtscheibe und Sicherheitsglas  $b_L = 4$  mm [274]. Die Komponenten wurden in einem Fensterrahmen fixiert. Der Fensterrahmen ist in die Aufnahmevorrichtung der Beschußanlage geklemmt worden.

Auch bei der experimentellen Beschußprüfung zeigte sich, daß die Klemmverbindung der Aufprallbelastung von  $E_{kin} = 1562$  Nm standhält. Die Polycarbonat-Sichtscheibe wird am gesamten Umfang rückhaltesicher fixiert. Vereinzelt ist ein Ablösen von Dichtungsmaterial zu beobachten, jedoch ohne Einfluß auf die Rückhaltefähigkeit. Das Ergebnis der FE-Untersuchungen konnte somit bestätigt werden.

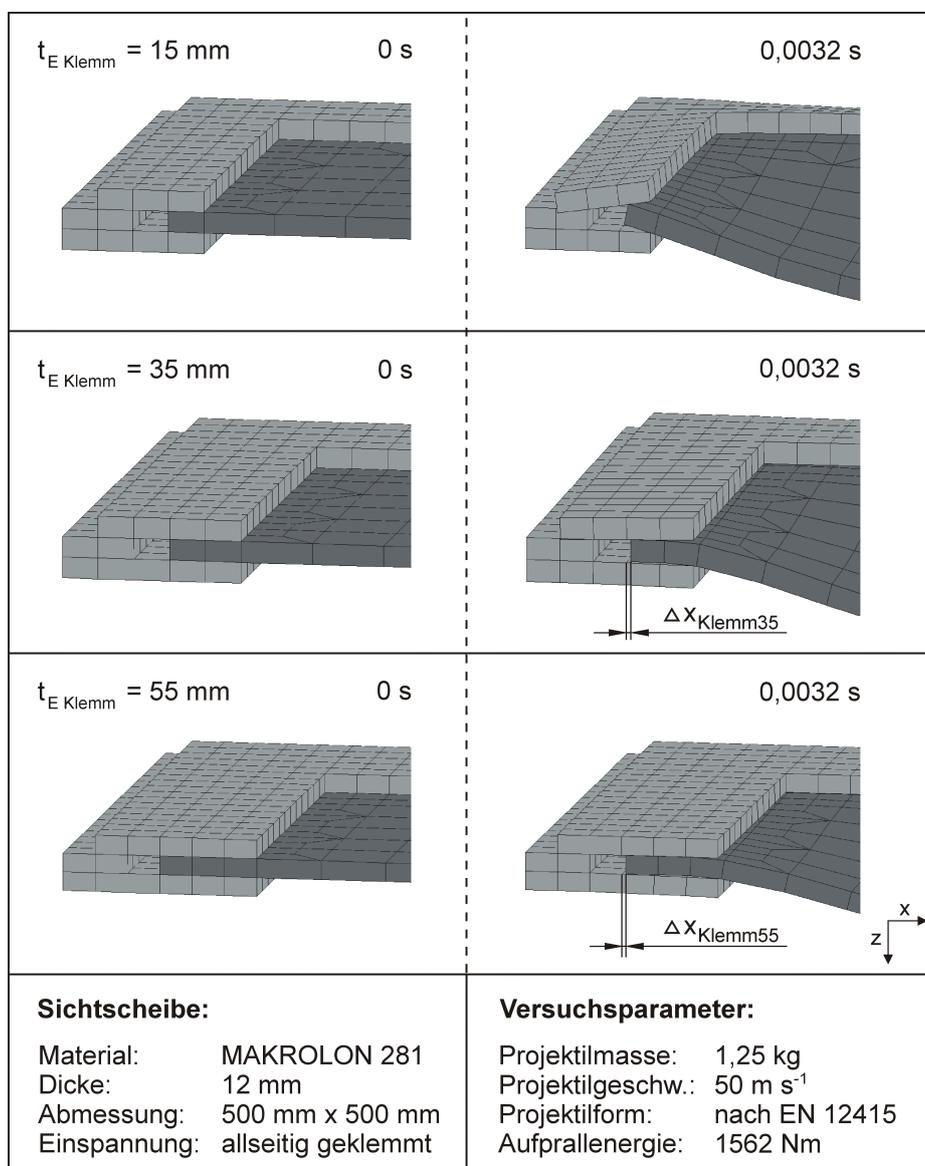
Darüber hinaus wird, wie zu erwarten war, das Sicherheitsglas beim Aufprall des Projektils komplett zerstört, Bild 8-12 oben. Sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite der Polycarbonat-Sichtscheibe ist die Einprägung der stumpfen Stirnfläche des Projektils zu erkennen. Anrisse im Projektilaufreffpunkt, die mit einem Materialversagen nach EN 12415 gleichbedeutend wären, konnten nicht festgestellt werden. Eine Polfilteraufnahme der Sichtfensterrückseite verdeutlicht die im Einspannbereich der Sichtscheibe verbleibenden Materialspannungen nach Beendigung des Stoßvorganges, Bild 8-12 unten rechts.



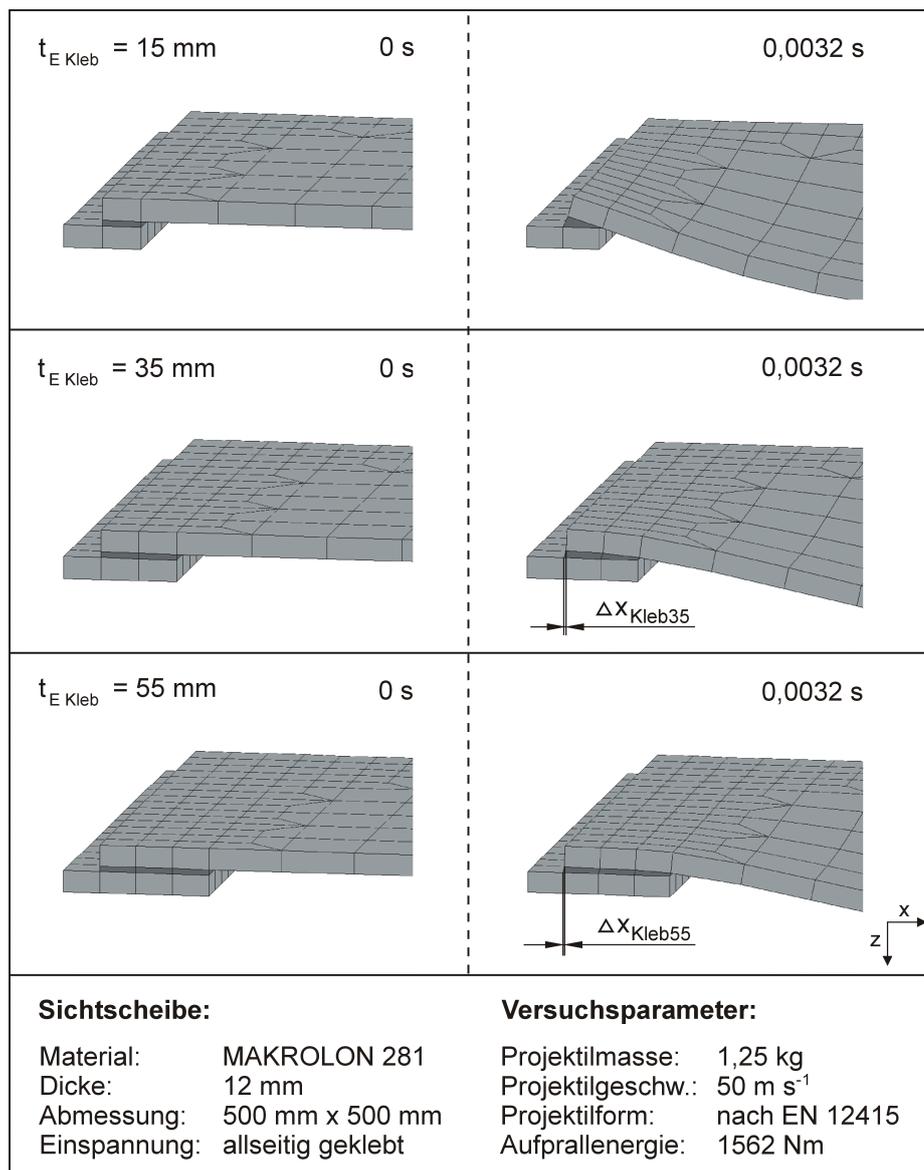
**Bild 8-12:** Ergebnisse experimenteller Aufpralluntersuchungen auf eine Klemmverbindungs-lösung [274] bei Belastungen entsprechend Widerstandsklasse B1 nach EN 12415

### 8.4.1.2 Einfluß der Einspanntiefe

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde unter Anwendung der FE-Methode der Einfluß der Einspanntiefe auf die Rückhaltefähigkeit einer Klemmverbindungs- und einer Klebverbindungs-lösung analysiert, **Bilder 8-13** und **8-14**. Dabei ist das Verhalten bei einer Einspanntiefe von  $t_E = 35$  mm mit dem Verhalten bei einer Einspanntiefe von  $t_E = 15$  mm bzw.  $t_E = 55$  mm verglichen worden. In beiden Fällen wurden die Einspannungen im unbelasteten Zustand ( $t = 0$  s) sowie zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Stoßkraft  $F_{Smax}$  ( $t = 0,0032$  s) betrachtet.



**Bild 8-13:** Verhalten der Klemmverbindungs-lösung bei Variation der Klemmtiefe  $t_{E \text{ Klemm}}$



**Bild 8-14:** Verhalten der Klebverbindungslösung bei Variation der Klebtiefe

$t_{E\text{Kleb}}$

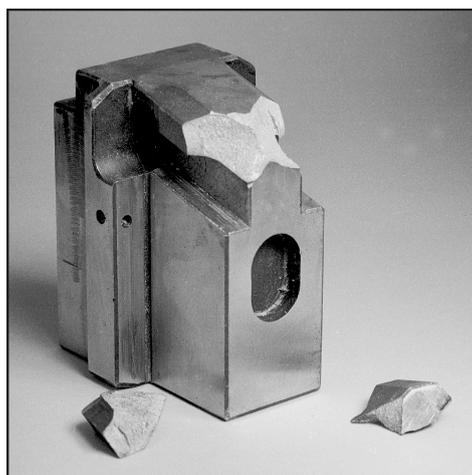
Sowohl bei der Klemm- als auch bei der Klebverbindungslösung reicht eine Einspanntiefe von  $t_E = 15\text{ mm}$  nicht aus, um die Polycarbonat-Sichtscheibe rückhaltefest an der Schutzwand zu fixieren. Beim Sichtfenster mit Klemmverbindung führte die kurzzeitige Stoßbelastung bei dieser Einspanntiefe zu einem Aufbiegen der Klemmleiste, Bild 8-13 oben rechts, beim Sichtfenster mit Klebverbindung zu einem Aufweiten und daraus resultierenden Versagen der Klebschicht, Bild 8-14 oben rechts. In beiden Fällen muß mit einem Herausschleudern der kompletten Scheibe gerechnet werden.

Ab einer Einspanntiefe von  $t_E = 35$  mm wird die PC-Scheibe sowohl bei der Klemm- als auch bei der Klebverbindungslösung rückhaltefest fixiert. Der Abbau der Stoßbelastung findet dabei durch ein Verschieben der Scheibe in Richtung des Projektilaufreffpunktes (x-Richtung) statt. Bei einer Klemmtiefe von  $t_{E\text{ Klemm}} = 35$  mm bewegt sich diese um  $\Delta x_{\text{Klemm}35} = 2,4$  mm zur Probenmitte hin, bei einer Klebtiefe von  $t_{E\text{ Kleb}} = 35$  mm um  $\Delta x_{\text{Kleb}35} = 1,5$  mm.

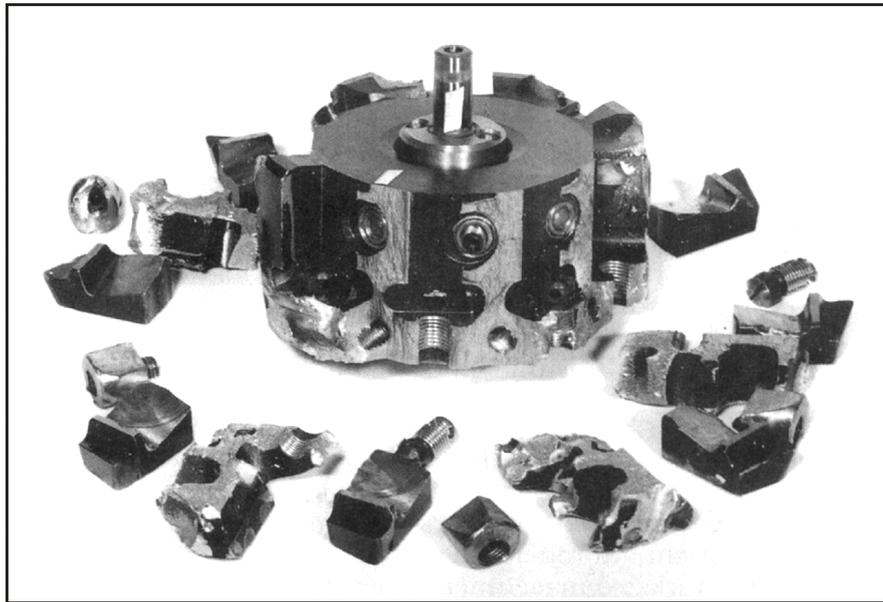
Mit zunehmender Einspanntiefe verringert sich auch die Bewegung der PC-Sichtscheibe in x-Richtung. Bei einer Klemmtiefe von  $t_{E\text{ Klemm}} = 55$  mm beträgt  $\Delta x_{\text{Klemm}55} = 2,3$  mm, bei einer Klebtiefe von  $t_{E\text{ Kleb}} = 55$  mm ergibt sich für  $\Delta x_{\text{Kleb}55}$  der Wert 1,1 mm. Nach Beendigung des Stoßvorganges bewegt sich die Sichtscheibe in beiden Einspannungsmodellen wieder in den Ausgangszustand zurück.

#### 8.4.1.3 Einfluß der Projektilform

Referenzkörper bei den nach EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] durchgeführten Beschußuntersuchungen sind zylindrische Geschosse mit stumpfer Stirnfläche, deren Aufprall zudem rechtwinklig zur Probekörperoberfläche zu erfolgen hat. Unter Zugrundelegung dieser Prüfbedingungen wird der Schadensfall „Abschleudern scharfkantiger Bruchstücke an Dreh- und Fräsmaschinen“ jedoch nur unzureichend reproduziert, da bei Spannmittel- oder Werkzeugbruch die Materialien trennender Schutzeinrichtungen mit scharfkantigen Elementen unterschiedlichster Geometrien beansprucht werden, **Bilder 8-15** und **8-16**.



**Bild 8-15:** Abgeschleuderte scharfkantige Bruchstücke einer Spannfuttergrundbacke [119]



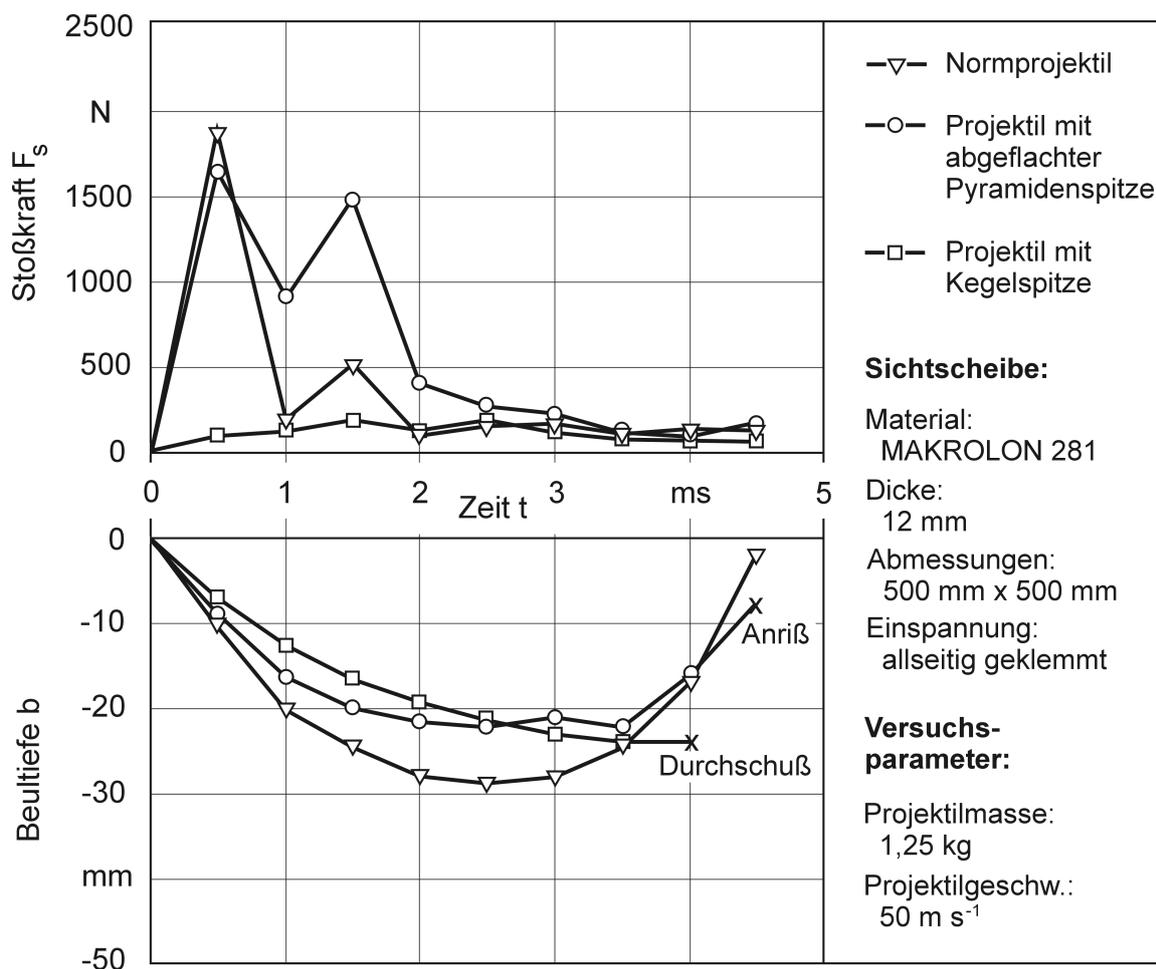
**Bild 8-16:** Abgeschleuderte scharfkantige Bruchstücke eines Hochgeschwindigkeitsfräswerkzeuges [201]

Zur Abbildung realer Schadensfälle an Werkzeugmaschinen wurden daher zwei neue Projekttilformen definiert, ein Projektil mit abgeflachter Pyramidenspitze nach SPUR et. al. [209, 220] und ein Projektil mit Kegelspitze. Beide zeichnen sich durch eine scharfkantige Auftrefffläche aus, wobei insbesondere das kegelige Projektil den Worst-Case-Beanspruchungsfall von Materialien trennender Schutzeinrichtungen abbilden soll.

Das Verhalten des Sichtscheibenmaterials beim Aufprall der neu definierten Projekttilgeometrien wurde mit dem Verhalten beim Aufprall eines Normprojektils gleicher Masse verglichen. Neben der Darstellung des Stoßkraft- und Beultiefeverlaufes sowie der im Material auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES war es Ziel der Untersuchungen, für die einzelnen Beanspruchungsfälle die kritische Aufprallenergie  $E_{krit}$ , d. h. die Energie, bei der erstmals ein Materialversagen nach EN 12415 auftritt, zu ermitteln.

**Bild 8-17** stellt zunächst den zeitlichen Verlauf von Stoßkraft  $F_S$  und Beultiefe  $b$  im Projektilaufreffpunkt bei Variation der Projekttilform dar. Den Stoßkraftverläufen beim Aufprall des Normprojektils und des Projektils mit abgeflachter Pyramidenspitze ist gemeinsam, daß diese nach 0,5 ms ihr Maximum erreichen. Während die Kurve des Normprojektils daraufhin steil abfällt, erreicht die Kurve des Projektils mit abgeflach-

ter Pyramidenspitze nach 1,5 ms einen zweiten Maximalwert. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß sich zu diesem Zeitpunkt erstmals die gesamte Stirnfläche des Pyramidenprojektils in Kontakt mit dem Probekörper befindet. Die höchste Stoßkraft wird beim Aufprall des Normprojektils erzielt und beträgt  $F_{Smax} = 1821$  N. Beim Aufprall des Projektils mit abgeflachter Pyramidenspitze ist  $F_{Smax}$  um 8 % geringer.



**Bild 8-17:** Stoßkraft- und Beultiefeverlauf bei Variation der Form der Projektilspitze

Der Kurvenverlauf der Stoßkraft beim Aufprall des kegeligen Projektils zeichnet sich durch ein gleichbleibend niedriges Niveau zwischen  $F_s = 88$  N und  $F_s = 207$  N aus. Ein ausgeprägtes Stoßkraftmaximum ist bei diesem Belastungsfall nicht zu erkennen. Das Projektil durchdringt den Probekörper, ohne daß ihm durch das Sichtscheibenmaterial ein nennenswerter Widerstand entgegengesetzt wird.

Auch die Materialverformung bzw. Ausbildung der Beultiefe  $b$  wird maßgeblich von der Form der Projektilspitze beeinflusst. Je stumpfer die Projektilspitze, desto größer ist die Stoßkraft  $F_S$  und die durch diese hervorgerufene maximale Beultiefe  $b_{\max}$ , desto kleiner ist allerdings auch die nach Beendigung des Stoßvorganges verbleibende Beultiefe  $b_{\text{bleib}}$ . So beträgt die maximale Beultiefe  $b_{\max}$  bei der Aufprallprüfung mit dem Pyramidenprojektil 22,3 mm, die bleibende Beultiefe  $b_{\text{bleib}}$  nach Beendigung des Stoßvorganges 8,6 mm. Im Gegensatz dazu ist die maximale Beultiefe  $b_{\max}$  bei der Prüfung mit dem Normprojektil um 29 % größer ( $b_{\max} = 28,7$  mm), die bleibende Beultiefe  $b_{\text{bleib}}$  verringert sich jedoch im Vergleich zum Aufprall des Pyramidenprojektils um 72 % auf  $b_{\text{bleib}} = 2,4$  mm.

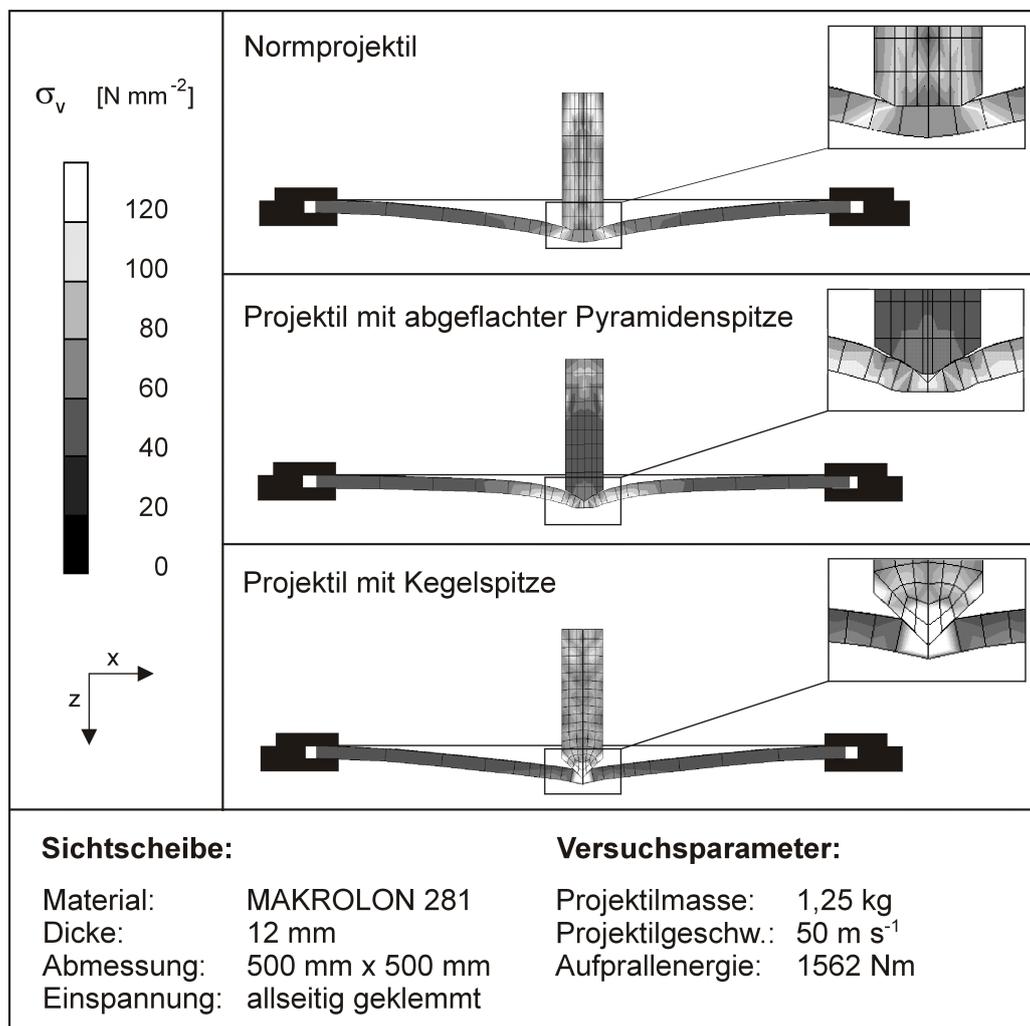
Auffällig ist darüber hinaus, daß die maximale Beultiefe in beiden Untersuchungen zum Zeitpunkt  $t = 2,5$  ms erreicht wird, das heißt ca. 2 ms nach Auftreten der maximalen Stoßkraft  $F_{S\max}$ . Zudem konnte bei der Aufprallsimulation mit dem Pyramidenprojektil eine Rißbildung im Kontaktbereich festgestellt werden.

Die Prüfung mit dem kegeligen Projektil führte zu einem vollständigen Durchdringen der Probe nach einer Stoßzeit von  $t = 4,0$  ms. Zuvor wurde das Material bis zu einer Beultiefe von  $b = 24$  mm gedehnt.

**Bild 8-18** stellt die durch den Aufprall der Projektile im Material hervorgerufenen Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES zum Zeitpunkt der maximalen Beulung dar. Die höchsten Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  treten demnach beim Aufprall des Normprojektils im Bereich der Kanten der Stirnfläche, beim Aufprall des Projektils mit abgeflachter Pyramidenspitze im gesamten Kontaktbereich zwischen Projektilstirnfläche und Probekörper auf. Ein Überschreiten des Versagenskriteriums von Elementen im Sichtscheibenmaterial konnte allerdings zu diesem Zeitpunkt in keinem der beiden Beanspruchungsfälle festgestellt werden.

Im Gegensatz dazu haben bei der Aufprallsimulation mit dem kegeligen Projektil zum Zeitpunkt der maximalen Beulung sowohl Elemente im Sichtscheibenmaterial als auch in der Projektilspitze das Versagenskriterium überschritten. Ein Überschreiten des Versagenskriteriums bedingt gleichzeitig ein Löschen dieser Elemente im nächsten FE-Berechnungsschritt. Neben der Abflachung der kegeligen Projektilspitze führt dies zu einer Schwächung der Polycarbonatscheibe im Bereich des Projektilaufreffpunktes. Aufgrund der dadurch hervorgerufenen verminderten Widerstandsfähig-

keit des Materials wird der Probekörper im weiteren Verlauf der Stoßbelastung vollständig durchdrungen.

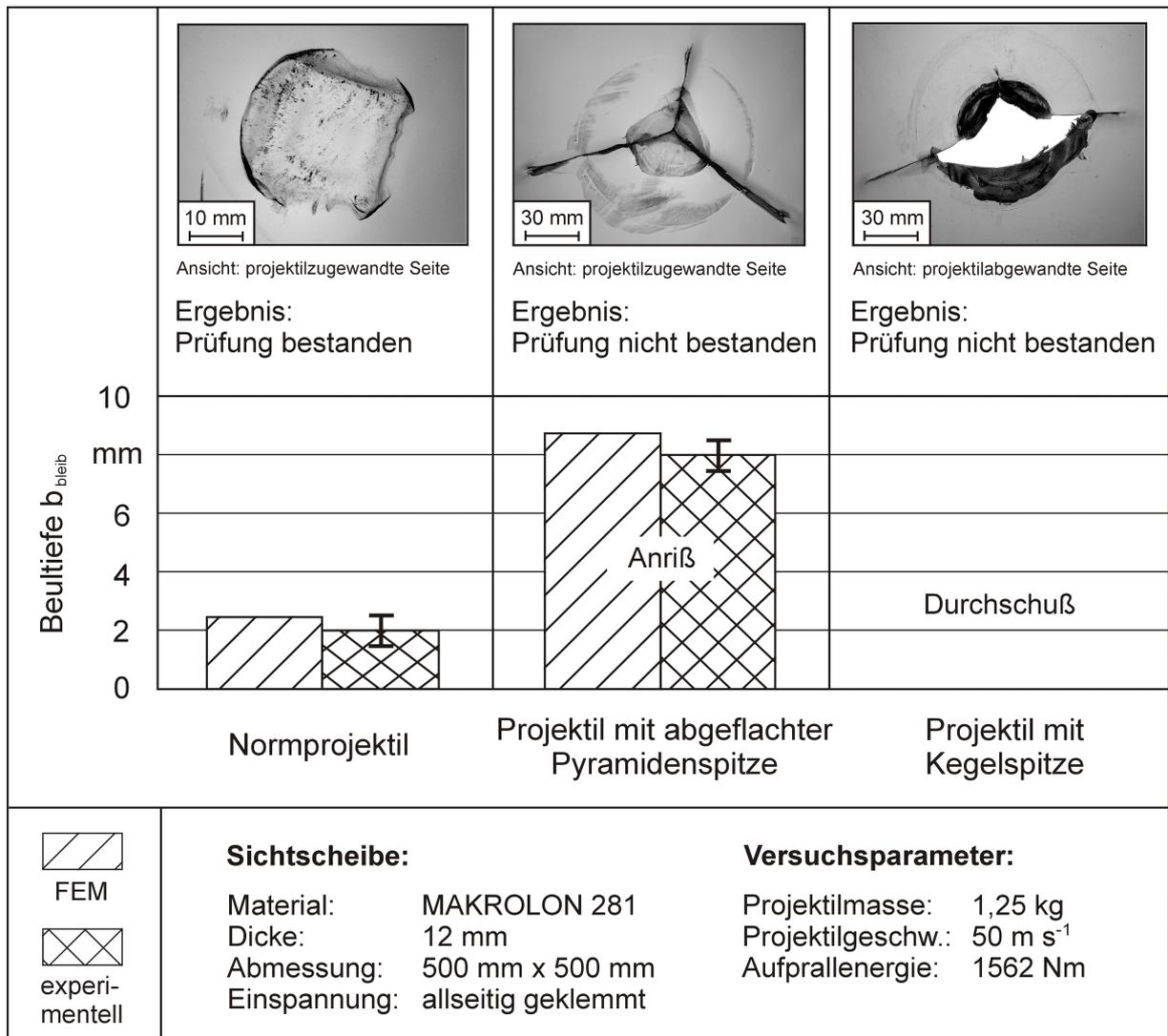


**Bild 8-18:** VON MISES Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  bei Variation der Form der Projektilspitze

Während das Versagenskriterium von Elementen des Sichtscheibenmaterials beim Aufprall des Normprojektils auch im weiteren Verlauf der Stoßbeanspruchung nicht überschritten wird, treten erste sicherheitsrelevante Schädigungen des Sichtscheibenmaterials beim Aufprall des Projektils mit abgeflachter Pyramidenspitze zum Zeitpunkt  $t = 3,0$  ms auf. Ein Löschen der Elemente, die das Versagenskriterium überschritten haben, verursacht auch hier erste Materialschwächungen (Rißbildungen), die im weiteren Verlauf der Stoßbeanspruchung zu einem Versagen nach EN 12415 führten.

Wird das Ergebnis der Aufprallsimulation bei Variation der Projekttilform auf die kritische Aufprallenergie  $E_{krit}$ , d. h. die Energie, bei der erstmals ein Materialversagen nach EN 12415 auftritt, bezogen, so ist diese bei der Simulation mit dem Pyramidenprojekttil um 16 % und bei der Simulation mit dem kegeligen Projekttil um 29 % geringer als bei der Beschußsimulation mit dem Normprojekttil entsprechend Widerstandsklasse B1 nach prEN 12415.

Die Ergebnisse der Aufprallsimulationen wurden durch experimentelle Beschußuntersuchungen bestätigt. **Bild 8-19** stellt den Zustand des Sichtscheibenmaterials nach Beendigung der einzelnen Stoßvorgänge dar.

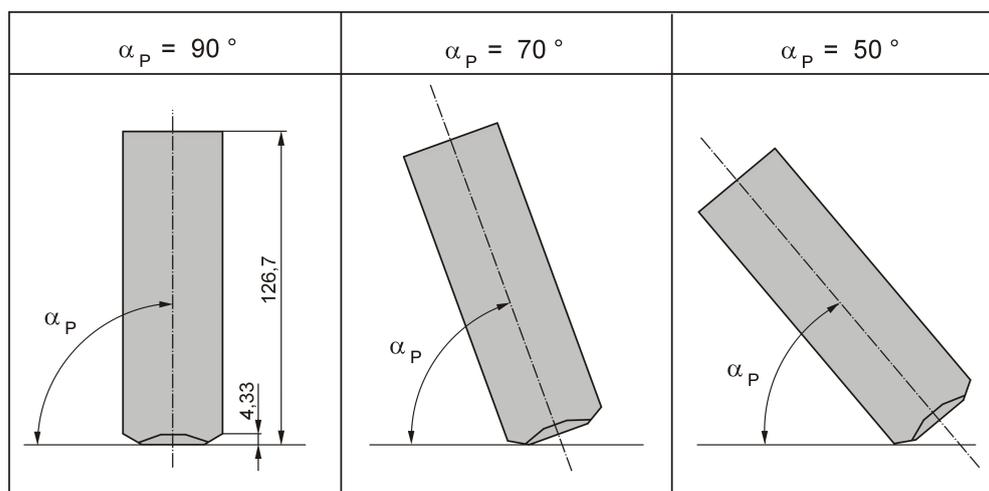


**Bild 8-19:** Ergebnisse experimenteller Aufpralluntersuchungen bei Variation der Form der Projekttilspitze und Vergleich mit FE-Simulationsergebnissen

In Bild 8-19 links ist deutlich die in das Sichtscheibenmaterial eingeprägte stumpfe Stirnfläche des Normprojektils zu erkennen. Bild 8-19 Mitte zeigt die durch das Projektil mit abgeflachter Pyramidenspitze hervorgerufene Anrißbildung im Sichtscheibenmaterial, Bild 8-19 rechts veranschaulicht den Zustand des Sichtscheibenmaterials nach Durchdringen des kegeligen Projektils. Die Abweichungen von Simulations- und experimentellen Ergebnissen betragen in diesem Beispiel lediglich 3 bis 10 %.

#### 8.4.1.4 Einfluß des Projektilaufreffwinkels

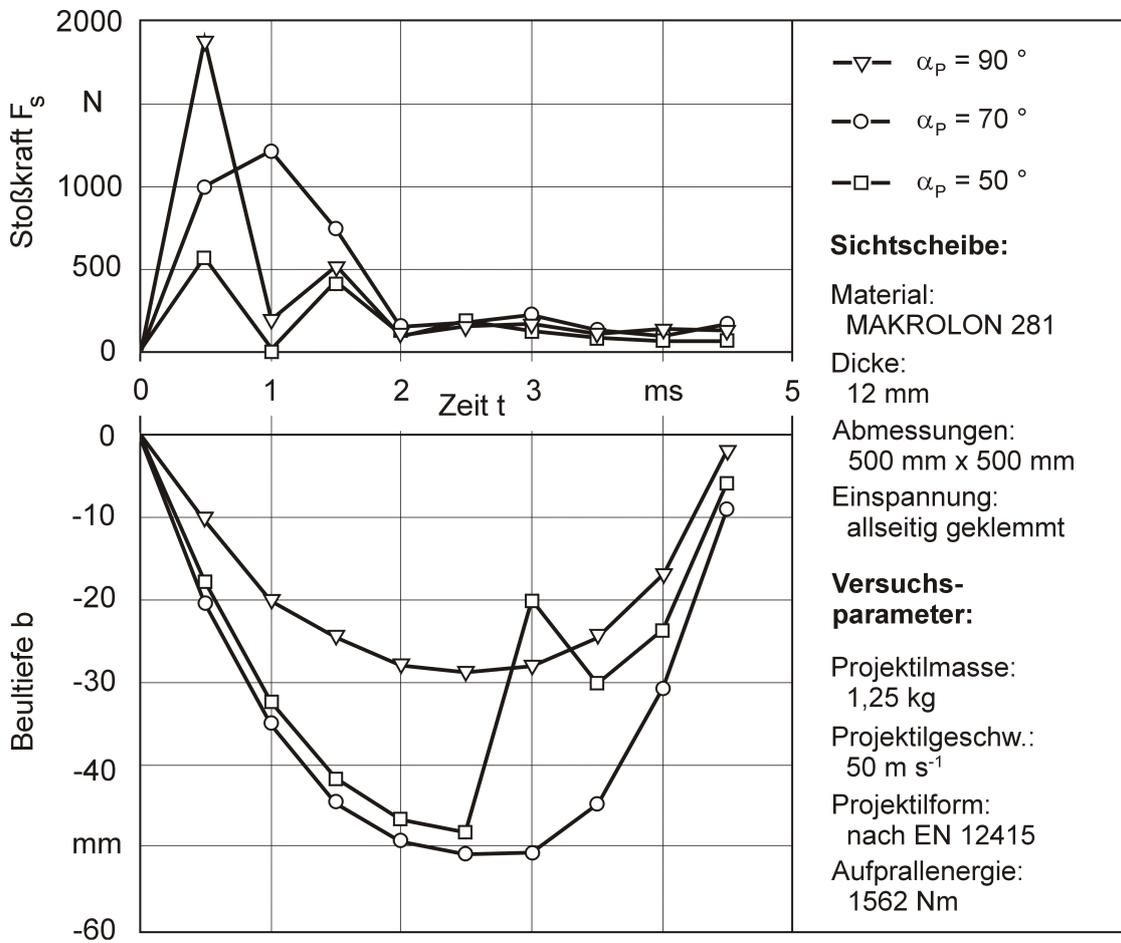
Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Pyramidenprojektil und dem Projektil mit Kegelspitze wurden im weiteren Verlauf Aufprallsimulationen gegenübergestellt, bei denen das Sichtscheibenmaterial mit einem geneigten Normprojektil beaufschlagt wurde, **Bild 8-20**. Ziel war es, eine Korrelation zwischen den durch die neu definierten Projektilformen im Material hervorgerufenen Belastungen und den Belastungen beim Aufprall eines Normprojektils unter einem Winkel  $\alpha_P$  herzustellen. Neben einem dem rechtwinkligen Aufprall des Projektils entsprechenden Winkel von  $\alpha_P = 90^\circ$  wurden den Simulationsrechnungen Auftreffwinkel von  $\alpha_P = 50^\circ$  und  $\alpha_P = 70^\circ$  zugrundegelegt.



**Bild 8-20:** Gewählte Aufprallwinkel des Normprojektils

Den zeitlichen Verlauf der Stoßkraft  $F_S$  sowie der berechneten Beultiefe  $b$  bei Variation des Projektilaufreffwinkels stellt **Bild 8-21** dar. Die höchste Stoßkraft tritt beim Aufprall des Normprojektils rechtwinklig zur Probenoberfläche auf und beträgt  $F_{S_{\max}} = 1821 \text{ N}$ . Beim Kontakt des Normprojektils unter einem Winkel von  $\alpha_P = 70^\circ$

reduziert sich das Stoßkraftmaximum um 32 % auf  $F_{Smax} = 1236$  N, beim Aufprall des Normprojektils unter einem Winkel von  $\alpha_p = 50^\circ$  um 69 % auf  $F_{Smax} = 548$  N. Beim  $50^\circ$ -Aufprall verliert das Projektil zwischenzeitlich den Kontakt mit der Probekörperoberfläche. Dadurch fällt die Stoßkraft nach  $t = 1$  ms auf den Wert  $F_S = 0$  ab. Unmittelbar danach tritt wieder Kontakt mit der Probekörperoberfläche ein, welches sich durch einen Anstieg der Stoßkraft auf einen zweiten Maximalwert von  $F_{Smax} = 472$  N nach 1,5 ms äußert.

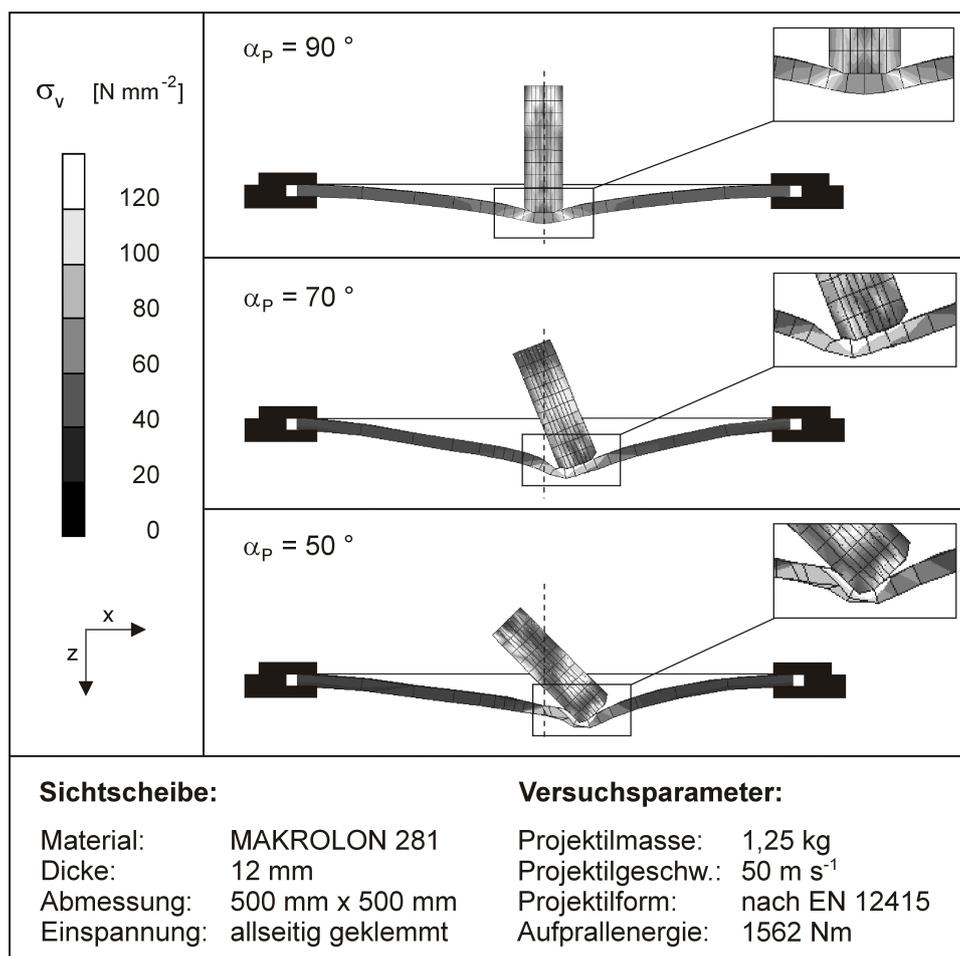


**Bild 8-21:** Stoßkraft- und Beultiefeverlauf bei Variation des Projektilaufreffwinkels

Auch beim geneigten Projektilaufprall werden die Maxima der Beultiefe  $b_{max}$  ca. 2 ms nach Auftreten der maximalen Stoßkraft  $F_{Smax}$  erreicht. Auffällig bei Betrachtung der einzelnen Beultiefeverläufe ist insbesondere der durch den zwischenzeitlichen Kontaktverlust des Normprojektils beim  $50^\circ$ -Aufprall hervorgerufene Rückgang der Materialverformung von  $b_{max} = 48,2$  mm auf  $b_{max} = 20,3$  mm zum Zeitpunkt  $t = 3$  ms.

Wie zu erwarten war, vergrößert sich bei geneigtem Projektilaufprall auch die nach Beendigung des Stoßvorganges verbleibende tatsächliche Beulung  $b_{\text{bleib}}$ . Ursache hierfür ist der Kontakt von ausschließlich scharfkantigen Flächen des Normprojektils mit dem Probekörper. Während die bleibende Beulung  $b_{\text{bleib}}$  beim Aufprall des Normprojektils rechtwinklig zur Oberfläche 2,4 mm beträgt, erhöht sich diese beim Aufprall des Projektils unter einem Winkel von  $50^\circ$  um 179 % auf  $b_{\text{bleib}} = 6,7$  mm, beim Aufprall des Projektils unter einem Winkel von  $70^\circ$  um 296 % auf  $b_{\text{bleib}} = 9,5$  mm.

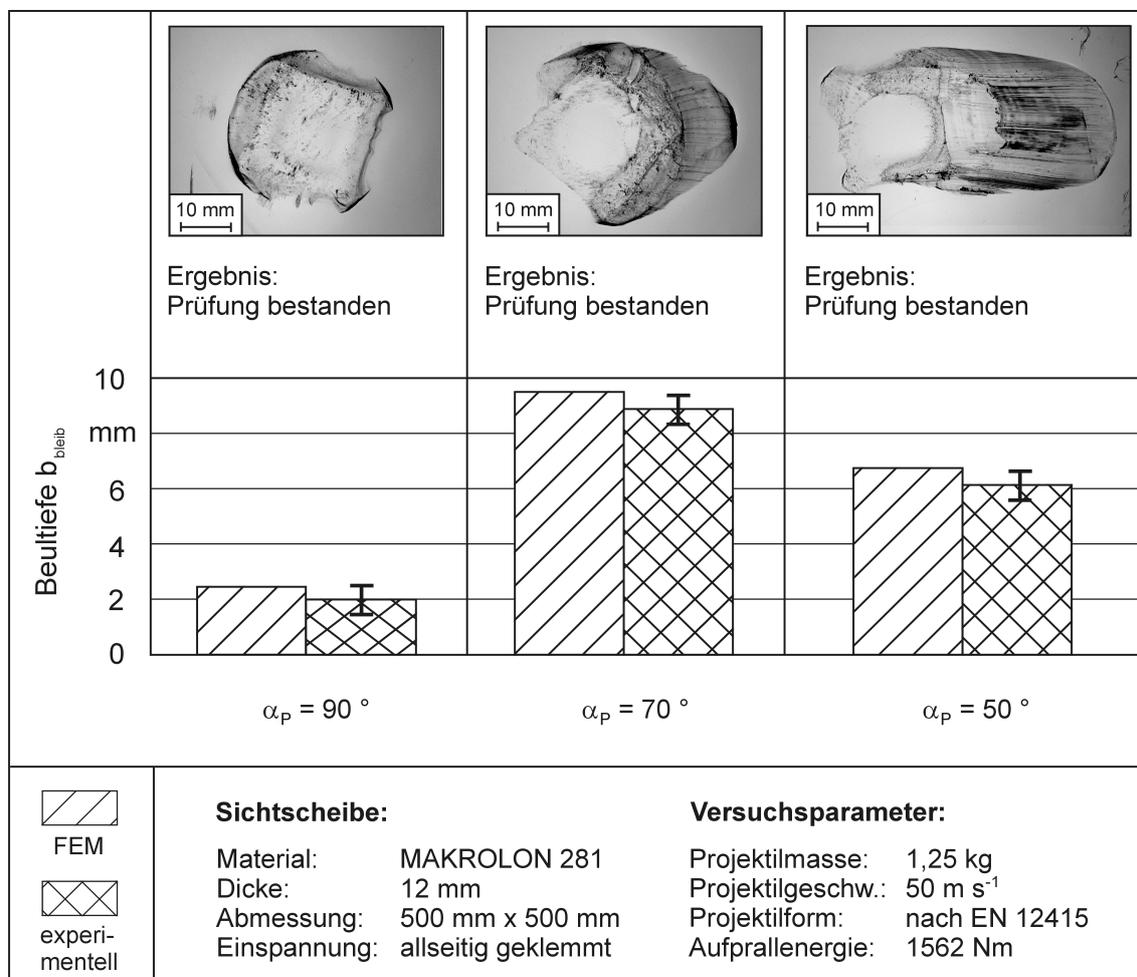
Die während des Stoßes im Material hervorgerufenen Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES zum Zeitpunkt der maximalen Beulung stellt **Bild 8-22** dar.



**Bild 8-22:** VON MISES Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  bei Variation des Projektilaufreffwinkels

Während die höchsten Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  im Sichtscheibenmaterial beim rechtwinkligen Aufprall des Normprojektils im Bereich der Kanten der Stirnfläche auf-

treten, sind die Maxima der Vergleichsspannung sowohl beim 70 °- als auch beim 50 °- Aufprall im gesamten Kontaktbereich zwischen Projektil und Sichtscheibenmaterial zu erkennen. Ein Überschreiten des Materialversagenskriteriums konnte jedoch in keinem der Belastungsfälle festgestellt werden. Demzufolge werden in allen Untersuchungen die Prüfbedingungen nach Widerstandsklasse B1 entsprechend EN 12415 erfüllt. Die Ergebnisse der FE-Simulationsrechnungen wurden auch im Rahmen experimenteller Beschußuntersuchungen bestätigt, **Bild 8-23**.



**Bild 8-23:** Ergebnisse experimenteller Aufpralluntersuchungen bei Variation des Projektilaufreffwinkels und Vergleich mit FE-Simulationsergebnissen

Bild 8-23 links stellt die in das Sichtscheibenmaterial eingeprägte stumpfe Stirnfläche des Normprojektils beim 90 °-Aufprall dar, Bild 8-23 Mitte und Bild 8-23 rechts verdeutlichen die aus der Gleitbewegung des Projektils beim 70 °- bzw. 50 °-Aufprall resultierende Beschädigung der Sichtscheibenoberfläche. Die Abweichungen von

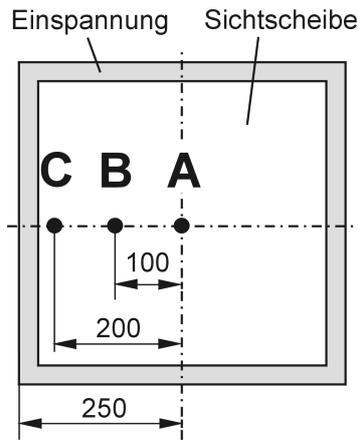
Simulations- und experimentellen Ergebnissen liegen in diesen Untersuchungen zwischen 4 und 9 %.

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse bei Variation des Projektilaufreffwinkels und bei Variation der Projektilspitze zeigt, daß die bleibende Beultiefe  $b_{\text{bleib}}$  bei der Beanspruchung mit dem Normprojektil unter einem Auftreffwinkel von  $\alpha_P = 70^\circ$  und bei der Beanspruchung durch das senkrecht zur Probenoberfläche auftreffende Projektil mit abgeflachter Pyramidenspitze ähnliche Werte annimmt. Daraus wird gefolgert, daß die Belastungen, die durch das neu definierte Pyramidenprojektil erzeugt werden, in etwa den durch das Normprojektil unter einem Auftreffwinkel von  $\alpha_P = 70^\circ$  hervorgerufenen Belastungen entsprechen.

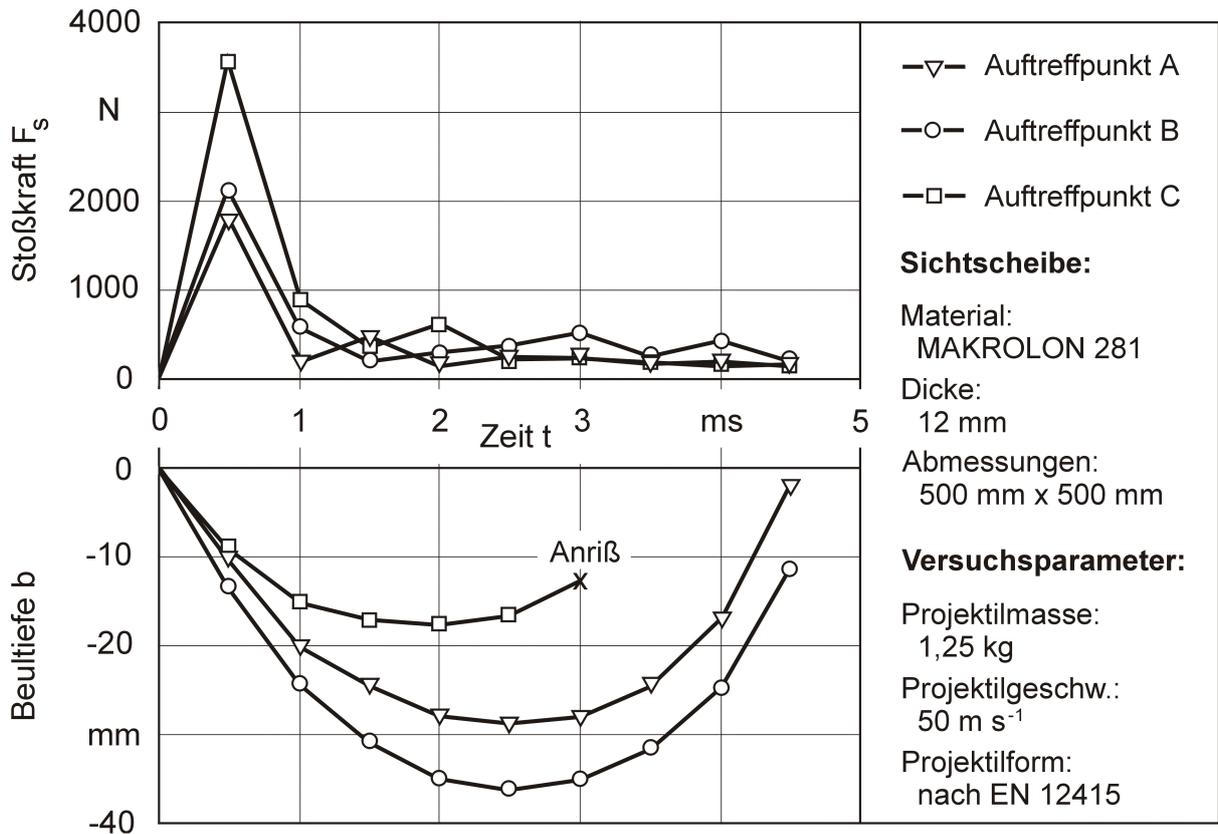
Für Prüfungen, deren Durchführung angelehnt an die Prüfbedingungen der Europäischen Norm EN 12415 erfolgt, wird daher vorgeschlagen, das Normprojektil unter einem Winkel  $\alpha_P = 70^\circ$  auftreffen zu lassen. Wie Untersuchungen zeigten, entspricht das Ergebnis in etwa den Resultaten beim Aufprall des realen Schadensfälle an Werkzeugmaschinen abbildenden scharfkantigen Pyramidenprojektils. Worst-Case-Beanspruchungen der Materialien sind allerdings nur mit dem kegeligen Projektil erzielbar.

#### 8.4.1.5 Einfluß des Projektilaufreffpunktes

Als Projektilaufreffpunkt werden in EN 12415 [256] bzw. prEN 12417 [257] die schwächsten und ungünstigsten Stellen auf der Werkstoffprobe definiert. Bisherige Dimensionierungsempfehlungen für Komponenten trennender Schutzeinrichtungen basieren auf Aufpralluntersuchungen, bei denen das Material ausschließlich in der Probenmitte stoßartig beansprucht wurde [211]. Zur Beurteilung des Einflusses des Projektilaufreffpunktes auf das Rückhaltevermögen des Sichtscheibenmaterials MAKROLON 281 sind neben der Probenmitte (Aufreffpunkt A) zwei weitere Aufreffpunkte B und C in randnahen Bereichen der Werkstoffprobe definiert und mit einem Normprojektil der Masse  $m_P = 1,25 \text{ kg}$  bei einer Projektilgeschwindigkeit von  $v_P = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  stoßartig beansprucht worden, **Bild 8-24**. Den zeitlichen Verlauf der auftretenden Stoßkraft  $F_S$  sowie der im Aufreffpunkt gemessenen Beultiefe  $b$  stellt **Bild 8-25** dar.



**Bild 8-24:** Lage der gewählten Projektilauftreffpunkte

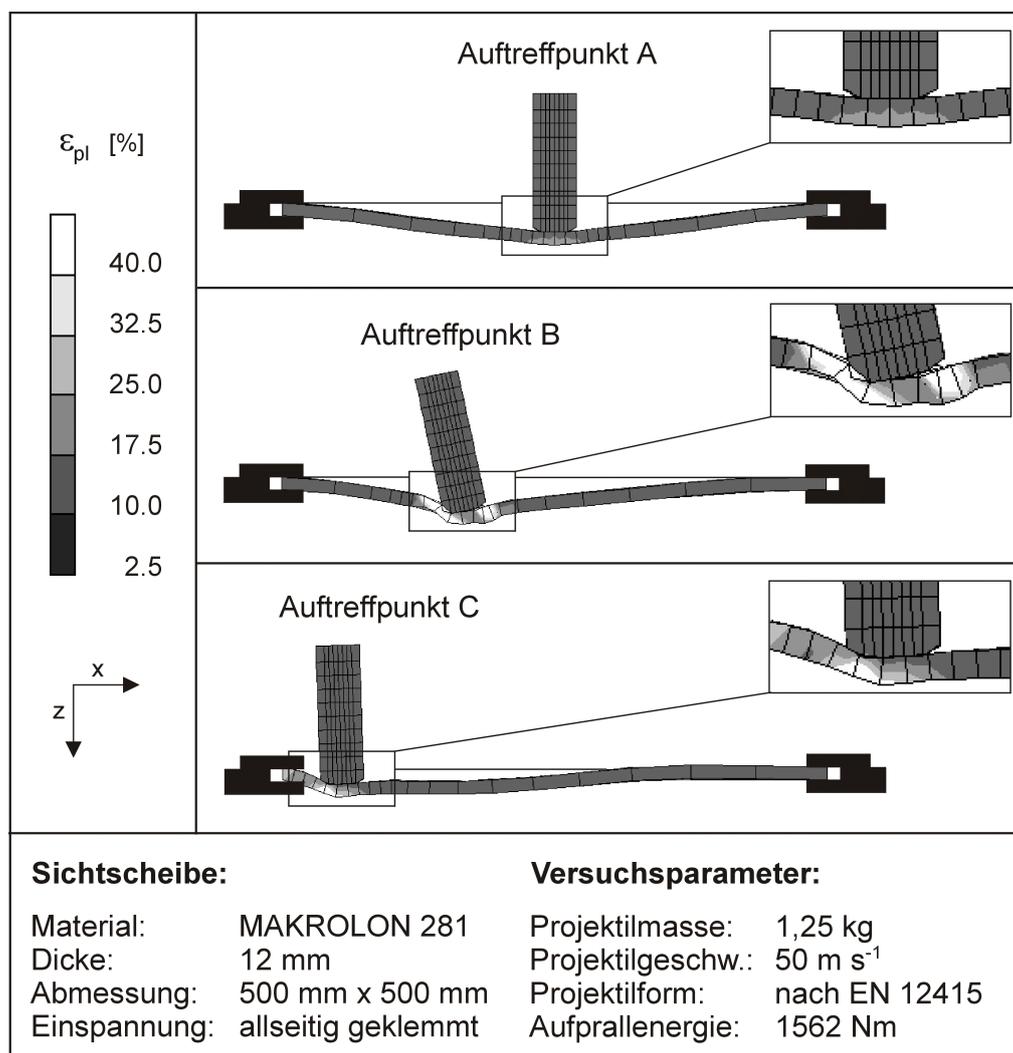


**Bild 8-25:** Stoßkraft- und Beultiefeverlauf bei Variation des Projektilauftreffpunktes

Die höchsten Stoßkräfte treten beim Aufprall des Normprojektils in den Auftreffpunkten B und C auf und betragen  $F_{Smax} = 2085 \text{ N}$  (Auftrittspunkt B) und  $F_{Smax} = 3612 \text{ N}$  (Auftrittspunkt C). Ursache dafür sind die im Vergleich zur Probenmitte geringeren

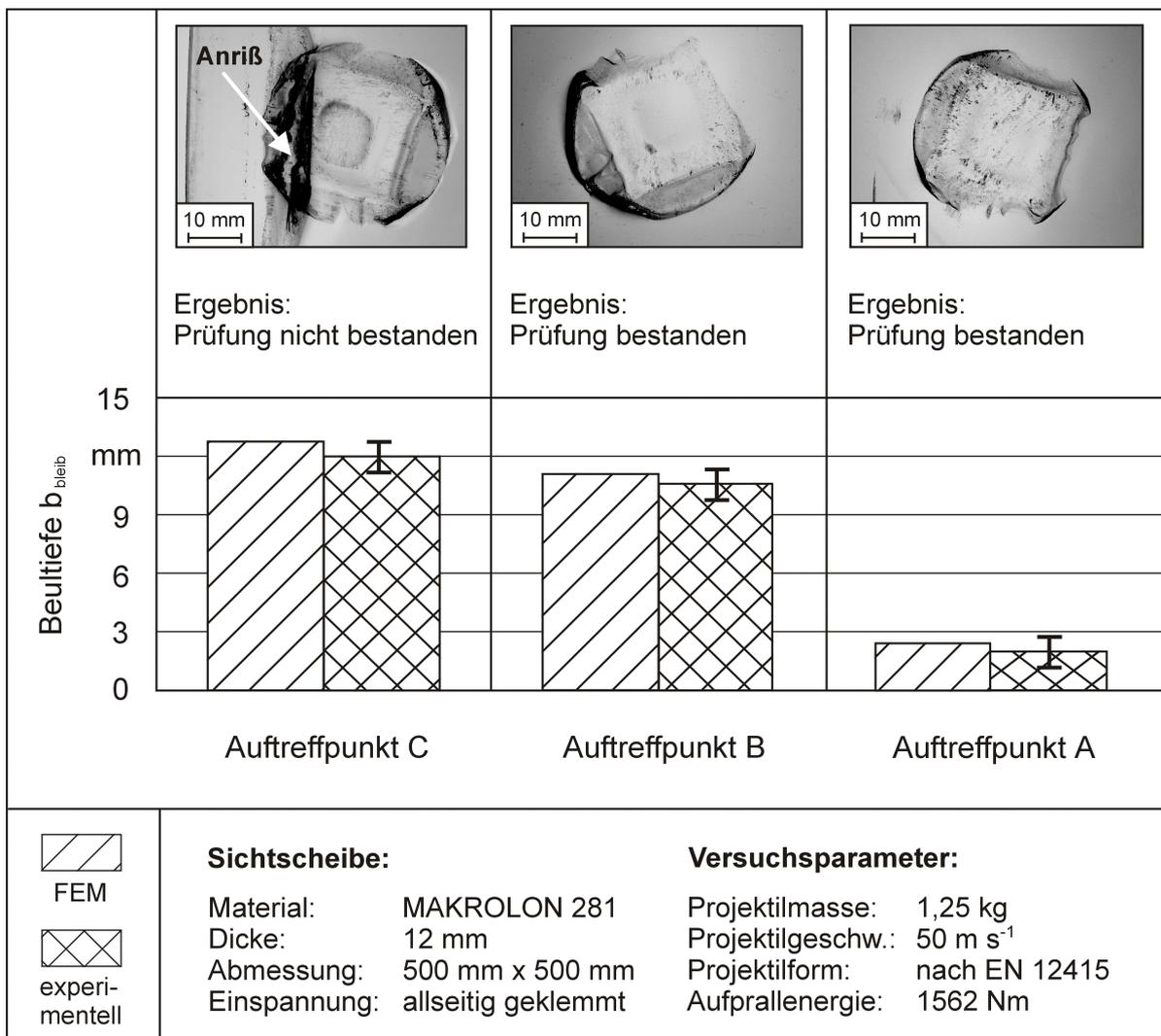
Ausdehnungsmöglichkeiten des Sichtscheibenmaterials in den Randbereichen, welches sich in einer erhöhten Widerstandsfähigkeit des Materials und damit in einem Anstieg der Stoßkraft äußert. Im Vergleich zur Probenmitte ist der im Auftreffpunkt B erzielte Maximalwert der Stoßkraft um 14 % und der im Auftreffpunkt C erzielte Maximalwert um 98 % größer.

Während die Polycarbonat-Sichtscheibe in der Probenmitte fast ausschließlich elastisch verformt wird und sich nach Beendigung des Stoßvorganges wieder in den Ausgangszustand zurückverformt, wird das Material in den Auftreffpunkten B und C bleibend geschädigt, **Bild 8-26**.



**Bild 8-26:** Plastische Dehnungen  $\epsilon_{pl}$  bei Variation des Projektilauftreffpunktes

Demzufolge treten zwar während der Belastung in der Probenmitte aufgrund elastischer Dehnungen Beultiefen  $b$  von bis zu 28 mm auf, die tatsächlich verbleibende Beulung nach Beendigung des Stoßvorganges beträgt allerdings nur  $b_{\text{bleib}} = 2,8$  mm und ist demzufolge wesentlich geringer als in den Randbereichen. Diese beträgt im Auftreffpunkt B 11,2 mm und im Auftreffpunkt C 12,8 mm. Gleichzeitig konnte im Auftreffpunkt C eine Anrißbildung festgestellt werden, die gleichbedeutend mit einem Materialversagen nach EN 12415 ist. Die randnahen Bereiche des Sichtscheibenmaterials MAKROLON 281 sind somit versagenskritischer als die Bereiche in der Probenmitte, was auch durch experimentelle Beschußuntersuchungen nach EN 12415 bestätigt wird, **Bild 8-27**.



**Bild 8-27:** Ergebnisse experimenteller Aufpralluntersuchungen bei Variation des Auftreffpunktes und Vergleich mit FE-Simulationsergebnissen

Die rechte Darstellung in Bild 8-27 verdeutlicht die in die Materialoberfläche eingeprägte stumpfe Stirnfläche des Normprojektils bei mittigem Aufprall, die mittlere Darstellung zeigt die plastische Beulung beim Auftreffen des Normprojektils in Punkt B und die linke Darstellung die beim Auftreffen des Normprojektils in Punkt C entstandene Rißbildung. Die Abweichungen zwischen Simulations- und experimentellen Ergebnissen betragen in diesen Untersuchungen ebenfalls maximal 10 %. Bezogen auf die kritische Aufprallenergie  $E_{krit}$  ergibt sich sowohl aus den rechnerunterstützten als auch aus den experimentellen Beschußuntersuchungen, daß diese im Auftreffpunkt B um 37 % und im Auftreffpunkt C um 42 % geringer ist als beim Aufprall des Normprojektils in der Probenmitte des Sichtscheibenmaterials. Eine Prüfung von Sichtscheiben trennender Schutzeinrichtungen muß, um für den ungünstigsten Belastungsfall einen ausreichenden Schutz zu bieten, im Randbereich des Prüfobjektes „Sichtscheibe“ stattfinden.

#### **8.4.1.6 Fazit**

Im Rahmen von Einzeluntersuchungen wurde für den Belastungsfall „Widerstandsklasse B1 nach EN 12415“ neben der Eignung der Einspannungsart auch der Einfluß der Projektilform, des Projektilaufreffwinkels und des Projektilaufreffpunktes auf das Rückhaltevermögen des Sichtscheibenmaterials MAKROLON 281 analysiert. Dabei stellte sich für die gewählte Einspannungsart *Klemmverbindung* heraus, daß sich die kritische Aufprallenergie  $E_{krit}$ , d. h. die Energie, bei der erstmals ein Materialversagen auftritt, sowohl bei einer randnahen Belastung als auch bei einer Belastung mit einer scharfkantigen Projektilform erheblich reduziert.

Die ermittelten FE-Ergebnisse für die exemplarisch durchgeführten Untersuchungen nach Widerstandsklasse B1 konnten tendenziell auch für andere Widerstandsklassen nach EN 12415 bestätigt werden. Von SPUR und BOLD [209, 210] werden Beschußprüfungen beschrieben, die diese Tendenz auch auf experimentellem Wege belegen.

Unter realen Bedingungen findet im ungünstigsten Fall eine Überlagerung beider Einflußfaktoren statt, d. h. es besteht die Gefahr, daß scharfkantige Bruchstücke randnah auf die Schutzeinrichtungsbaugruppe *Sichtfenster* auftreffen. Für diesen Worst-Case-Belastungsfall ist demzufolge die Schutzeinrichtungsbaugruppe *Sichtfenster* auszulegen und zu prüfen.

### 8.4.2 Worst-Case-Aufprallsimulation

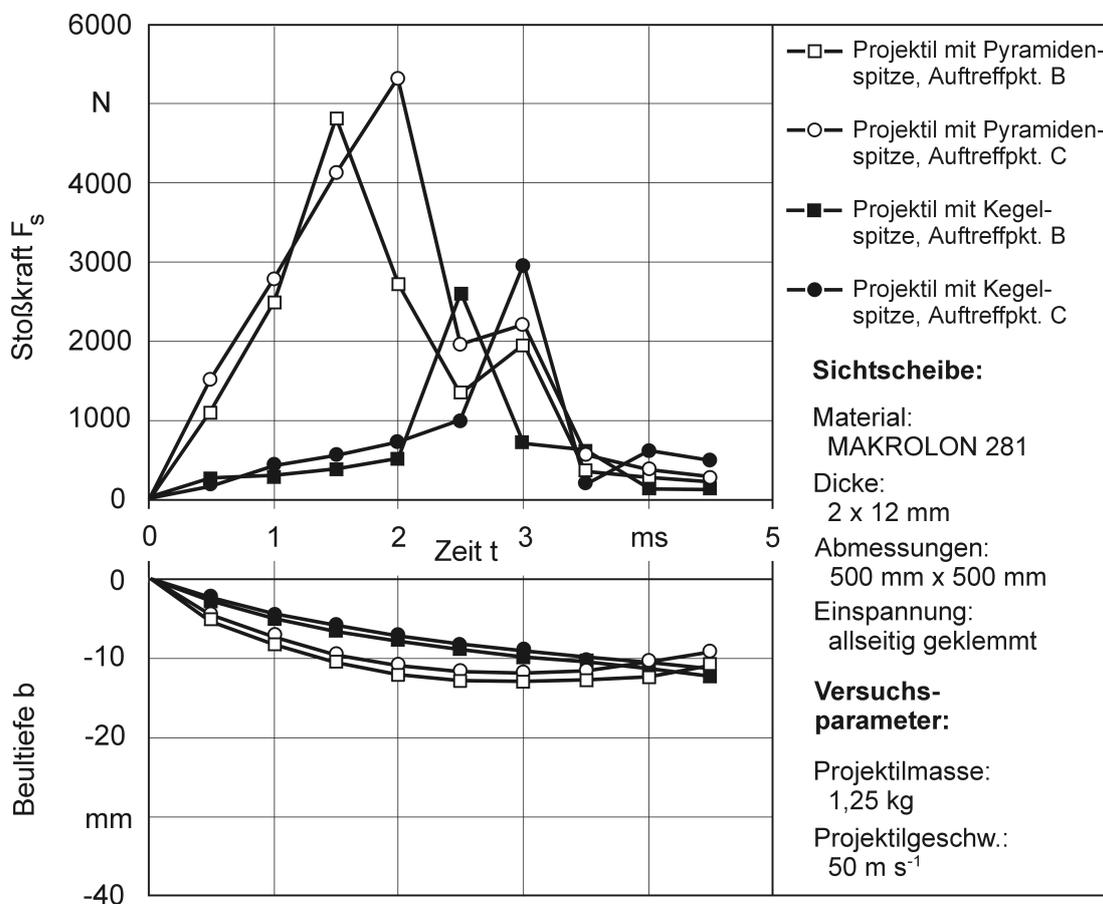
Um eine ausreichende Aufprallfestigkeit für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall sicherzustellen, werden im folgenden Simulationsrechnungen beschrieben, bei denen ein in eine Klemmverbindung eingespannter Sichtscheibenverbund mit dem Pyramiden- und dem Kegelprojektil randnah beansprucht wurde. Der Sichtscheibenverbund besteht dabei aus zwei MAKROLON 281 - Sichtscheiben der Dicke  $d = 12$  mm. Wie sich aus den vorhergehenden Untersuchungen ergab, reicht eine einzelne Sichtscheibe der Dicke 12 mm nicht aus, um sowohl dem Aufprall eines Projektils mit spitzer Geometrie als auch eine randnahe Beanspruchung schadensfrei zu widerstehen. Den zeitlichen Verlauf der auftretenden Stoßkräfte  $F_S$  sowie der gemessenen Beultiefen  $b$  im Projektilauftrittspunkt stellt **Bild 8-28** dar. Die dem Projektil zugewandte Sichtscheibe wird im folgenden als obere Sichtscheibe, die dem Projektil abgewandte Sichtscheibe als untere Sichtscheibe bezeichnet.

Es zeigt sich, daß die maximalen Stoßkräfte, unabhängig vom Auftreffpunkt, beim Kontakt des Pyramidenprojektils mit dem zweilagigen Sichtscheibenverbund insgesamt ein höheres Niveau annehmen als beim Kontakt des kegeligen Projektils. Dieses ist, wie sich schon bei den Aufpralluntersuchungen auf einlagige Prüfobjekte ergab, auf die im Vergleich zum Kegelprojektil stumpfere Stirnfläche des Pyramidenprojektils zurückzuführen.

Die stumpfe Stirnfläche beeinflußt auch den Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Stoßkraft. Während das Maximum der Stoßkraft beim Aufprall des Projektils mit abgeflachter Pyramidenspitze bereits beim Kontakt mit der oberen Sichtscheibe nach 1,5 bis 2 ms auftritt, wird das Stoßkraftmaximum beim Aufprall mit dem kegeligen Projektil erst beim Kontakt mit der unteren Sichtscheibe nach 2,5 bis 3 ms erreicht. Die obere Sichtscheibe wird von dem kegeligen Projektil ohne nennenswerten Anstieg der Stoßkraft vollständig durchdrungen.

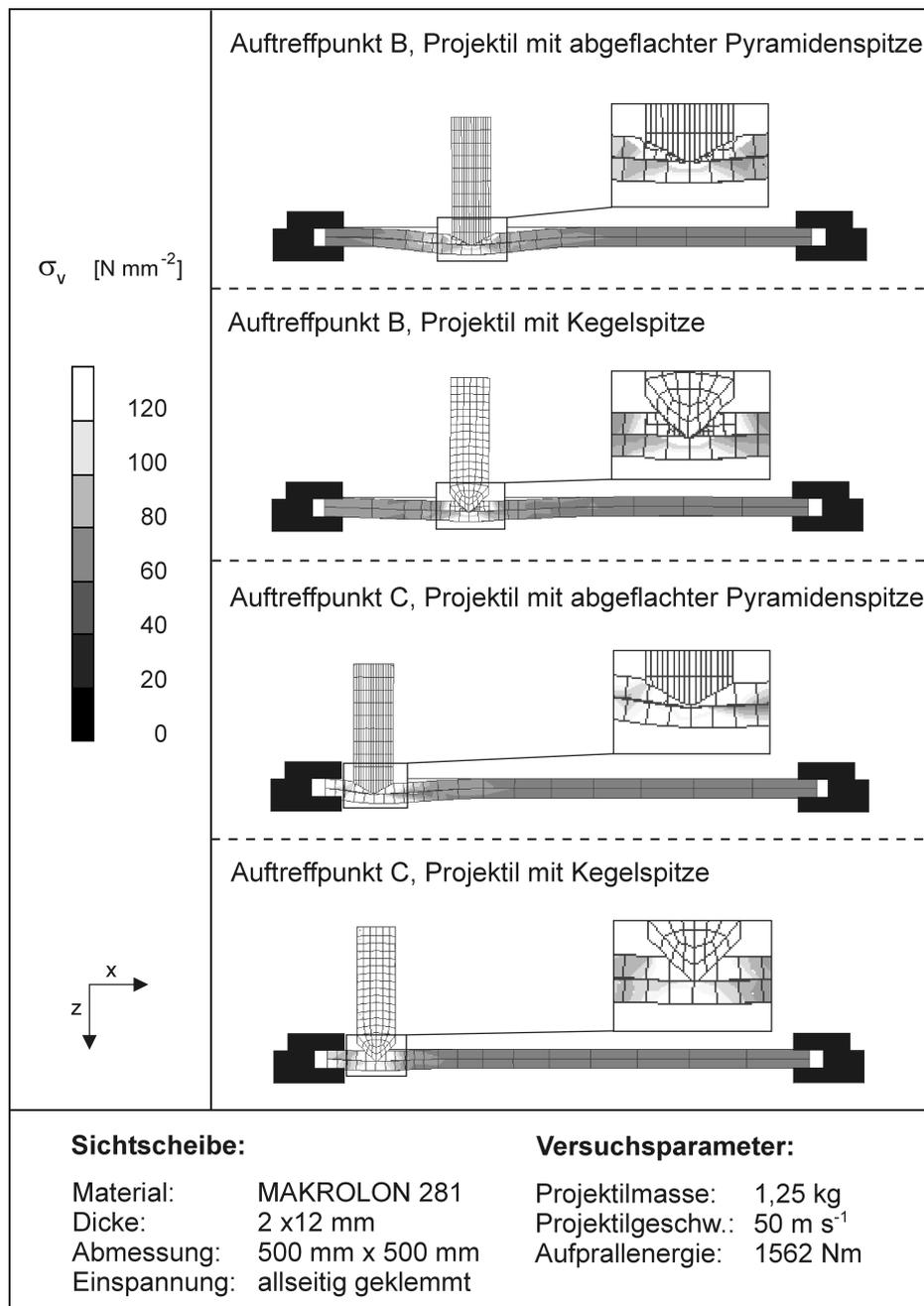
Die tatsächlich bleibende Gesamtbeultiefe  $b_{\text{ges bleib}}$  nimmt in beiden Belastungsfällen ähnliche Werte an. Diese beträgt im Auftreffpunkt B beim Aufprall des kegeligen Projektils  $b_{\text{bleib}} = 12,6$  mm und nimmt dort einen um 3 % größeren Wert an als beim Aufprall des Pyramidenprojektils, im Auftreffpunkt C beträgt  $b_{\text{bleib}} = 12,3$  mm, welches einem um 4 % höheren Wert entspricht. Ein Überschreiten des Versagenskriteriums nach EN 12415 in der unteren Sichtscheibe konnte in keinem der Belastungsfälle festgestellt werden. Der Probekörper aus zwei MAKROLON 281 - Sichtscheiben

der Dicke 12 mm besteht demzufolge die Aufprallfestigkeitsbeurteilung für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall nach Widerstandsklasse B1.



**Bild 8-28:** Stoßkraft- und Beultiefeverlauf bei Worst-Case-Aufprallbeanspruchung eines geklemmten Sichtscheibenverbundes aus zwei MAKROLON-Platten der Dicke 12 mm

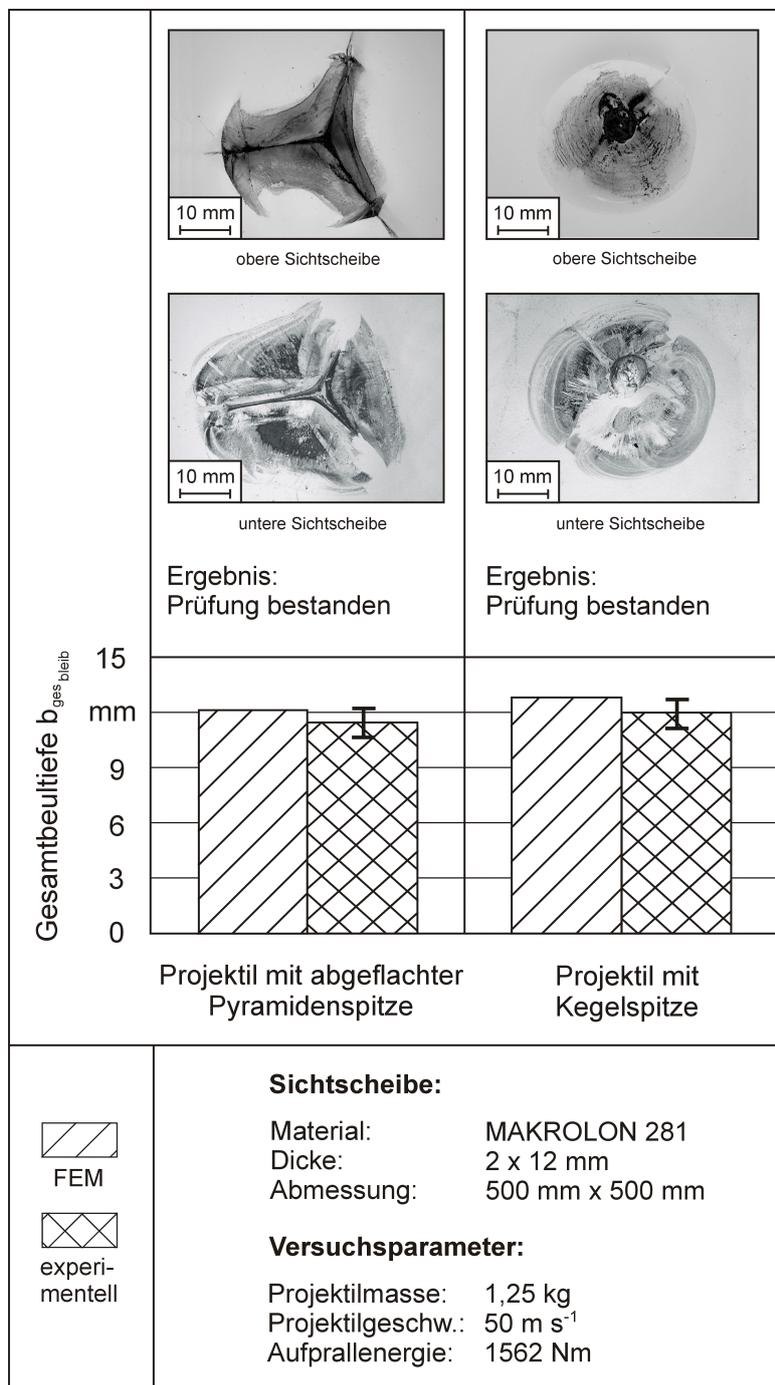
**Bild 8-29** stellt die im Material auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES zum Zeitpunkt des Kontaktes der Projektile mit der unteren Sichtscheibe dar. Vergleichsspannungsmaxima treten in allen Belastungsfällen sowohl im Kontaktbereich zwischen Projektil und oberer Sichtscheibe als auch direkt unterhalb des Kontaktbereiches Projektil/ obere Sichtscheibe in der unteren Polycarbonat-Platte auf. In sämtlichen Untersuchungen durchdringen die Projektile die obere Sichtscheibe und werden erst beim Kontakt mit der unteren Sichtscheibe am weiteren Vordringen gehindert. Eine Schädigung der unteren Sichtscheibe ist jedoch nur in oberflächennahen Materialschichten zu erkennen.



**Bild 8-29:** VON MISES Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  in einem zweilagigen Probekörper aus MAKROLON 281 unter Worst-Case-Aufprallbedingungen

Die Ergebnisse der FE-Simulationsrechnungen für die Widerstandsklasse B1 nach EN 12415 wurden auch für die Widerstandsklassen A1, A2, A3, B2, B3, C1, C2 und C3 bestätigt. Die FE-Ergebnisse sind durch experimentelle Beschußuntersuchungen verifiziert worden. Beispielhaft stellt **Bild 8-30** Resultate von Aufpralluntersuchungen dar, bei denen der Sichtscheibenverbund durch das Pyramiden- und Kegelprojektil

randnah im Auftreffpunkt B belastet wurde. Zugrundegelegt wurden die Prüfbedingungen der Widerstandsklasse B1.



**Bild 8-30:** Ergebnisse experimenteller Beschußuntersuchungen beim Aufprall des Pyramidenprojektils (links) und des Kegelprojektils (rechts) im Auftreffpunkt B

Wie bereits in den FE-Berechnungen festgestellt wurde, wird die obere Sichtscheibe sowohl vom Projektil mit abgeflachter Pyramidenspitze als auch vom Projektil mit Kegelspitze vollständig durchdrungen, Bilder 8-30 links-oben und 8-30 rechts-oben. Im Material nach Beendigung des Stoßvorganges stattfindende Relaxationsvorgänge führen allerdings wieder zu einem Verschließen der Bruchstelle. In beiden Belastungsfällen wird die untere Sichtscheibe oberflächennah beschädigt, Bilder 8-30 links-unten und 8-30 rechts-unten. Das Pyramidenprojektil dringt 0,6 mm, das Kegelprojektil 1,1 mm in die untere Sichtscheibe ein. Ein Materialversagen nach EN 12415 liegt jedoch nicht vor.

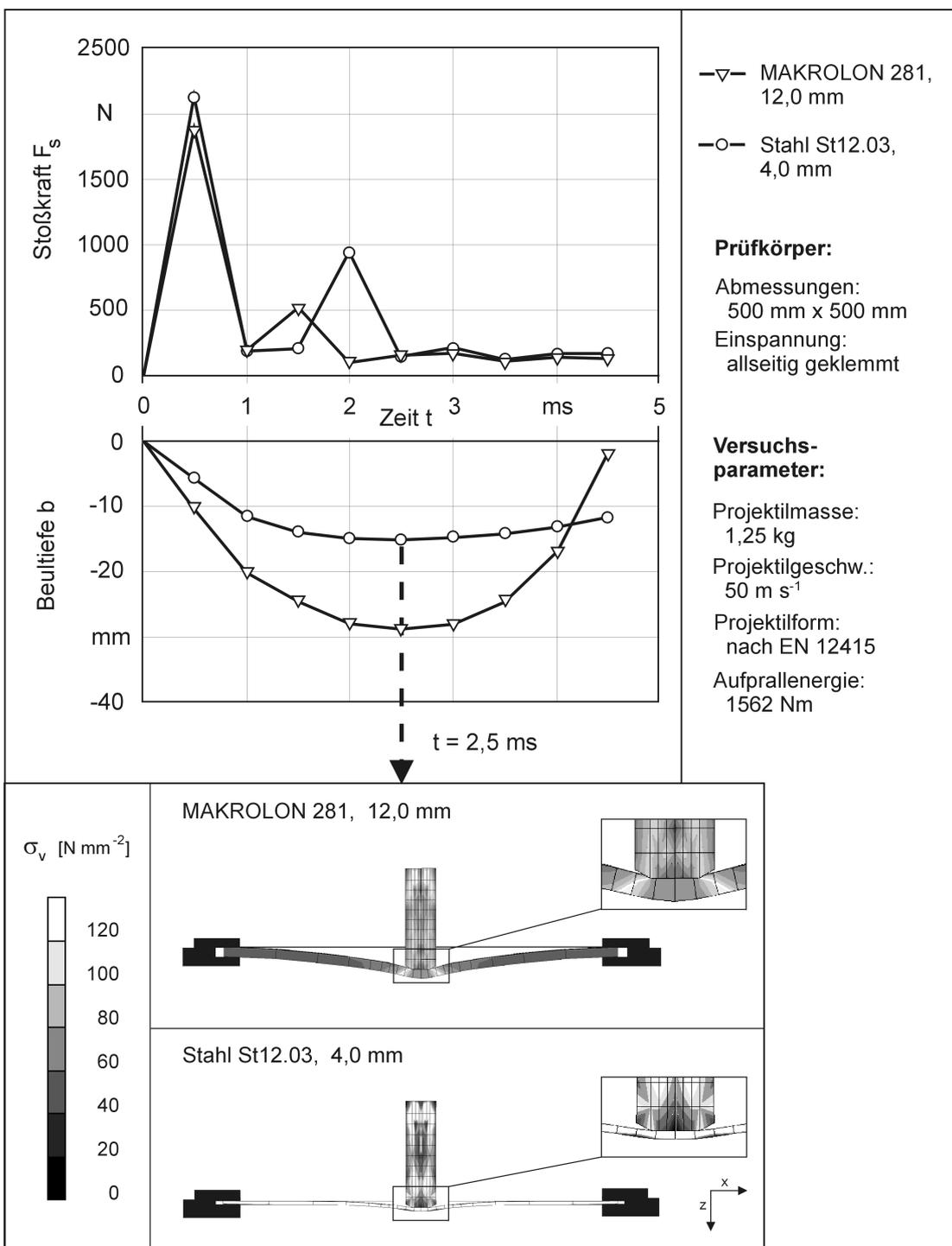
### 8.4.3 Vergleich Polycarbonat - Stahl

Nicht nur das Sichtfenster, auch die Wand einer trennenden Schutzeinrichtung muß dem Aufprall von abgeschleuderten Bruchstücken widerstehen. Als Wandmaterialien werden in trennenden Schutzeinrichtungen vorwiegend unlegierte und niedriglegierte Stähle, wie beispielsweise St12.03 oder St37-2, eingesetzt [211]. Die Dicke  $d$  der Materialien beträgt in der Regel 3,0 bis 5,0 mm.

Im Rahmen weiterer Simulationsrechnungen wurde das Aufprallverhalten einer 12,0 mm dicken MAKROLON 281 - Sichtscheibe mit dem Verhalten des in trennenden Schutzeinrichtungen eingesetzten Wandwerkstoffes St12.03 verglichen. Ziel war es, eine der Aufprallfestigkeit des Sichtscheibenwerkstoffes adäquate Dicke  $d$  des Wandmaterials St12.03 zu bestimmen.

Simulationsrechnungen zeigten, daß der Stahlwerkstoff St12.03 bei einer Dicke  $d$  zwischen 4,0 und 4,3 mm ähnliche Rückhaltefähigkeiten besitzt wie das Sichtscheibenmaterial MAKROLON 281 der Dicke  $d = 12,0$  mm. Den Stoßkraft- und Beultiefenverlauf der beiden Werkstoffe bei einer Belastung entsprechend Widerstandsklasse B1 nach EN 12415 stellt **Bild 8-31 oben** dar, die in den Materialien auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES zum Zeitpunkt der maximalen Beulung ( $t = 2,5$  ms) **Bild 8-31 unten**.

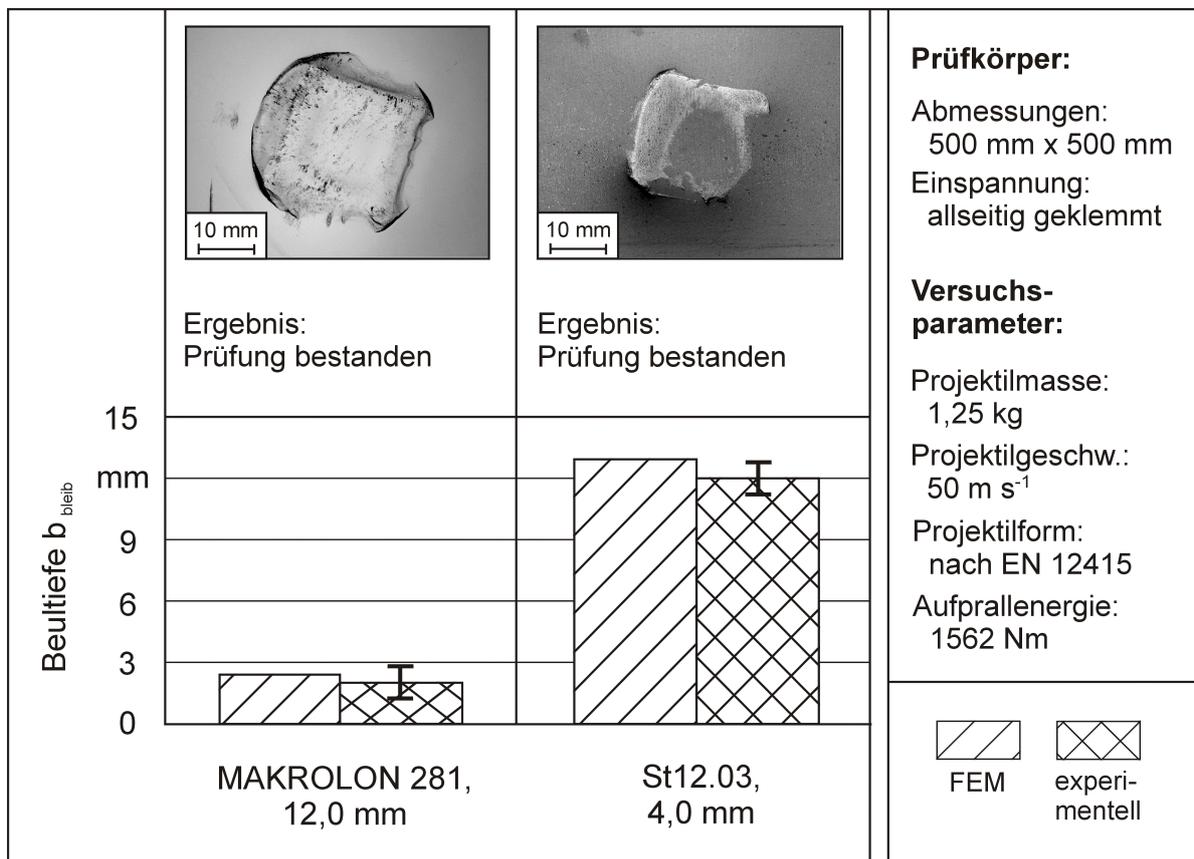
Auffällig ist der ähnliche Verlauf der Stoßkraftkurven bei dieser Belastung. Nach einer Stoßzeit von  $t = 0,5$  ms erreichen beide Kurven ihr Maximum und fallen unmittelbar danach wieder steil ab. Der Maximalwert der Stoßkraft beim Aufprall des Normprojektils auf den Stahlwerkstoff der Dicke 4,0 mm ist dabei um 22 % größer als beim Aufprall des Projektils auf das Sichtscheibenmaterial der Dicke 12 mm.



**Bild 8-31:** Stoßkraft- und Beultiefeverlauf des Stahlwerkstoffes St12.03 und des Sichtscheibenmaterials MAKROLON 281 bei einer Belastung entsprechend Widerstandsklasse B1 nach EN 12415 sowie die in diesen Materialien auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES zum Zeitpunkt  $t = 2,5$  ms

Unterschiede sind vor allem im Verlauf der Beultiefen zu erkennen. Kennzeichnend für den Beultiefeverlauf des Sichtscheibenmaterials MAKROLON 281 ist die ausgeprägte elastische Dehnung des Materials mit Maximalwerten von bis zu 28 mm. Nach Beendigung des Stoßvorganges verbleibt allerdings nur eine Beultiefe von  $b_{\text{bleib}} = 2,4$  mm. Wesentlich geringer ausgeprägt ist die elastische Dehnung des Stahlwerkstoffes (Maximalwerte von  $b = 15$  mm), jedoch ergibt sich hier nach Ende der Stoßbeanspruchung eine Beultiefe von  $b_{\text{bleib}} = 12,5$  mm. Die Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES sind aufgrund der höheren Festigkeitskennwerte im Stahlblech wesentlich größer als im Sichtscheibenmaterial, Bild 8-31 unten.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden auch durch experimentelle Untersuchungen bestätigt. **Bild 8-32** stellt die nach Beendigung des Stoßvorganges in beiden Materialien verbleibende Beulung im Projektilaufreffpunkt dar.



**Bild 8-32:** Ergebnisse experimenteller Beschußuntersuchungen auf das Sichtscheibenmaterial MAKROLON 281 der Dicke 12,0 mm und den Stahlwerkstoff St12.03 der Dicke 4,0 mm

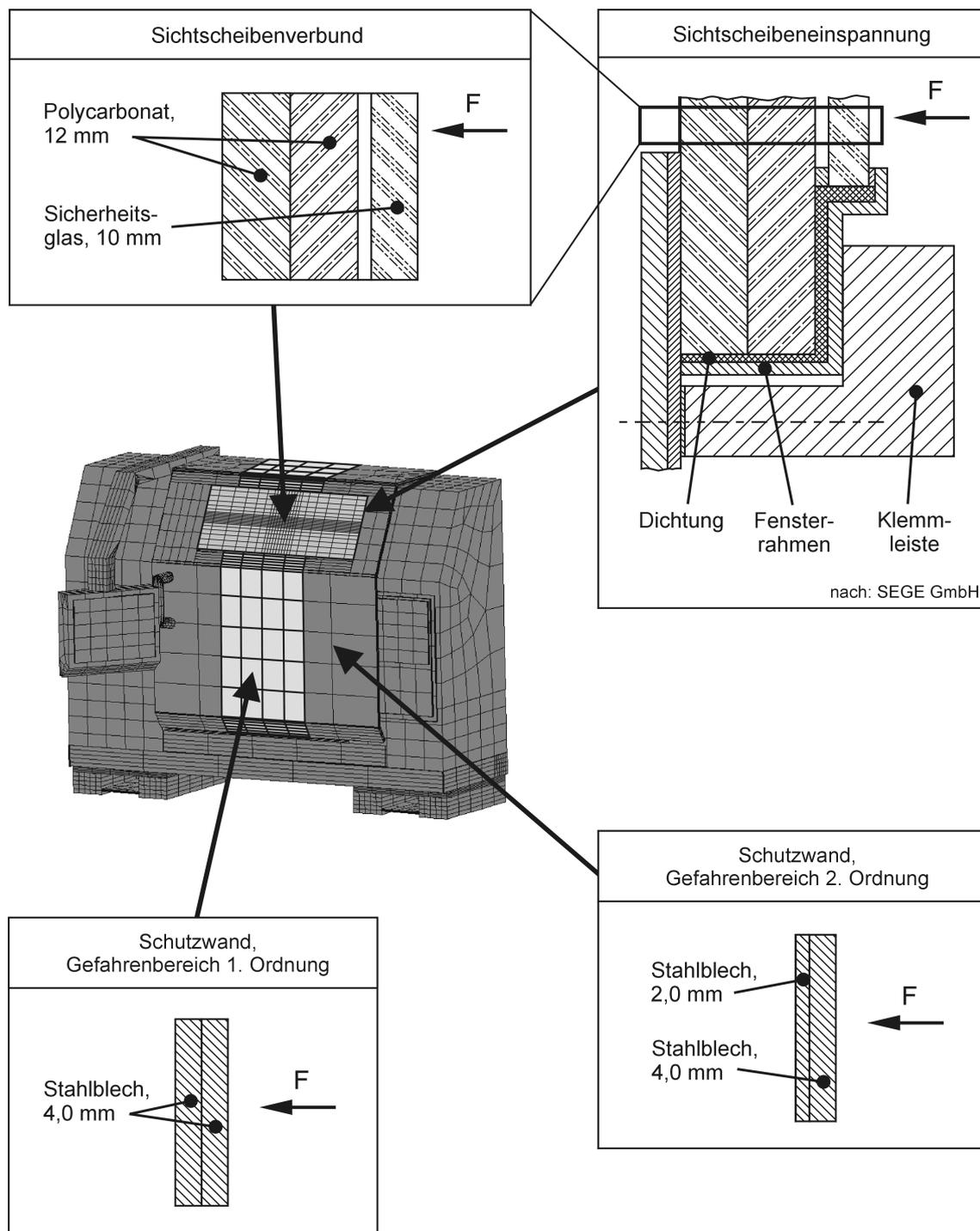
## 8.5 Fazit

Mit Hilfe des an das Rechnersystem zur sicherheitsintegrierten Produkt- und Prozeßgestaltung angebundenen Anwendungsmoduls „FE-Aufprallsimulation“ ist es möglich, im Rahmen einer Werkzeugmaschinenentwicklung das Verhalten von Schutzeinrichtungsbaugruppen und -materialien unter hochdynamischer Belastung realitätsnah zu simulieren.

Unter Zugrundelegung einer neuen Prüfablauffolge zur Beurteilung von Materialien und Komponenten trennender Schutzeinrichtungen für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen zunächst Sicherheitsfenster unterschiedlichen Aufbaus und unterschiedlicher Dicke getestet wurden. Dabei konnte für eine Klemmverbindungslösung, bestehend aus zwei MAKROLON 281 - Sichtscheiben der Dicke 12 mm, eine ausreichende Rückhaltefähigkeit für den Worst-Case-Beanspruchungsfall nachgewiesen werden. Die Abweichungen zwischen den rechnerischen und experimentellen Untersuchungsergebnissen betragen in der Regel zwischen 3 und 10 %. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Meßungenauigkeiten, die auf im Sichtscheibenmaterial stattfindende Relaxationsvorgänge nach Beendigung der experimentellen Aufprallbelastungen zurückzuführen sind.

Neben dem Sicherheitsfenster müssen auch die Schutzwände trennender Schutzeinrichtungen eine ausreichende Rückhaltefähigkeit besitzen. Im Rahmen weiterer FE-Aufprallsimulationen zeigte sich, daß eine Schutzwand, bestehend aus einem Stahlblech der Dicke 4,0 bis 4,3 mm, eine ähnliche Rückhaltefähigkeit besitzt wie das Sichtscheibenmaterial MAKROLON 281 der Dicke 12 mm.

**Bild 8-33** faßt die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen. Dargestellt ist der Aufbau einer Drehmaschinenschutzeinrichtung, die für die im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft betrachtete Aufgabenstellung dimensioniert und im Rahmen von FE-Aufprallsimulationen erfolgreich getestet wurde.



**Bild 8-33:** Trennende Schutzeinrichtung einer Horizontal-Drehmaschine mit optimierten Rückhalteeigenschaften

Die Schutzeinrichtungslösung kann nun im weiteren Verlauf der sicherheitsintegrierten Prozeß- und Produktgestaltung an das CAD-System des Produktentwicklungsarbeitsplatzes übertragen und dort an das Modell der Werkzeugmaschine angepaßt werden. Ergebnis ist ein sicherheitstechnisch optimiertes Maschinenmodell, das zudem von einer trennenden Schutzeinrichtung umgeben wird, die über die Europäische Norm EN 12415 hinausgehende Sicherheitsanforderungen erfüllt.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Globale, internationale Märkte sowie verkürzte Innovationszyklen erhöhen kontinuierlich den Wettbewerbsdruck auf die Produkthersteller. Diese müssen, um wettbewerbsfähig zu bleiben, schnell auf Kundenwünsche reagieren und gleichzeitig Erzeugnisse hoher Qualität kostengünstig produzieren. Dabei besitzt die Produktentwicklung als Kernbereich eines Unternehmens und Ursprung von Innovationen eine herausragende Bedeutung. Hier werden neben den Produkteigenschaften auch die Produktkosten festgelegt. Neben methodischen und organisatorischen Ansätzen bietet vor allem der prozeß- und produktintegrierte Rechnereinsatz ein erhebliches Potential zur Leistungssteigerung in der Produktentwicklung.

Generelle Gestaltungsziele bei der Entwicklung technischer Produkte sind die Funktionserfüllung, Wirtschaftlichkeit und die Sicherheit von Mensch und Umgebung. Aufgrund neuer, vor allem aus der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung resultierender Gefahrenpotentiale und sich verschärfender normativer Rahmenbedingungen ist das Erfüllen des Gestaltungsziels *Sicherheit* vor allem im Werkzeugmaschinenbau von wesentlicher Bedeutung.

Obwohl Rechnersysteme bereits seit einiger Zeit in den Konstruktionsabteilungen eingesetzt werden, hat sich deren Anwendung bei der Umsetzung von sicherheitstechnischen Anforderungen während der Produktentwicklung von technischen Erzeugnissen bislang nicht durchsetzen können. Bisherige Ansätze beschäftigten sich vordergründig mit der Bereitstellung von Informationen aus Katalogen und Datenbanken, in die Angaben aus Vorschriften, Normen sowie Arbeitsschutzbestimmungen abgebildet wurden.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieser Arbeit, ein neues Konzept zur sicherheitsintegrierten Gestaltung und Optimierung von Prozessen und Produkten zu entwickeln und dieses für das Beispiel *Werkzeugmaschine* prototypisch in Form eines integrierten Rechnersystems umzusetzen. Wesentliche Merkmale des informationstechnischen Ansatzes sind eine Ähnlichkeitssuche im Rahmen der sicherheitsintegrierten Prozeßplanung sowie die Beseitigung von im Rahmen sicherheitstechnischer Produktbewertungen festgestellter Gestaltungsdefizite durch eine automatisierte Optimierung des Produktentwicklungsprozesses.

Unter Zugrundelegung der während der Produktentwicklung zu erfüllenden sicherheitstechnischen Anforderungen erfolgt die Planung des Produktentwicklungsprozesses. Dabei besteht die Möglichkeit, sicherheitstechnisch optimierte Lösungen aus ähnlichen, bereits abgeschlossenen Prozessen in den aktuellen Prozeß zu importieren. Durch die Steuerungsfunktion des Prozeßgestaltungsmoduls wird die Ausführung der Produktentwicklungsaufgaben und damit die sicherheitsgerechte Produktgestaltung veranlaßt. Die Überprüfung der Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen während der Produktgestaltung erfolgt durch eine im Anschluß an die einzelnen Produktentwicklungsaufgaben durchzuführende sicherheitstechnische Bewertung. Dazu wird der Prozeßablaufplan insbesondere nach den Teilaufgaben um Bewertungsaktionen ergänzt, die die Gestaltung von sicherheitsrelevanten Systemteilen zum Ziel haben. Die sicherheitstechnische Bewertung gliedert sich in die Arbeitsschritte *Gefahrenanalyse*, *Definition von Schutzzielen* und *Soll-Ist-Maßnahmenvergleich* und wird durch das Produktgestaltungsmodul unterstützt. Defizite, die im Rahmen des Soll-Ist-Maßnahmenvergleichs erkannt wurden, werden durch eine sicherheitstechnisch orientierte Prozeß- und Produktoptimierung beseitigt. Dazu erfolgt zunächst die Definition der Produktentwicklungsaufgaben, die zur Erfüllung des sicherheitstechnischen Soll-Profiles notwendig sind. Diese werden anschließend in den Prozeßablaufplan eingefügt. Die Ausführung der neu integrierten Produktentwicklungsaufgaben erfolgt mit Hilfe des Produktgestaltungsmoduls.

Die Funktionalität des entwickelten Systems wurde am Beispiel einer sicherheitsintegrierten Werkzeugmaschinenentwicklung demonstriert. Die Bereitstellung von Informationen über Gefährdungen an Werkzeugmaschinen sowie von Hinweisen zur sicherheitsgerechten Dimensionierung und Gestaltung von Maschinenbaugruppen bzw. -teilen erfolgte dabei durch eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Wissensbasis *Maschinensicherheit*.

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung an Werkzeugmaschinen besitzt die trennende Schutzeinrichtung. Da ein Restrisiko infolge abgeschleuderter Werkstück-, Spannmittel- oder Werkzeugbruchstücke nicht vollständig verhindert werden kann, ist es deren Aufgabe, den Bediener vor freigesetzten Elementen zu schützen. Um Schutzeinrichtungsbaugruppen und -materialien für den ungünstigsten anzunehmenden Belastungsfall bereits im Konstruktionsstadium ausreichend rückhaltesicher zu

dimensionieren, wurde das Rechnersystem um ein Anwendungsmodul „FE-Aufprallsimulation“ ergänzt.

Die Beurteilung der Aufprallfestigkeit der Maschinenschutzeinrichtung erfolgte mit Hilfe des FE-Programmsystems MARC/MENTAT in Anlehnung an die Prüfbedingungen der Europäischen Sicherheitsnormen EN 12415 und prEN 12417. Dabei wurden neben den im Kontaktbereich bzw. an der Einspannstelle des Sichtscheibenmaterials auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach VON MISES auch der Beultiefenverlauf im Projektilaufreffpunkt und die unmittelbar an der Stirnfläche des Projektils auftretenden Stoßkräfte analysiert. Insbesondere die in den einzelnen Untersuchungen ermittelte Maximalstoßkraft  $F_{Smax}$  ist eine wichtige Kenngröße bei der Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen. Eine Ermittlung dieser Kenngröße im Rahmen experimenteller Beschußuntersuchungen ist nicht möglich.

Bei der Durchführung der Aufprallfestigkeitsuntersuchungen zeigte sich, daß die normativen Prüfbedingungen nicht ausreichen, um die Komponenten trennender Schutzeinrichtungen für reale Schadensfälle rückhaltesicher zu testen. Aus diesen Erkenntnissen wurde eine neue Prüfablauffolge zur Beurteilung von Baugruppen und Materialien trennender Schutzeinrichtungen abgeleitet. Wesentliches Kennzeichen der neuen Vorgehensweise ist eine im Anschluß an die normative Prüfung stattfindende Worst-Case-Aufprallfestigkeitsbeurteilung. Dabei werden die Prüfparameter derart miteinander kombiniert, daß im Material eine größtmögliche Belastung hervorgerufen wird.

Durch den Einsatz des integrierten Rechnersystems im Rahmen der Werkzeugmaschinenentwicklung werden damit Voraussetzungen geschaffen, Gefährdungen, die im späteren Betrieb von der Werkzeugmaschine ausgehen können, bereits am virtuellen Prototyp zu erkennen und durch Maßnahmen der unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitstechnik frühzeitig zu beseitigen. Auf diese Weise können gefahrenminimierte Maschinen ohne umfangreiche experimentelle Sicherheitsprüfungen am realen Produkt entwickelt werden.

Um die in Zukunft weiter steigenden, vor allem durch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung hervorgerufenen Anforderungen an die Aufprallfestigkeit von Materialien trennender Schutzeinrichtungen zu erfüllen, ist das Anwendungsmodul „Aufprallsimulation“ um FE-Modelle hochaufprallfester Werkstoffe bzw. Werkstoffverbunde zu ergänzen. Zu diesen, derzeit vor allem im Bereich des Militärwesens eingesetzten Ma-

aterialien, zählen beispielsweise faserverstärkte Kunststoffe, Fasergewebe oder Keramikverbundwerkstoffe.

Der erarbeitete methodische Lösungsansatz zur sicherheitsintegrierten Prozeß- und Produktgestaltung ist allgemeingültig und auf beliebige andere Produkte übertragbar. Durch die im Rahmen der Systemrealisierung verfolgte offene Systemarchitektur kann der Produktentwicklungsarbeitsplatz um weitere Bausteine zur sicherheitsgerechten Konstruktion ergänzt werden. Die erarbeiteten methodischen und informationstechnischen Grundlagen ermöglichen somit weitere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der sicherheitsgerechten Produktentwicklung.

**10 Literaturverzeichnis**

- [1] AGARDH, L. ;  
LAINE, L. : 3D-FE-Simulations of High-Velocity Fragment Perforation of Reinforced Concrete Slabs. In: International Journal of Impact Engineering 22 (1999), Nr. 9-10, S. 911-922
- [2] AHN, H. : Optimierung von Produktentwicklungsprozessen. Entscheidungsunterstützung bei der Umsetzung des Simultaneous Engineering.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1997
- [3] ANDERL, R. : Integriertes Produktmodell.  
In: Zwf 84 (1989), Nr. 11, S. 640-644
- [4] ANDERL, R. ;  
BUMILLER, J. ;  
u.a. : Multimediale Unterstützung verteilter Produktentwicklung. In: CAD `98: Tele-CAD – Produktentwicklung in Netzwerken. Fachtagung der Gesellschaft für Informatik, Darmstadt, 5./6.3.98
- [5] AUGUSTIN, W. : Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 412. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1985
- [6] BÄßLER, R. : Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozeß.  
Stuttgart, Universität, Diss., 1981
- [7] BARTHELMEß, P. : Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßplanung.  
München, Technische Universität, Diss., 1987
- [8] BATHE, K.J. : Finite Elemente Methoden.  
Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [9] BAUERT, F. : Methodische Produktentwicklung für den rechnerunterstützten Entwurf.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1991
- [10] BAUMANN, M. : Anwendungsspezifische Erweiterung von Konstruktionssystemen für geometrisch-gestalterische Tätigkeiten unter Berücksichtigung einer systemneutralen Datenhaltung.  
Aachen, Technische Universität, Diss., 1995

- [11] BEARDMORE, P. ; CRAZE Formation and Groth in Anisotropic Polymers.  
RABINOWITZ, S. : In: International Journal of Material Science 10 (1975),  
Nr. 8, S. 1763-1770
- [12] BECKER, H. ; SICHERHEIT von Maschinen und Werkzeugen. In:  
WÜRZ, T. : Schulz, H. [Hrsg.]: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.  
München: Carl Hanser Verlag, 1996
- [13] BEHR, B. : SPINDEL-Lager-Einheiten entwerfen mit Hilfe wissens-  
basierter Konstruktionssysteme.  
In: Maschinenmarkt 98 (1992), Nr. 35, S. 390-393
- [14] BEITZ, W. : ÜBERSICHT über Konstruktionsmethoden.  
In: Konstruktion 24 (1972), Nr. 2, S. 68-72 und 109-114
- [15] BEITZ, W. : FERTIGUNGS- und montagegerecht.  
In: Konstruktion 25 (1973), Nr. 10, S. 489-497
- [16] BEITZ, W. ; SONDERFORSCHUNGSBEREICH 203: Rechnerunterstützte  
u.a. : Konstruktionsmodelle im Maschinenwesen. Abschluß-  
bericht Teilprojekt B2 „Strukturen rechnerunterstützter  
Konstruktionsprozesse“.  
Berlin, Technische Universität, 1992, S. B2-1 – B2-63
- [17] BEITZ, W. ; DUBBEL. Taschenbuch für den Maschinenbau.  
KÜTTNER, K.-H. : Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [18] BEITZ, W. ; EINE Systemumgebung zur Unterstützung von Simul-  
LAM, A. ; taneous Engineering. VDI-Bericht 1148.  
RATFISCH, U. ; Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994  
TEGEL, O. :
- [19] BIANCHI, G. ; TOWARD Virtual Engineering in Machine Tool Design.  
PAOLUCCI, F. ; In: Annals of the CIRP 45 (1996), Nr. 1, S. 381-384  
u.a. :
- [20] BISCHOFF, W. ; RATIONELLES Konstruieren. Konstruktionshandbücher  
HANSEN, F. : Band 5. Berlin, 1953
- [21] BÖHME, W. : APPLICATION of Dynamic Key-Curves for the Determina-  
tion of the Impact Fracture Toughness of Polymers at  
High Rates of Loading. In: Proceedings of the ESIS  
European Symposium on Impact and Dynamic Fracture  
of Polymers and Composites.  
Porto Cervo, Italien, 20.-22. Sep. 1993, S. 59-72

- [22] BÖHRINGER, H. : Arbeitsraumabdeckung schützt das Bedienpersonal an einer Drehmaschine.  
In: Maschinenmarkt 88 (1982), Nr. 49, S. 1015-1018
- [23] BULLINGER, H.-J. : Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung. In: Bullinger, H.-J. [Hrsg.]: Tagungsband 3. F&E Management Forum „Paradigmenwechsel im Management“. Frankfurt, 5.-6. Nov. 1991
- [24] BULLINGER, H.-J. ; ALTENHOFEN, C. ; PETROVIC, M. : Marktstudie Dokumenten- und Workflow-Management-Systeme. Teil I: Theorie und Praxis. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [25] BULLINGER, H.-J. ; WARSCHAT, J. ; WISSLER, K.-F. : Rapid Product Development – ein ganzheitliches Produktentwicklungskonzept.  
In: Konstruktion 48 (1996), Nr. 10, S. 305-312
- [26] CARLOWITZ, B. : Untersuchungen zum Bruchverhalten ausgewählter thermoplastischer Kunststoffe unter Schlagbeanspruchung.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1978
- [27] CLOS, R. ; SCHREPPPEL, U. ; HAUFFE, M. ; MAYER, U. : Plastisches Verhalten des Stahls 20 Mn Mo Ni 5 5 bei transienter Hochgeschwindigkeitsbelastung. 18. MPA-Seminar "Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik", Staatl. Materialprüfungsanstalt – MPA Stuttgart, 8. und 9.10.1992, S. 34.01-34.17
- [28] COMPES, P. : Sicherheitstechnisches Gestalten.  
Aachen, Technische Hochschule, Habilitationsschrift, 1970
- [29] CONRAD, H. : Thermally Activated Deformation of Metals.  
In: Journal of Metals 16 (1964), S. 582-588
- [30] DACKWEILER, G. : Verhalten metallischer Faserverbundwerkstoffe bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1990
- [31] DAHL, B. : Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung.  
Aachen, Technische Universität, Diss., 1990
- [32] DIETERLE, A. : Recyclingintegrierte Produktentwicklung.  
München, Technische Universität, Diss., 1995

- [33] DOBRINSKI, P. ;      Physik für Ingenieure.  
KRAKAU, G. ;          Stuttgart: Teubner-Verlag, 1984  
VOGEL, A. :
- [34] DOMINGHAUS, H. : Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften.  
Berlin: Springer-Verlag, 1997
- [35] DRIEDGER, G. : Die sicherheitstechnische Bewertung von Mensch-  
Maschine-Systemen. VDI-Bericht 113, Reihe 1.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984
- [36] DRIEDGER, G. ;      Zur Bewertung von sicherheitsgerechten Lösungen  
VORATH, B.J. :        in der Konstruktion. In: Die Berufsgenossenschaft 94  
(1980), Nr. 6, S. 410-415
- [37] DYBOWSKI, G. :      Beitrag zur Dimensionierung von Schleifkörperschutz-  
hauben.  
In: Maschinenbautechnik 30 (1981), Nr. 9, S. 420-422
- [38] EHRENSPIEL, K. : Kostengünstig Konstruieren.  
Berlin: Springer-Verlag, 1985
- [39] EHRENSPIEL, K. : Auf dem Weg zur integrierten Produktentwicklung. VDI-  
Bericht 812. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990
- [40] EHRENSPIEL, K. : Integrierte Produkterstellung. In: Milberg, J. [Hrsg.]:  
Vortragsband zum Münchener Kolloquium '91 „Wett-  
bewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen“.  
München: Technische Universität, 1991
- [41] EHRENSPIEL, K. ;    Integrierter Konstruktionsarbeitsplatz.  
AMBROSY, S. ;        In: Zwf 90 (1995), Nr. 9, S. 410-413  
AßMANN, G. :
- [42] EVANS, B. :          Simultaneous Engineering.  
In: Mechanical Engineering 110 (1988), Nr. 2, S. 38-39
- [43] EVERSHEIM, W. :      Simultaneous Engineering – eine organisatorische  
Chance ! VDI-Bericht 758.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989
- [44] EVERSHEIM, W. :    Prozeßorientierte Unternehmensorganisation: Konzep-  
te und Methoden zur Gestaltung schlanker Organisatio-  
nen. Berlin: Springer-Verlag, 1995

- [45] EVERSHEIM, W. ;  
BAUMANN, M. : Konfigurierbare Konstruktionssysteme. Ein neuer Ansatz zur anwendungsspezifischen Systemunterstützung. In: VDI-Z 134 (1992), Nr. 12, S. 99-102
- [46] EVERSHEIM, W. ;  
BOCHTLER, W. ;  
LAUFENBERG, L. : Methods and Models for an Integrated Modelling of Products and Processes. In: Production Engineering, Research and Development in Germany, Vol. I/2. München: Carl Hanser Verlag, 1994, S. 173-176
- [47] EVERSHEIM, W. ;  
BREIT, S. ;  
ROGGATZ, A. : Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. [Hrsg.]: Produktion und Management. Berlin: Springer-Verlag, 1996, S. 7-124 – 7-149
- [48] EVERSHEIM, W. ;  
DEUSE, J. ;  
GRAESSLER, R. ;  
SCHULTEN, I. : Information Based Optimization of Workflow in Design and Process Planning. In: Proceedings of the CIRP Seminar STC Design „New Tools and Workflows for Product Development“. Berlin, 1998, S. 175-186
- [49] EVERSHEIM, W. ;  
HUMBERGER, R. : CAD-Expertensystem-Kopplung – Systemverbund zur wissensbasierten Konstruktion von Baukastenvorrichtungen. VDI-Z-Spezial CAD/CAM, 1993
- [50] FAHRENHOLD, E. ;  
HORBAN, B.A. : A Hybrid Particle-Finite Element Method for Hypervelocity Impact Simulation. In: International Journal of Impact Engineering 23 (1999), Nr. 12, S. 237-248
- [51] FELDHUSEN, J. : Systemkonzept für die durchgängige und flexible Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses. Berlin, Technische Universität, Diss., 1989
- [52] FINKENWIRTH, K. : Fertigungsgerecht Konstruieren mit CAD – Konzept eines Konstruktionssystems zur Informationsverarbeitung mit CAD-Systemen. Erlangen-Nürnberg, Universität, Diss., 1990
- [53] FISCHER, H. : Qualimetrische Bewertung der Unfallsicherheit von Arbeitsmitteln, Arbeitsverfahren und Arbeitsstätten. Seminarband „Arbeitsschutz und Arbeitshygiene“. Dresden, Institut für Arbeitsingenieurwesen, 1980, S. 130-135
- [54] FLAIG, TH. : Sicherheitsgerechtes Gestalten mit Hilfe virtueller Realität. In: Maschinenmarkt 104 (1998), Nr. 33, S. 28-31

- [55] FLAIG, TH. : Virtuelle Realität in der Sicherheitstechnik.  
In: Werkstattstechnik 88 (1998), Nr. 5, S. 247-249
- [56] FRANKE, H.J. ;  
PETERS, M. : Konstruktionsumgebung MOSAIK – eine grafisch-interaktive Benutzeroberfläche zur Integration von Konstruktionswerkzeugen. VDI-Bericht 993.3.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992, S. 175-191
- [57] GAIROLA, A. : Montagegerechtes Konstruieren – Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik.  
Darmstadt, Universität, Diss., 1981
- [58] GOLM, F. : Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1996
- [59] GOMMEL, G. : Stoßuntersuchungen Stahlkugel-Stahlplatte im Zusammenhang mit Strahlmittlezertrümmerung und Strahlverschleiß.  
Stuttgart, Universität, Diss., 1967
- [60] GRABOWSKI, H. ;  
ANDERL, R. ;  
POLLY, A. : Integriertes Produktmodell.  
Berlin: Beuth-Verlag, 1993
- [61] GRABOWSKI, H. ;  
BENZ, T. : Lösungsfindung und Wissensverarbeitung in CAD-Systemen mit integrierten Produktmodellen. VDI-Bericht 775.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989
- [62] GROEGER, B. : Die Einbeziehung der Wissensverarbeitung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1992
- [63] HAARIS, S. ;  
MISCHKOLIN, F. ;  
ZÜLFE, J. : Kopplung eines featurebasierten CAD-Systems mit einem wissensbasierten System.  
In: Zwf 89 (1994), Nr. 10, S. 563-565
- [64] HAGEN, W. ;  
PAUWELS, A. ;  
SUTTORP, W. ;  
WICHERT, O. : Rechnergestützte Arbeitssicherheit – Untersuchung zur Einsatzmöglichkeit eines Kleinrechners zur Bearbeitung der Daten und Einflußgrößen von Unfallereignissen.  
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 483. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1986

- [65] HALE, A.R. ;  
HEMING, B.H.J. ;  
CARTHEY, J. ;  
KIRWAN, B. : Modelling of a Safety Management System.  
In: Safety Science 26 (1997), Nr. 1-2, S. 121-140
- [66] HALLQUIST, J.O. ;  
WHIRLEY, R.G. : DYNA3D User's Manual Rev. 5.  
Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory,  
1989
- [67] HALTER, U. : Workflow-Integration. In: Österle, H.; Vogler, P. [Hrsg.]:  
Praxis des Workflow-Management.  
Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1996, S. 171-198
- [68] HAMBURG, I. ;  
IORDACHE, S. : Integration multimedialer Technologien zur Unter-  
stützung von kooperativen Konstruktionsaufgaben.  
In: Anderl, R.; Encarnacao, J.L.; Rix, J. [Hrsg.]  
CAD `98: Tele-CAD – Produktentwicklung in Netz-  
werken. Fachtagung der Gesellschaft für Informatik,  
Darmstadt, 5./6.3.98, S. 13-21
- [69] HAMOUDA, A.S. ;  
HASHMI, M.S.J. : Modelling the Impact and Penetration Events of Modern  
Engineering Materials: Characteristics of Computer  
Codes and Material Models. In: Journal of Materials  
Processing Technology 56 (1996), Nr. 10, S. 847-862
- [70] HANSEN, F. : Konstruktionswissenschaft - Grundlagen und Metho-  
den. München: Carl Hanser Verlag, 1974
- [71] HASTEDT-MARCK-  
WARDT, C. : Workflow-Management-Systeme - Grundlagen, Stan-  
dards und Trends.  
In: Informatik Spektrum 109 (1999), Nr. 22, S. 99-109
- [72] HEILMANN, H. : Workflow Management: Integration von Organisation  
und Informationsverarbeitung. In: Theorie und Praxis  
der Wirtschaftsinformatik 17 (1994), Nr. 6, S. 8-21
- [73] HEINO, P. ;  
KAKKO, R. : Risk Assessment Modeling und Visualisation.  
In: Safety Science 30 (1998), Nr. 1-2, S. 71-77
- [74] HELLWIG, K.-J. : Fließverhalten von Reinmetallen und austenitischem  
Stahl bei Schlagtorsionsbeanspruchung.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1988

- [75] HENKHAUS, R. : Das Verformungsverhalten ausgewählter Thermoplaste in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit. Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1980
- [76] HESSER, W. ;  
CZYSZ, H.-J. ;  
LUSEBRINK, W. : Stellung der Sicherheitstechnik im EDV-gestützten Konstruktionsprozeß. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 657. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1992
- [77] HÖCK, H.-G. : Dynamisches Werkstoffverhalten bei der Ausbreitung von Beanspruchungswellen. Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1987
- [78] HOFFMANN, M. : Integratives Konstruktionssystem für die kooperative, verteilte Produktentwicklung in multimedialen Konstruktionskonferenzen. Berlin, Technische Universität, Diss., 1999
- [79] HORN, H. ;  
BROCKHAUS, R. : Workflow-Management- und EDM-Systeme. In: Zwf 90 (1995), Nr. 7-8, S. 378-380
- [80] HOSCHEK, J. : Reverse Engineering. Stuttgart: Teubner Verlag, 1996
- [81] HOVDEN, J. : Safety Management System. In: Safety Science 24 (1996), Nr. 2, S. 157-158
- [82] HUBKA, V. : Theorie der Konstruktionsprozesse - Grundlage einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin: Springer-Verlag, 1984
- [83] ILLYES, A. ;  
BAUER, H. : Die Energieumwandlung bei ein- und mehrmaligem Stoß eines Partikels gegen eine feste Wand. VDI Forschungsheft 640/1987. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987
- [84] JÄHN, F. : Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Fließspannungen von metallischen Werkstoffen bei höchsten Dehngeschwindigkeiten. Karlsruhe, Universität, Diss., 1979
- [85] JAGODEJKIN, R. : Instandhaltungsgerechtes Konstruieren. In: Konstruktion 49 (1997), Nr. 10, S. 41-45

- [86] JEDRZEJEWSKI, J. ;  
KOWAL, Z. ;  
KWASNY, W. ;  
MODRZYCKI, W. : Concept of a Global Open System for Designing Intelligent Machine Tools as IMS Modules. In: Proceedings of the XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems. Karpacz, Polen, 12.-17. März 00, S. 197-207
- [87] JENQ, S.T. ;  
MO, J.J. : Ballistic Impact Response for Two-Step Braided Three Dimensional Textile Composite. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. Whistler, Canada, 14.-18. August 1995
- [88] JOHNSON, G.R. ;  
COOK, W.H. : A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics. The Hague, Niederlande, 1983, S. 541-547
- [89] JOHNSON, G.R. ;  
HOEGFELDT, J. ;  
LINDHOLM, U.S. ;  
NAGY, A. : Response of Various Metals to Large Torsional Strains Over a Large Range of Strain Rates. In: Journal of Engineering Materials and Technology 105 (1983), Nr. 2, S. 42-47 und S. 48-53
- [90] KAHMEYER, M. : Recyclinggerechte Produktgestaltung. Würzburg: Vogel-Verlag, 1996
- [91] KERR, J.H. ;  
FAHRENHOLD, E. : Three Dimensional Hypervelocity Impact Simulation for Orbital Debris Shield Design. In: International Journal of Impact Engineering 20 (1997), Nr. 6-10, S. 479-489
- [92] KESSELRING, F. : Die starke Konstruktion. In: VDI-Z 86 (1942), S. 321-333 und 749-752
- [93] KIESEWETTER, T. : Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik. Berlin, Technische Universität, Diss., 1997
- [94] KINZINGER, R. : Eine CAD-Expertensystem-Kopplung - dargestellt am Beispiel der Lösung von Bewegungsaufgaben. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Diss., 1993
- [95] KIVISTÖ-RAHNSTO, J. : Application of PDF-Documents to Machine Safety Design. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety. Barcelona, Spanien, 19.-21. Mai 1999

- [96] KLJAJIN, M. : Instandhaltung beim Konstruktionsprozeß.  
In: Konstruktion 49 (1997), Nr. 10, S. 35-40
- [97] KLOCKE, F. ;  
EVERSHEIM, W. ;  
PFEIFER, T. ;  
WECK, M. : Virtual Engineering – Leistungsfähige Systeme für  
die Produktentwicklung. In: Eversheim, W. [Hrsg.]:  
Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium AWK`99.  
Aachen: Shaker-Verlag, 1999
- [98] KOCH, H. : Arbeitssicherheit kann bewertet werden.  
In: Sicher ist sicher (1975), Nr. 9, S. 388-391
- [99] KOLLER, R. : Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen  
zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte  
mit Beispielen. Berlin: Springer-Verlag, 1994
- [100] KOLLER, R. ;  
MANNWEILER, H.P.: Sicherheitsgerechtes Konstruieren mit Hilfe der elektro-  
nischen Datenverarbeitung. Schriftenreihe der Bundes-  
desanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 346.  
Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1992
- [101] KORMI, K. ;  
ETHERIDGE, R. ;  
WEBB, D.C. : FEM Simulation of the Static and Dynamic Forming of  
Circular Plates. In: Journal of Materials Processing  
Technology 42 (1994), Nr. 4, S. 87-95
- [102] KRABIELL, A. : Zum Einfluß von Temperatur und Dehngeschwindigkeit  
auf die Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte von Bau-  
stählen mit unterschiedlicher Festigkeit.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1982
- [103] KRAUSE, F.-L. : Wandel der Entwicklungsziele für CAD-Systeme. In:  
Krause, F.-L.; Ruland, D.; Jansen, H. (Hrsg.): CAD`92-  
Neue Konzepte zur Realisierung anwendungsorientier-  
ter CAD-Systeme. Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [104] KRAUSE, F.-L. ;  
BEITZ, W. : Produktentwicklung mit Simultaneous Engineering.  
In: Supplement zu Konstruktion 45 (1993), Nr. 5,  
S. 4-11
- [105] KRAUSE, F.-L. ;  
CIESLA, M. ;  
RIEGER, E. ;  
STEPHAN, M. ;  
ULBRICH, A. : Features als semantische Objekte integrierter Prozeß-  
ketten. In: Gausemeier, J. [Hrsg.]: CAD`94 - Produkt-  
datenmodellierung und Prozeßmodellierung als Grund-  
lage neuer CAD-Systeme.  
München: Carl Hanser Verlag, 1994, S. 125-147

- [106] KRAUSE, F.-L. ; Kennzahlengetriebene Optimierung von Entwicklungsprozessen.  
GOLM, F. :  
In: Zwf 90 (1995), Nr. 7-8, S. 372-375
- [107] KRAUSE, F.-L. ; Verteilte, kooperative Produktentwicklung.  
JANSEN, H. ;  
KIESEWETTER, T. :  
In: Zwf 91 (1996), Nr. 4, S. 147-151
- [108] KRAUSE, F.-L. ; iViP – Innovative Technologien und Systeme für die integrierte, virtuelle Produktentstehung.  
KAUFMANN, U. ;  
SCHUMANN, G. ;  
ZIEBEIL, P. :  
In: wt – Werkstattstechnik 89 (1999), Nr. 2, S. 23
- [109] KRAUSE, F.-L. ; Product Modeling.  
KIMURA, F. ;  
KJELLBERG, T. ;  
LU, S. C.-Y. :  
In: Annals of the CIRP 42 (1993), Nr. 2, S. 695-706
- [110] KRAUSE, F.-L. ; Featurebasierte Produktentwicklung.  
KRAMER, S. ;  
RIEGER, E. :  
In: Zwf 87 (1992), Nr. 5, S. 247-251
- [111] KRAUSE, F.-L. ; Potentiale der CAD-Technologie zur Gestaltung simultaner Vorgehensweisen in der Produktentwicklung.  
OCHS, B. :  
VDI-Bericht 865. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991
- [112] KRIWET, A. : Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1994
- [113] KUHLING, H. : Taschenbuch der Physik.  
Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch, 1987
- [114] KUHLMANN, A. : Prognose der Gefahr.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1969
- [115] KUHLMANN, A. : Zur Risiko-Akzeptanz in der Technik.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1979
- [116] KUHLMANN, A. : Einführung in die Sicherheitswissenschaft.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1995
- [117] LANGBEIN, R. : Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit an Hochgeschwindigkeitsschleifmaschinen.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1976

- [118] LAUFENBERG, L. : Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1995
- [119] LEHMANN, W. : Arbeitssicherheit an Drehmaschinen. Berlin, Technische Universität, Diss., 1989
- [120] LINDEMANN, U. ;  
AßMANN, G. ;  
FREYER, B. : Vernetzte Information zur Handhabung von Entwicklungswissen.  
In: Zwf 93 (1998), Nr. 9, S. 386-389
- [121] LINNER, S. : Konzept einer integrierten Produktentwicklung. München, Technische Universität, Diss., 1995
- [122] LUCZAK, H. : Arbeitswissenschaft.  
Berlin: Springer-Verlag, 1993
- [123] LUCZAK, H. ;  
RÖTTING, M. : Balance of Occupational Health and Safety Research in Germany – The Use of WWW-based Tools. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety.  
Barcelona, Spanien, 19.-21. Mai 1999
- [124] LUDWIK, P. : Über den Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungserscheinungen.  
In: Physikalische Zeitschrift 12 (1909), S. 411-417
- [125] MÄÄTTÄ, T. ;  
VIITANIEMI, J. ;  
LEINO, S.-P. : Virtual Reality in Concurrent Engineering and Safety Analysis. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety.  
Barcelona, Spanien, 19.-21. Mai 1999
- [126] MAHERAUCH, E. ;  
VÖHRINGER, O. : Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Belastung.  
In: Werkstofftechnik 9 (1978), Nr. 11, S. 370-391
- [127] MAHFUZ, H. ;  
ZHU, Y. ;  
HAQUE, A. : Investigation of High-Velocity Impact on Integral Armor Using Finite-Element. In: International Journal of Impact Engineering 24 (2000), Nr. 2, S. 203-217
- [128] MATTILA, M. ;  
KIVISTÖ-RAHNSTO, J. : Integration of Information on Safety Standards in Machine Design. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design.  
Prag, 22.-24. August 1997, S. 958-963

- [129] MATTILA, M. ;  
LEPPÄNEN, M. ;  
VÄÄNÄNEN, M. : Computer-Aided Design of Safety and Ergonomics at Flexible Manufacturing Systems. In: Mattila, M.; Karwowski, W. [Hrsg.]: Computer Applications in Ergonomics, Occupational Safety and Health. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992, S. 235-239
- [130] MEERKAMM, H. ;  
LÖFFEL, C. ;  
SCHWEIGER, W. : Integration von Berechnungswerkzeugen in den Konstruktionsprozeß – ein ganzheitlicher Ansatz auf Basis des Konstruktionssystems *mfk*.  
In: Konstruktion 49 (1997), Nr. 1, S. 26-32
- [131] MEERKAMM, H. ;  
WARTZACK, S. : Verkürzung der Prozeßkette – Integration von Wissen in den Konstruktionsprozeß.  
In: Zwf 93 (1998), Nr. 9, S. 395-398
- [132] MEINLSCHMIDT, J. ;  
SPRENZEL, A. : Werkzeugmaschinen rechnerintegriert entwickeln.  
In: Werkstatt und Betrieb 131 (1998), Nr. 4, S. 262-266
- [133] MERTENS, P. : Produktfaktor Information.  
In: Werkstattstechnik 88 (1998), Nr. 3, S. 93-96
- [134] MEWES, D. ;  
TRAPP, R.-P. ;  
WARLICH, H.-J. : Trennende Schutzeinrichtungen.  
In: Materialprüfung 38 (1996), Nr. 9, S. 368-372
- [135] MEWES, D. ;  
TRAPP, R.-P. ;  
WARLICH, H.-J. : Dimensionierung trennender Schutzeinrichtungen an Werkzeugmaschinen.  
In: Werkstattstechnik 89 (1999), Nr. 10, S. 469-472
- [136] MEYER, L.W. : Werkstoffverhalten hochfester Stähle unter einsinnig dynamischer Belastung.  
Dortmund, Universität, Diss., 1982
- [137] MEYNA, A. : Einführung in die Sicherheitstheorie.  
München: Carl Hanser Verlag, 1982
- [138] MEYSENBURG,  
VON, C.M. : Untersuchungen zum Bruchverhalten von Kunststoffen bei Schlagbeanspruchung.  
In: Zeitschrift für Werkstofftechnik 6 (1975), S. 306-314
- [139] MIEZE, G. : Systemsicherheitsanalyse – Erfahrungen bei der Anwendung. In: Raumfahrt – Vorbild für Sicherheitstechnik und Unfallverhütung.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1973

- [140] MILBERG, J. ; KAISER, J. : Parametrisierte Modellbausteine als Grundlage für ein integriertes Produktmodell.  
In: VDI-Z 135 (1993), Nr. 8, S. 98-101
- [141] MOON, Y.M. ; KOTA, S. : A Methodology for Automated Design of Reconfigurable Machine Tools. In: Proceedings of the 32<sup>nd</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems.  
Leuven, Belgien, 23.-25. Mai 1999, S. 297-303
- [142] MOOREN, VAN DER, A.L. : Instandhaltungsgerechtes Konstruieren und Projektieren. Berlin: Springer-Verlag, 1991
- [143] MURPHY, M.J. ; CLINE, C.F. : Modeling of Sock Wave and Dynamic Interactions on PC Based Computers. In: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading.  
Straßburg, 14.-18. Oktober 1991, S. C3-879 – C3-885
- [144] NEITZEL, R. : Entwicklung wissensbasierter Systeme für die Vorrichtungs-konstruktion.  
Aachen, Technische Universität, Diss., 1989
- [145] VAN BRUSSEL, H. ; NEMETH, I. ; FISETTE, P. : Conceptual Design of 3-axis Machine Tools. In: Proceedings of the 32<sup>nd</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems.  
Leuven, Belgien, 23.-25. Mai 1999, S. 239-248
- [146] NEUDÖRFER, A. : Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte.  
Berlin: Springer-Verlag, 1997
- [147] NEUDÖRFER, A. : Konstruktionskatalog trennender Schutz-einrichtungen.  
In: Werkstatt und Betrieb 116 (1983), Nr. 4, S. 203-206
- [148] NICOLAISEN, P. : Entwicklung von Planungshilfsmitteln für Arbeitsschutz-aspekte in automatisierten Produktionssystemen.  
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 650. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1992
- [149] NIETHAMMER, R. ; HENTSCHEL, B. : Produktrecyclinggerechtheit im Konstruktionsprozeß.  
In: VDI-Z 139 (1997), Nr. 7/8, S. 52-55
- [150] N.N. : ABAQUS/EXPLICIT V5.5 Product Brief.  
Pawtucket: Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1996

- [151] N.N. : Anforderungsprofile an Engineering Workflows. Protokoll der 2. Sitzung des Arbeitskreises „Engineering Workflow“ am 17.6.98 in München.  
Paderborn: Unity AG, 1998
- [152] N.N. : Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz: System und Statistik. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 1997
- [153] N.N. : Berliner Kreis. Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V.: Kurzbericht über die Untersuchung „Neue Wege zur Produktentwicklung“.  
Paderborn: Heinz Nixdorf Institut der Universität GH Paderborn, 1998
- [154] N.N. : Draft Federal Information Processing Standards Publication 183: Integration Definition for Function Modeling (IDEFO). National Institute of Standards and Technology, USA, 1992
- [155] N.N. : Expertensystem – Sicherheitstechnische Informationen für den Konstruktionsprozeß schnell verfügbar.  
In: Sicher ist sicher (1994), Nr. 10, S. 534
- [156] N.N. : Expertensystem für Sicherheits- und Risikoanalysen.  
In: TRANS – Technologien zur Anwendung außerhalb der Raumfahrt. Köln: MST Aerospace GmbH, 1997
- [157] N.N. : IGRIP Simulation System – Reference Manual.  
Troy: Deneb Robotics Inc., 1993
- [158] N.N. : Leitfaden Maschinensicherheit in Europa.  
Berlin: Beuth-Verlag, 1996
- [159] N.N. : Marc K7.2 Primer.  
Palo Alto: Marc Analysis Research Corporation, 1998
- [160] N.N. : Mentat II V2.3 User's Guide. Palo Alto: Marc Analysis Research Corporation, 1996
- [161] N.N. : Pro/ENGINEER 20.0 – Modeling Users Guide.  
Engineering Information.  
Waltham: Parametric Technology Corporation, 1998

- [162] N.N. : Sonderforschungsbereich 361: Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozeßgestaltung. Arbeits- und Ergebnisbericht 1996-1998. Aachen, Technische Hochschule, 1998
- [163] N.N. : Waffentechnisches Taschenbuch. Ratingen: Rheinmetall Industrie GmbH, 1977
- [164] OPFERMANN, J. : Untersuchungen zur Fließzonenbildung und zum Bruch von amorphen Plastomeren. Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1978
- [165] OTTENBRUCH, P. : Entwicklung eines Systems zur Unterstützung der Konzept- und Entwurfsphase. Aachen, Technische Universität, Diss., 1989
- [166] OVTCHAROVA, J. ; WEBER, C. ; u.a. : Neue Perspektiven für die Feature-basierte Modellierung. In: VDI-Z 139 (1997), Nr. 3, S. 34-37
- [167] PAHL, G. : Sicherheitstechnik aus konstruktiver Sicht. In: Konstruktion 23 (1971), Nr. 6, S. 201-208
- [168] PAHL, G. ; BEITZ, W. : Konstruktionslehre. Berlin: Springer-Verlag, 1993
- [169] PARK, M.-W. ; CHA, J.-H. ; PARK, J.-H. : An Intelligent Design System for Machine Tools. In: Proceedings of the 32<sup>nd</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Leuven, Belgien, 23.-25. Mai 1999, S. 255-261
- [170] PETERS, O.H. ; MEYNA, A. : Handbuch der Sicherheitstechnik. Band 1: Sicherheit technischer Anlagen, Komponenten und Systeme; Sicherheitsanalyseverfahren. München: Carl Hanser Verlag, 1985
- [171] PRASAD, B. : Concurrent Engineering Fundamentals. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996
- [172] RADANDT, S. ; DEFREN, W. : Sicherheitstechnik im Maschinenbau. München: W. Stutz Verlag, 1975
- [173] RÄSÄNEN, T. ; MIETTINEN, J. ; SIVILL, M. : Safety Information Intranet System for Companies. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety. Barcelona, Spanien, 19.-21. Mai 1999

- [174] RAUPACH, C. : Simulation von Produktentwicklungsprozessen. Berlin, Technische Universität, Diss., 1999
- [175] REIN, H. ;  
DYBOWSKI, G. ;  
UHLIG, CH. : Gestaltung der Schutzhauben und Maschinenumkleidungen bei Rundschleifmaschinen. In: Werkstatt und Betrieb 117 (1984), Nr. 4, S. 225-228
- [176] REINHART, E.J. : Engineered Materials Handbook. Volume 1, Composites. Ohio: ASM International, 1988
- [177] REINHART, G. ;  
WEIßENBERGER, M. : Eigenschaftsoptimierung am virtuellen Prototyp. Integrierter Konstruktionsarbeitsplatz für Werkzeugmaschinen. In: Zwf 92 (1997), Nr. 11, S. 571-574
- [178] REINHART, G. ;  
ZELLER, W. : Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen ist ganzheitlich zu betrachten. In: Maschinenmarkt 104 (1998), Nr. 37, S. 52-57
- [179] RESCHAUER, W. : Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsdurchschlag. München, Technische Universität, Diss., 1994
- [180] REUDENBACH, R. : Neue Rechtsgrundlagen für Maschinen im Europäischen Wirtschaftsraum. Bochum: Verlag Technik & Information, 1995
- [181] RICHTER, M.M. : Wissensbasierte Systeme in der Produktentwicklung - ein Überblick. VDI Bericht 1217. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- [182] RICHTER, R. : Wissensbasierte CAD-Systemkomponente zum Entwurf montagegerechter Produkte. Stuttgart, Universität, Diss., 1990
- [183] RIEGER, E. : Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktgestaltung. Berlin, Technische Universität, Diss., 1994
- [184] RIEWALD, P.G. ;  
FOLGAR, F. ;  
YANG, H.H. ;  
SAUGHNESSY, W. : Lightweight Helmet from a New Aramid Fibre. In: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International SAMPE Technical Conference. Kiamesha Lake, USA, 21.-24. Oktober 91, S. 684-695

- [185] RODENACKER, W. : Methodisches Konstruieren.  
Berlin: Springer-Verlag, 1991
- [186] RÖGNITZ, H. ;  
KÖHLER, G. : Fertigungsgerechtes Gestalten im Maschinen- und  
Gerätebau. Stuttgart: Teubner Verlag, 1959
- [187] ROTH, K. : Grundlagen methodischen Vorgehens beim Konstru-  
ieren. In: VDI-Z 121 (1979), Nr. 20, S. 989-997
- [188] ROTH, K. : Konstruieren mit Konstruktionskatalogen.  
Band 1: Konstruktionslehre.  
Berlin: Springer-Verlag, 1994
- [189] ROTH, K. : Gliederung und Rahmen einer neuen Maschinen-, Ge-  
räte und Konstruktionslehre.  
In: Feinwerktechnik 72 (1978), Nr. 11, S. 521-528
- [190] RUDE, S. : Rechnerunterstützte Gestaltfindung auf der Basis eines  
integrierten Produktmodells.  
Karlsruhe, Universität, Diss., 1991
- [191] SANFT, C. : Entwicklung von Werkzeugmaschinen auf der Basis  
eines integrierten Produktmodells.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1995
- [192] SAREEN, A.K. ;  
SMITH, M.R. : Evaluation of an Analytical Design Tool for Ballistic Dy-  
namics Simulation. In: Proceedings of the MSC World  
User's Conference 1996.  
Newport Beach, USA, 3.-7. Juni, 1996
- [193] SARETZ, B. : Entwicklung einer Methodik zur Parallelisierung von  
Planungsabläufen.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1995
- [194] SCHMIDT, E. : Sicherheit und Zuverlässigkeit aus konstruktiver Sicht.  
Darmstadt, Technische Hochschule, Diss., 1981
- [195] SCHMIDT, H. : Untersuchung der Fließzonenbildung und des mecha-  
nischen Langzeitverhaltens von Thermoplasten.  
Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1970
- [196] SCHMIDT, R.F. : Concurrent Design – Verkürzen von Entwicklungszeiten  
durch paralleles Konstruieren.  
In: Konstruktion 45 (1993), Nr. 4, S. 145-151

- [197] SCHMIDTKE, H. : Lehrbuch der Ergonomie.  
München: Carl Hanser Verlag, 1981
- [198] SCHMITT-THOMAS, K.G. : Metallkunde für das Maschinenwesen. Band I: Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe.  
Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [199] SCHREPPPEL, U. : Zur definierten Ermittlung von Verformungs- und Bruchkennwerten von Metallen bei Impulsbelastung.  
Magdeburg, Technische Hochschule, Diss., 1983
- [200] SCHREYER, G. : Konstruieren mit Kunststoffen. Teil 1: Grundlagen und Eigenschaften, Konstruktionsprinzipien und Anwendungsbeispiel.  
München: Carl Hanser Verlag, 1972
- [201] SCHULZ, H. ;  
HUERKAMP, W. : Sicherheitsanforderungen an Werkzeuge für das Hochgeschwindigkeitsfräsen.  
In: Maschinenmarkt 104 (1998) 5, S. 22-25
- [202] SCHUMANN, G. : Adaptive Planung von Produktentwicklungsprozessen.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1994
- [203] SEEGER, O.W. : Sicherheitsgerechtes Gestalten technischer Erzeugnisse. Berlin: Beuth-Verlag, 1983
- [204] SPECHT, D. ;  
KAUFMANN, U. : Ein Assistenzsystem für die frühen Phasen der Produktentwicklung. In: Zwf 93 (1998), Nr. 9, S. 390-393
- [205] SPUR, G. : Die Genauigkeit von Maschinen.  
München: Carl Hanser Verlag, 1996
- [206] SPUR, G. : Handbuch der Fertigungstechnik. Band 6: Fabrikbetrieb. München: Carl Hanser Verlag, 1994, S. 35-39
- [207] SPUR, G. : Auf dem Weg zur virtuellen Produktentwicklung.  
In: Zwf 92 (1997), Nr. 3, S. 74-75
- [208] SPUR, G. : Erfolgsfaktoren im weltweiten Wettbewerb.  
In: Zwf 90 (1995), Nr. 10, S. 464-465
- [209] SPUR, G. ;  
BOLD, J. : Arbeits- und Gesundheitsschutz bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Teilprojekt: Maschinenkapselungen. Abschlußbericht zum BMFT-Forschungsprojekt ARGUS. Berlin: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin, 1999

- [210] SPUR, G. ;  
BOLD, J. : Gestaltung und Dimensionierung trennender Schutz-  
einrichtungen – Phase II. VDW-Forschungsbericht 0209/1.  
Frankfurt/M.: Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabri-  
ken e.V., 1999
- [211] SPUR, G. ;  
ISING, M. : Gestaltung und Dimensionierung trennender Schutz-  
einrichtungen – Stand der Technik. VDW-Forschungsbe-  
richt 0209. Frankfurt/M.: Verein Deutscher Werkzeug-  
maschinenfabriken e.V., 1997
- [212] SPUR, G. ;  
KRAUSE, F.-L. : Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik.  
München: Carl Hanser Verlag, 1997
- [213] SPUR, G. ;  
KRAUSE, F.-L. ;  
LEHMANN, C.M. : Wissensbasierter Entwurf von Drehmaschinen.  
In: Zwf 82 (1987), Nr. 5, S. 266-270
- [214] SPUR, G. ;  
KRAUSE, F.-L. ;  
MERTINS, K. : Simulationstechnik für Produktentwicklung und Fabrik-  
planung.  
In: Zwf CIM 88 (1993), Nr. 7-8, S. 295-301
- [215] SPUR, G. ;  
LEHMANN, W. : Untersuchungen der Spannsicherheit von Drehfuttern  
und Sicherheitseinrichtungen an Dreh- und Fräsmaschi-  
nen. VDW-Forschungsbericht 0208. Frankfurt/M.: Ver-  
ein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V., 1984
- [216] SPUR, G. ;  
SANFT, C. ;  
SCHÜLE, A. : Ein Konstruktionssystem für Werkzeugmaschinen.  
In: Zwf 87 (1992), Nr. 8, S. 434-438
- [217] SPUR, G. ;  
UHLMANN, E. ;  
ISING, M. : Computer-Aided Design of Machine Tools Complying  
with Safety Principles. In: Proceedings of 32<sup>nd</sup> CIRP  
International Seminar on Manufacturing Systems.  
Leuven, Belgien, 23.-25. Mai 1999, S. 255-261
- [218] SPUR, G. ;  
UHLMANN, E. ;  
ISING, M. : Integrated Product and Process Design of Machine  
Tools. In: Proceedings of the 2000 International CIRP  
Design Seminar.  
Haifa, Israel, 16.-18. Mai 2000, S. 223-228
- [219] SPUR, G. ;  
UHLMANN, E. ;  
ISING, M. : Entwicklung eines rechnerunterstützten Hilfsmittels zur  
Konstruktion von Werkzeugmaschinen. Abschlußbericht  
zum Forschungsvorhaben DFG Sp84/131-4.  
Berlin: Technische Universität, 2000

- [220] SPUR, G. ;  
UHLMANN, E. ;  
METTE, U. ;  
BOLD, J. : Aufpralluntersuchungen an Maschinenkapselungen.  
In: Zwf 94 (1999), Nr. 11, S. 655-659
- [221] STRNAD, H. ;  
VORATH, B.J. : Ein Beitrag zur Gestaltung des systematischen, sicherheitsgerechten Konstruierens.  
In: VDI-Z 121 (1979), Nr. 23/24, S. 1217-1220
- [222] STRNAD, H. ;  
VORATH, B.-J. : Sicherheitsgerechtes Konstruieren: Entwerfen und Konstruieren gefahrenfreier technischer Arbeitsmittel und Anlagen. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1992
- [223] SUH, N.P. : The Principles of Design.  
New York: Oxford University Press, 1990
- [224] SUHM, A. : Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf der Basis von Lösungsmustern.  
Karlsruhe, Universität, Diss., 1993
- [225] TAKALA, J. : A Method for Job Safety and Ergonomics Design and Evaluation of Flexible Manufacturing Systems. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety.  
Tampere, Finnland, 1992
- [226] TEHERANI, I. : Sicherheitstechnische Lösungskataloge – Entwicklung, Aufbau und Gebrauch. Fortschrittsbericht VDI, Reihe 1, Nr. 102. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983
- [227] THOMA, K. ;  
HIERMAIER, S. ;  
KONKE, D. ;  
STILP, A.J. : Computational Simulation of the Hypervelocity Impact of Al-Spherer on Thin Plates of Different Materials.  
In: International Journal of Impact Engineering 20 (1997), Nr. 1-5, S. 363-374
- [228] TIETZE, A. : Über die Möglichkeiten zur Bestimmung eines Sicherheitsgrades komplexer, technischer Systeme. In: Technische Überwachung 17 (1976), Nr. 4, S. 119-122
- [229] TIMOSHENKO, S. ;  
GOODIER, J.N. : Theory of Elasticity.  
New York: McGraw-Hill, 1970
- [230] TISCHENDORF, D. : Fertigungsgerechtes Konstruieren.  
Chemnitz, Technische Universität, Diss., 1992

- [231] TRETTIN, H.D. : System Safety Analysis Methods. In: Space Technology – A Model for Safety Techniques and Accident Prevention. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1973
- [232] UHLMANN, E. ;  
ISING, M. : Rückhaltefähigkeit trennender Schutzeinrichtungen. In: Materialprüfung 41 (1999), Nr. 6, S. 252-257
- [233] VAJNA, S. : Zukunftsperspektiven für CAX-Technologien. In: CAD-CAM Report (1997), Nr. 6, S. 70-78
- [234] WECK, M. : Werkzeugmaschinen Band 2 – Konstruktion und Berechnung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1979
- [235] WECK, M. ;  
DAMMER, M. : Die virtuelle Werkzeugmaschine - Simulation als Hilfsmittel zur effizienten Produktgestaltung. In: Konstruktion 49 (1997), Nr. 3, S. 21-25
- [236] WECK, M. ;  
DAMMER, M. : The Virtual Machine Tool – An Engineering Workbench for Design and Calculation. In: Proceedings of the CIRP Seminar STC Design „New Tools and Workflows for Product Development“. Berlin, 1998, S. 199-210
- [237] WECK, M. ;  
MAYROSE, H.-G. : Sichere Nachrüstung konventioneller Werkzeugmaschinen für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb Nr. 496. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1987
- [238] WECK, M. ;  
MERTENS, R. ;  
SCHUBERT, I. : Sicherheit an Großmaschinen. VDW-Forschungsbericht 0155/1. Frankfurt/M.: Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V., 1993
- [239] WECK, M. ;  
MIEßEN, W. ;  
LANGBEIN, R. : Sicherheit beim Hochgeschwindigkeitsschleifen. In: Die Berufsgenossenschaft (1975), Nr.5, S. 177-182
- [240] WECK, M. ;  
REPETZKI, S. : Ein objektorientiertes Konstruktionswerkzeug. In: VDI-Z-Special CAD/CAM (1992), Nr. 3, S. 32-39
- [241] WEEGE, R.-D. : Recyclinggerechtes Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981
- [242] WEIßHAUPT, H.P. : Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe bei hohen Dehngeschwindigkeiten. Aachen, Technische Hochschule, Diss., 1995

- [243] WELP, E.G. : Planung und Steuerung verteilter Produktentwicklungsprozesse.  
In: Konstruktion 48 (1996), Nr. 10, S. 319-328
- [244] WENDE, A. : Integration der recyclingorientierten Produktgestaltung in den methodischen Konstruktionsprozeß.  
Berlin, Technische Universität, Diss., 1994
- [245] WIENDAHL, H.-P. : Betriebsorganisation für Ingenieure.  
München: Carl Hanser Verlag, 1996
- [246] WINNER, R. ;  
PENNELL, J.P. ;  
BERTRAND, H. ;  
SLUSARCZUK, M. : Concurrent Engineering: An Overview for Autotestcon.  
In: Proceedings of the Autotestcon `89 Conference.  
Philadelphia, USA, 25.-28. September 1989, S. 88-99
- [247] WRIGHT, S.C. ;  
FLECK, N.A. ;  
STRONGE, W.J. : Ballistic Impact of Polycarbonate – An Experimental Investigation. In: International Journal of Impact Engineering 13 (1993), Nr. 1, S. 1-20
- [248] WÜRZ, T. : Sicherheit schnelldrehender Fräswerkzeuge.  
Darmstadt, Technische Hochschule, Diss., 1999
- [249] ZANGEMEISTER, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik.  
München: Wittmannsche Buchhandlung, 1973

### Normen

- [250] EN 292 Teil 1 Sicherheit von Maschinen: Grundsätzliche Terminologie und Methodik. Berlin: Beuth, 1991
- [251] EN 292 Teil 2 Sicherheit von Maschinen: Technische Leitsätze und Spezifikationen. Berlin: Beuth, 1991
- [252] EN 294 Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den oberen Gliedmaßen.  
Berlin: Beuth, 1992
- [253] prEN 811 Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den unteren Gliedmaßen.  
Berlin: Beuth, 1992
- [254] prEN 953 Gestaltung und Konstruktion von trennenden Schutzeinrichtungen. Berlin: Beuth, 1992

- [255] EN 1088 Verriegelungseinrichtungen mit und ohne Zuhaltung.  
Berlin: Beuth, 1995
- [256] EN 12415 Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Kleine numerisch gesteuerte Drehmaschinen und Drehzentren.  
Berlin: Beuth, 2001
- [257] prEN 12417 Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Bearbeitungszentren. Berlin: Beuth, 1996
- [258] prEN 13218 Werkzeugmaschinen - Sicherheit - Stationäre Schleifmaschinen.  
Berlin: Beuth, 1998
- [259] DIN 4000 Sachmerkmal-Leisten, Begriffe und Grundsätze.  
Berlin: Beuth, 1991
- [260] DIN 6763 Nummerung.  
Berlin: Beuth, 1972
- [261] DIN 25419 Teil1 Störfallablaufanalyse. Störfallablaufdiagramme; Methoden und Bildzeichen.  
Berlin: Beuth, 1977
- [262] DIN 25419 Teil 2 Störfallablaufanalyse. Auswertung des Störfallablaufdiagramms mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung.  
Berlin: Beuth, 1979
- [263] DIN 25424 Teil1 Fehlerbaumanalyse. Methode und Bildzeichen.  
Berlin: Beuth, 1981
- [264] DIN 25448 Ausfalleffektanalyse.  
Berlin: Beuth, 1980
- [265] VDI 2220 Produktplanung. Ablauf, Begriffe und Organisation.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980
- [266] VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993
- [267] VDI 2225 Blatt1 Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1977
- [268] VDI 2242 Blatt 1 Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986

- 
- [269] VDI 2242 Blatt 2      Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986
- [270] VDI 2243              Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993
- [271] VDI 2244              Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988

### **Firmenschriften**

- [272] DUPONT FIBRES      KEVLAR.  
GmbH                      Genf, 1993
- [273] RÖHM GmbH            Kunststoff-Sichtscheiben im Maschinenschutz.  
Darmstadt, 1994
- [274] SEGE GmbH            Sicherheitsfenster machen den Unterschied !  
Fellbach, 1997

## 11 Anhang

### 11.1 ASCII-Textdatei *Auswahllisten*

Die ASCII-Textdatei *Auswahllisten* ist in die fünf Bereiche *Baugruppen*, *Werkzeuge*, *Tätigkeiten*, *Phasen* und *Status* unterteilt, **Bild 11-1**. Jeder dieser Bereiche besitzt eine eigene Datenstruktur. Die Gliederung der Datenstruktur wird beispielhaft für den Bereich *Tätigkeiten* demonstriert.

Eingeleitet wird der Bereich durch ein Doppelkreuz (#) und den Bereichsnamen (*Tätigkeiten*). In den dem Bereichsnamen folgenden Zeilen stehen die Bezeichnungen der einzelnen Tätigkeiten (*Aufgabenstellung klären*, *Funktionen ermitteln*, *Lösungsprinzipien festlegen*, ...). Die vor dem Doppelpunkt stehende Tätigkeitsbezeichnung wird in der Auswahlliste angezeigt, die nach dem Doppelpunkt stehende Kurzbezeichnung (aus Platzgründen) im Modellierungssymbol. Produktentwicklungstätigkeiten der ersten Modellierungsebene (z.B. *Module gestalten*; Zeile 35), deren Konkretisierung durch Produktmodellierungsaktionen der zweiten Ebene erfolgen soll, werden nicht durch einen Steuerbefehl (#END1, z. B. Zeile 30) abgeschlossen. Stattdessen stehen in den der Tätigkeit der ersten Modellierungsebene folgenden Zeilen die konkretisierenden Aktionen der zweiten Modellierungsebene (*Informieren*, *Suchen*, *Auslegen*; Zeilen 36, 38, 40).

Gleichermaßen wird bei der Konkretisierung der Produktmodellierungsaktionen der zweiten Ebene durch Aktionen der dritten Ebene verfahren. Diese werden unmittelbar in die den Aktionen der zweiten Ebene folgenden Zeilen geschrieben (*Parameter A ermitteln*, *Sicherheit gegen Dauerbruch S\_D ermitteln*, *Parameter C ermitteln*; Zeilen 41, 43, 52).

Die Beschreibung der notwendigen Schritte zur Ermittlung der jeweiligen Kenngrößen erfolgt in der vierten Modellierungsebene. So sind zur Bestimmung der Kenngröße *Sicherheit gegen Dauerbruch S\_D* u.a. die Schritte *Programm auswählen* (Zeile 44),  $\sigma_{AG}$  *berechnen* (Zeile 46) und  $\sigma_{VA}$  *berechnen* (Zeile 48) erforderlich.

```

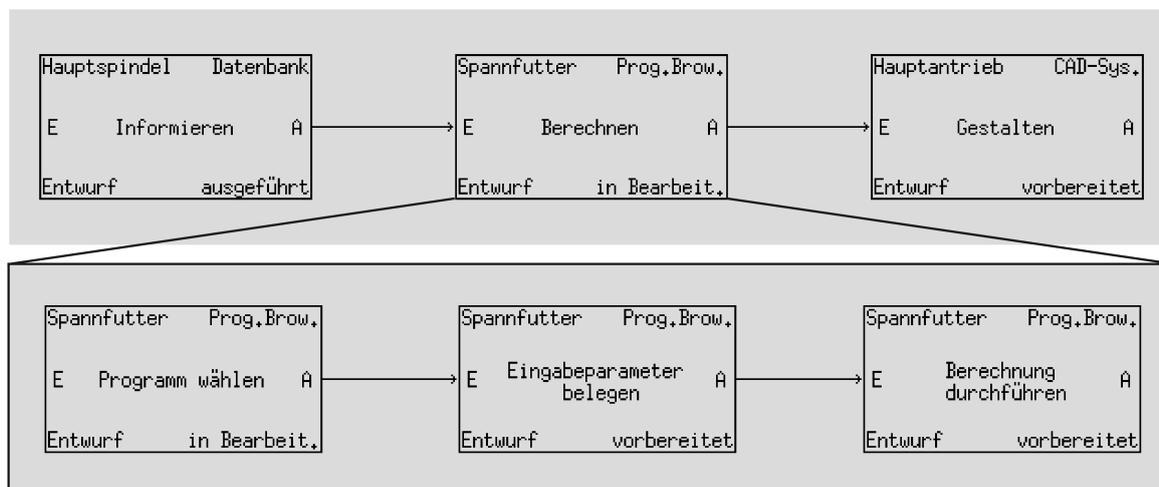
1  #Baugruppen
2  Maschinenbett:Masch.bett
3      Hauptspindeleinheit:H.spind.einh.
4          Hauptantrieb:Hauptantrieb
5          Hauptspindel:Hauptspindel
6          Spannsystem:Spannsystem
7      #END3
8      Vorschubsystem:Vorschubsys.
9          Vorschubantrieb:Vorschubantr.
10         Werkzeugsystem:Werkzeugsys.
11     #END3
12     .
13     #END1
14 #END0
15
16 #Werkzeuge
17 CAD-Bibliothek:CAD-Bibl.
18     #END1
19 CAD-System:CAD-Sys.
20     #END1
21 ProgrammBrowser:Prg.Brow.
22     #END1
23     .
24 #END0
25
26 #Tätigkeiten
27 Aufgabenstellung klären:Aufgabenstellung klären
28     #END1
29 Funktionen ermitteln:Funktionen ermitteln
30     #END1
31 Lösungsprinzipien festlegen:Lsg.prinzipien festlegen
32     #END1
33 Module gliedern:Module gliedern
34     #END1
35 Module gestalten:Module gestalten
36     Informieren:Informieren
37         #END2
38     Suchen:Suchen
39         #END2
40     Auslegen:Auslegen
41         Parameter A ermitteln:Parameter A
42             #END3
43         Sicherheit gegen Dauerbruch S_D ermitteln:
44         Sicherheit gegen Dauerbruch S_D
45         Programm auswählen:Prg. auswählen
46             #END4
47          $\sigma_{AG}$  berechnen: $\sigma_{AG}$  berechnen
48             #END4
49          $\sigma_{VA}$  berechnen: $\sigma_{VA}$  berechnen
50             #END4
51         .
52         #END3
53     Parameter C ermitteln:Parameter C
54         #END3
55     .
56     #END2
57     Gestalten:Gestalten
58         #END2
59 #END1
60 .
61 #Phasen
62 #Status

```

**Bild 11-1:** Aufbau der ASCII-Textdatei *Auswahllisten*

## 11.2 ASCII-Textdatei *Reihenfolgebeziehungen*

**Bild 11-3** stellt beispielhaft für die in **Bild 11-2** dargestellte Entwicklungsprozeßstruktur den Aufbau der ASCII-Textdatei *Reihenfolgebeziehungen* dar. Neben Angaben zu den einzelnen Modellierungsaktionen enthält diese ASCII-Datei Informationen über die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Aktionen.



**Bild 11-2:** Beispielhafte Entwicklungsprozeßstruktur

Jede Produktmodellierungsaktion wird durch eine Identitätsnummer (Zeile 3, 13, 53), eine Positionsangabe (Zeilen 4/5, 14/15, 54/55), durch Angaben zu den Einträgen in den Textfeldern (Zeilen 6 bis 10, 16 bis 20, 55 bis 59) und zu den Reihenfolgebeziehungen (Zeilen 11, 21, 60) charakterisiert. Die Aktionen, die in der nächsten Hierarchieebene detailliert werden, enthalten zusätzlich Angaben zu den konkretisierenden Teilaktionen (Zeile 22 bis 51). Eine Beschreibung des Aufbaus der ASCII-Textdatei *Reihenfolgebeziehungen* erfolgt nachfolgend für das Beispiel der Modellierungsaktion „Spannfutter berechnen“ (Zeile 13 bis 52).

In der jeweils ersten Zeile einer Modellierungsaktion (Zeile 13) steht die Identitätsnummer. Diese Nummer ist eine positive ganze Zahl, die für jedes Modellierungssymbol nur einmal existiert und dazu dient, dieses eindeutig zu identifizieren. Die Identitätsnummer wird beim Erzeugen eines Symbols automatisch generiert.

Die Position eines Symbols in der Zeichenebene des grafischen Editors des Prozeßgestaltungsmoduls wird in den der Identitätsnummer nachfolgenden Zeilen angezeigt. Die x-Koordinate wird in der jeweils zweiten Zeile (Zeile 14), die y-Koordinate in der jeweils dritten Zeile (Zeile 15) dargestellt.

Informationen zu den aktuellen Einträgen in den fünf Textfeldern *Baugruppe*, *Tätigkeit*, *Phase*, *Status* und *Werkzeug* stehen in den Zeilen vier bis acht der Modellierungsaktion (Zeile 16-20). Zeile neun einer jeden Aktion enthält Angaben über die Verbindung zu anderen Symbolen. So bedeutet beispielsweise die Angabe *3n* (Zeile 21), daß die in der gleichen Hierarchieebene folgende Aktion die Aktion mit der Identitätsnummer 3 (Zeile 53) ist.

Falls die jeweilige Aktion durch Teilaktionen der nächsten Hierarchieebene konkretisiert wird, folgen diese Angaben im Anschluß an die Definition der Verbindungen. In diesem Beispiel, bei dem eine Detaillierung der Aktion „Spannfutter berechnen“ durch die Teilaktionen „Programm wählen“, „Eingabeparameter belegen“ und „Berechnung durchführen“ erfolgt, beinhaltet die Aktion mit der Identitätsnummer 2 (Zeile 13 bis 21) demzufolge die Teilaktionen mit der Identitätsnummern 4 (Zeile 22 bis 31), 5 (Zeile 32 bis 41) und 6 (Zeile 42 bis 51).

```
1      #framework, V0.1
2      #
3      1
4      40
5      302
6      Hauptspindel:Hauptspindel
7      Datenbank:Datenbank
8      Informieren:Informieren
9      Entwurf:Entwurf
10     ausgeführt:ausgeführt
11     2n #
12     #END
13     2
14     312
15     302
16     Spannfutter:Spannfutter
17     Programmbrowser:Prg.brow.
18     Berechnen:Berechnen
19     Entwurf:Entwurf
20     in Bearbeitung:in Bearbeit.
21     3n #
22         4
23         163
24         315
25         Spannfutter:Spannfutter
26         Programmbrowser:Prg.brow.
27         Programm wählen:Programm wählen
28         Entwurf:Entwurf
29         in Bearbeitung:in Bearbeit.
30         5n #
31         #END
32         5
33         477
34         315
35         Spannfutter:Spannfutter
36         Programmbrowser:Prg.brow.
37         Eingabeparameter belegen:Eingabeparameter belegen
38         Entwurf:Entwurf
39         vorbereitet:vorbereitet
40         6n #
41         #END
42         6
43         791
44         315
45         Spannfutter:Spannfutter
46         Programmbrowser:Prg.brow.
47         Berechnung durchführen:Berechnung durchführen
48         Entwurf:Entwurf
49         vorbereitet:vorbereitet
50         #
51         #END
52     #END
53     3
54     580
55     302
55     Hauptantrieb:Hauptantrieb
56     CAD-System:CAD-Sys.
57     Gestalten:Gestalten
58     Entwurf:Entwurf
59     vorbereitet:vorbereitet
60     #
61     #END
62     #EOF
```

**Bild 11-3:** Aufbau der ASCII-Textdatei *Reihenfolgebeziehungen*

# Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin

## **Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen**

Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Bilder, 7 Tabellen. 1996. Kartonierte.

## **Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich**

Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Bilder. 1996. Kartonierte.

## **Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien**

Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Bilder, 5 Tabellen. 1996. Kartonierte.

## **Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung**

Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Bilder. 1996. Kartonierte.

## **Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen**

Florian Golm. 173 Seiten, 83 Bilder. 1996. Kartonierte.

## **Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen**

Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Bilder. 1996. Kartonierte.

## **Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur**

Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartonierte.

## **Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen**

Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Bilder, 16 Tabellen. 1996. Kartonierte.

## **Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis**

Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Bilder, 2 Tabellen. 1996. Kartonierte.

## **Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe**

Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Bilder, 17 Tabellen. 1996. Kartonierte.

## **Einführen und Umsetzen von Total Quality Management**

Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Bilder. 1996. Kartonierte.

## **Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte**

Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Bilder, 13 Tabellen. 1996. Kartonierte.

**Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign**  
Jörg Lüddemann, 166 Seiten, 76 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen**  
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer  
Eigenfertigungskomponenten**  
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profil schleifen  
technischer Keramiken**  
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Bilder, 16 Tabellen. 1996. Kartoniert.

**Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur**  
Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Featureintegrierte Fertigungsplanung**  
Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die  
2D-Geometrieinspektion**  
Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Bilder. 1996. Kartoniert.

**Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der  
SMD-Elektronikmontage**  
Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Bilder, 22 Tabellen. 1996. Kartoniert.

**Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality  
Managements**  
Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken**  
Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau**  
Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und  
Breitbandkommunikationstechnik**  
Thomas Kiesewetter, 169 Seiten, 60 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch  
Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)**  
Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Bilder, 7 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung**

Harald Krause, 148 Seiten, 89 Bilder, 27 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management**

Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Bilder, 40 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung**

Detlef Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960**

René Haak, 225 Seiten, 30 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Fertigungsintegrierte Instandhaltung**

Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Bilder, 21 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen**

Peter Merz, 165 Seiten, 78 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren**

Achim Meier, 220 Seiten, 80 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen**

Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Bilder, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Läppen von einkristallinem Silicium**

Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung**

Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen**

Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen**

Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone**

Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Bilder, 19 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe**

Matthias Liebetrau, 200 Seiten, 122 Bilder. 1997. Kartonierte.

**Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien**

Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Flexible On-line-Prozessoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen**

Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Bilder. 1997. Kartonierte.

**Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus**

Henning Müller, 170 Seiten, 62 Bilder. 1997. Kartonierte.

**Prozessmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge**

Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Bilder, 12 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Honen keramischer Werkstoffe**

Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern**

Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Globalisierungspotentiale im Maschinenbau**

Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management**

Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Bilder. 1997. Kartonierte.

**Prozessorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes**

Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Bilder, 25 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen**

Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Bilder, 10 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management**

Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Bilder. 1997. Kartonierte.

**Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte**

Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartonierte.

**Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen**  
Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Bilder, 11 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse**  
Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

**Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen**  
Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Bilder. 1997. Kartoniert.

**Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management**  
Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen**  
Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien**  
Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Bilder, 20 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Gewichts- und Lärminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen**  
Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Prozeß-Benchmarking - Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen**  
Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Bilder, 21 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen**  
Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel**  
Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode**  
Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen**  
Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien**  
Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Bilder, 1 Tabelle. 1998. Kartoniert.

**Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung**  
Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen**  
Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Bilder, 23 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen**  
Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Funkerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant**  
Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Bilder, 10 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen**  
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung**  
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)**  
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen**  
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Konzept eines Modells zur Produktentwicklung**  
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung produktionstechnischer Datenbanken**  
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Bilder, 15 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen**  
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Bilder, 5 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung**  
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Bilder, 21 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption**  
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Bilder. 1998. Kartoniert.

**Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung**  
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Bilder, 13 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim  
Abrasive Wasserstrahl schneiden**

Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Bilder, 20 Tabellen. 1998. Kartoniert.

**Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen**

Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Bilder, 14 Tabellen. 1999. Kartoniert.

**Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von  
Produktionseinrichtungen**

Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 1999. Kartoniert.

**Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken**

Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Bilder, 21 Tabellen. 1999. Kartoniert.

**Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das  
Krankenhauswesen**

Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Bilder, 5 Tabellen. 1999. Kartoniert.

**Steuerungintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen**

Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartoniert.

**Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage**

Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Bilder. 1999. Kartoniert

**Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die  
Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung**

Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Bilder, 27 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Bildanalyse-System zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen**

Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Bilder, 18 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken**

Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Bilder, 53 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Simulation von Produktentwicklungsprozessen**

Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Bilder, 4 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim  
Tiefziehen**

Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Bilder, 2 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze**

Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Bilder, 2 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl**

Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Bilder, 4 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen**

Petrik Ziebeil, 155 Seiten, 44 Bilder, 6 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung**

Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Bilder, 5 Tabellen. 2000. Kartoniert.

**Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik**

Thomas Ardelt, 200 Seiten, 102 Bilder, 19 Tabellen. 2001. Kartoniert.

**Beitrag zum Greifen von Textilien**

Jörg Stephan, 140 Seiten, 100 Bilder, 20 Tabellen. 2001. Kartoniert.

**Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen**

Katrin Müller, 198 Seiten, 1Bild, 117 Tabellen. 2001. Kartoniert.

**Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage**

Alexander Stenzel, 140 Seiten, 66 Bilder, 6 Tabellen. 2001. Kartoniert

**Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung**

Karsten Gessner, 154 Seiten, 39 Bilder, 6 Tabellen. 2001. Kartoniert.

**System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen**

Michael Ising, 200 Seiten, 101 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

**ISBN 3-8167-5890-8**