

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Das Projekt mecPro<sup>2</sup>

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	3
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation</b> .....	5
<b>3</b>	<b>Zielstellung des Projekts mecPro<sup>2</sup></b> .....	13
<b>4</b>	<b>Cybertronische Systeme</b> .....	19
4.1	Definition und Grundlagen .....	19
4.2	Cybertronische Produkte .....	21
4.3	Cybertronische Produktionssysteme .....	21
<b>5</b>	<b>Anwendungsszenarien</b> .....	23
5.1	Anwendungsszenario CTP: Autonomes Einparken .....	23
5.1.1	Aufbau des Anwendungsszenarios CTP .....	24
5.1.2	Ziele des Anwendungsszenarios CTP .....	25
5.2	Anwendungsszenario CTPS: Cybertronisches Produktionssystem für die Zylinderkopfproduktion .....	25
5.2.1	Aufbau des Anwendungsszenarios CTPS .....	25
5.2.2	Ziele des Anwendungsszenarios CTPS .....	27

## Teil II Der mecPro<sup>2</sup>-Referenzentwicklungsprozess

<b>6</b>	<b>Referenzentwicklungsprozess: Grundlagen</b> .....	31
6.1	Vorgehensmodell Prozess- und Potenzialanalyse .....	31
6.1.1	Generelles Setup und Vorbereitung .....	32
6.1.2	Potenzialanalyse .....	34
6.2	mecPro <sup>2</sup> -Prozessrahmenwerk .....	35
6.2.1	Grundlagen und Begriffe .....	35
6.2.2	Anforderungen an das Prozessrahmenwerk .....	36
6.2.3	Prozessrahmenwerk: Aufbau und Struktur .....	39
6.2.4	Anwendung des Prozessrahmenwerks in der Produktentstehung ..	42

<b>7</b>	<b>Referenzentwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme</b>	<b>45</b>
7.1	Herausforderungen in der Entwicklung cybertronischer Systeme	46
7.1.1	Herausforderungen in der Entwicklung cybertronischer Produkte	46
7.1.2	Herausforderungen in der Entwicklung cybertronischer Produktionssysteme	47
7.1.3	Herausforderungen in der integrierten Entwicklung cybertronischer Produkte und Produktionssysteme	48
7.2	Integrierter Referenzentwicklungsprozess auf System- und Disziplinebene	49
7.3	Entwicklungsprozesse für cybertronische Produkte	51
7.3.1	Prozessgebiet Management des Digital Twin	52
7.3.2	Prozessgebiet Kollaboration Management	54
7.4	Entwicklungsprozesse für cybertronische Produktionssysteme	55
7.4.1	Prozessmodul Steuerungs-/Entscheidungslogik planen	56
7.4.2	Prozessmodul Objektgedächtnis planen	58
7.4.3	Prozessmodul Kommunikationsarchitektur planen	59

### **Teil III Die mecPro<sup>2</sup>-Beschreibungssystematik – Modellierung der Systemarchitektur und des Systemverhaltens**

<b>8</b>	<b>Analyse existierender SysML-basierter Ansätze aus Industrie und Forschung</b>	<b>65</b>
8.1	Systemmodellierung	65
8.2	Übersicht bestehender Ansätze zur Nutzung der SysML	66
8.3	Vorgehen zur Bewertung, Analyse und Konsolidierung der Ansätze	68
8.3.1	Anwendungsbeispiel zur Erprobung und Analyse der Ansätze	69
8.3.2	Kriterien der Bewertung	69
8.3.3	Konsolidierung der Ergebnisse und Identifikation relevanter Aspekte	70
<b>9</b>	<b>Aufbau der mecPro<sup>2</sup>-Beschreibungssystematik</b>	<b>73</b>
9.1	Aufbau und Bestandteile der Beschreibungssystematik	73
9.1.1	Das Modellrahmenwerk	74
9.1.2	Profil und Ontologie	78
9.1.3	Views und Viewpoints	81
9.2	Beziehungen und Zusammenspiel zwischen den Bestandteilen der Beschreibungssystematik	81

### **Teil IV Integriertes Modell aus Referenzentwicklungsprozess und Beschreibungssystematik**

<b>10</b>	<b>Integration &amp; CTP-Spezialisierung</b>	<b>87</b>
10.1	Integration von Prozessrahmenwerk und Beschreibungssystematik	87
10.2	Integration des Variantenmanagement	88
10.3	Integration des Konfigurationsmanagement	90
10.4	CTP-Spezialisierung	91

<b>11 Kernelemente für die Zusammenarbeit von CTP-Entwicklung und CTPS-Planung</b>	93
11.1 Vorgehen zur Schnittstellenfindung und Übersicht der Schnittstellen zwischen Produkt und Produktionssystem	94
11.2 Formalisiertes Modell zur Schnittstellenbeschreibung	94
11.2.1 Das Produktmerkmal als Schnittstelle	94
11.2.2 Aktivitäten zur Verwendung der Produktmerkmale im Produktionssystemmodell	96
11.2.3 Rückmeldungen der CTPS-Planung an die CTP-Entwicklung	99
11.2.4 Profil und Bibliotheken	100
<b>12 Modellbasierter Referenzentwicklungsprozess für CTPS in frühen Entwicklungsphasen</b>	103
12.1 Produktionssystemplanung	103
12.2 Einordnung des modellbasierten Referenzentwicklungsprozess für CTPS in den übergeordneten Entwicklungsprozess	106
12.3 Referenzentwicklungsprozess und Beschreibungssystematik für CTPS	107
12.3.1 Kontextebene	107
12.3.2 Verfahrenebene	109
12.3.3 Struktur- & Steuerungsebene	110
12.3.4 Technische Lösungsebene	111
<b>Teil V Modellbildung und Simulation</b>	
<b>13 Modellbildung und Simulation</b>	115
13.1 Simulation und V-Modell	115
13.2 Beziehung zwischen System- und Simulationsmodell	117
<b>14 System- und Multiphysiksimulation in der CTP Entwicklung</b>	119
14.1 Herausforderungen bei der Systemsimulation von CTP	119
14.2 Synchronisationskonzept zwischen System- und Simulationsmodell	121
14.2.1 Zwischenschicht	121
14.2.2 Verknüpfungsglied	122
14.2.3 Zugriffsfunktion	123
14.2.4 Umsetzung im modellbasierten CTP-Entwicklungsprozess	123
14.3 Vorteile des Synchronisationskonzepts	128
<b>15 Materialflusssimulation für die CTPS Entwicklung</b>	131
15.1 Materialflusssimulation in Produktionssystemen	131
15.1.1 Ereignisdiskrete Materialflusssimulation	132
15.1.2 Agentenbasierte Simulation	132
15.2 Konzept: Simulationsframework für CTPS	133
15.2.1 Ableitung des Lösungsansatzes	133
15.2.2 Komponenten zur Abbildung des CTPS-Verhaltens	134
15.2.3 Ablauf der Simulation	134
15.2.4 Anbindung an den modellbasierten Entwicklungsprozess durch automatische Modellgenerierung	137

## Teil VI mecPro<sup>2</sup>-Informationsmodell

<b>16</b>	<b>Das fachliche Informationsmodell von mecPro<sup>2</sup></b>	141
16.1	Ziele des fachlichen Informationsmodells	141
16.2	Grundlagen	141
16.3	Vom fachlichen Datenmodell zur PLM-Implementierung	142
16.4	Das fachliche Informationsmodell von mecPro <sup>2</sup>	143
16.4.1	Modul Basis	143
16.4.2	Modul CTx	144
16.4.3	Modul PRW	146
16.4.4	Modul BS	146
<b>17</b>	<b>Die Implementierung des Informationsmodells in PLM-Systemen</b>	149
17.1	Ziele für die Implementierung	149
17.2	Implementierungspakete	149
17.2.1	Implementierungspaket Klassischer Entwicklungsprozess	150
17.2.2	Implementierungspaket MBSE Entwicklungsprozess	151
17.2.3	Implementierungspaket MBSE Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme	151

## Teil VII PLM und MBSE

<b>18</b>	<b>Funktionen im PDM / PLM</b>	155
18.1	PLM-Funktionen im Überblick	155
18.2	Kurzbeschreibung der PLM-Funktionen	156
<b>19</b>	<b>Verwaltung von Systemmodellen</b>	161
19.1	Kopplungsszenarien	161
19.2	Darstellung von Systemmodellen im PLM-Layer	163
19.3	Containment-Baum als führende Struktur im Systemmodell	164
19.4	Metadaten im PLM und der SysML	165
19.5	Semantische Netze für die Verwaltung von Systemmodellen	166
19.6	Fähigkeitsstufen im PLM-Layer	166
<b>20</b>	<b>PLM-Funktionen im Kontext von Systemmodellen</b>	169
20.1	Herausforderungen des MBSE im Unternehmens- und PLM-Umfeld	169
20.2	Darstellung von PLM-Funktionen im Kontext von SysML-Systemmodellen	170
20.2.1	Arbeitsmanagement	170
20.2.2	Dokumentenmanagement	171
20.2.3	Rechte- und Rollenkonzept	171
20.2.4	Redlining	172
20.2.5	Versionsmanagement	173
20.2.6	Projektmanagement	173
20.2.7	Änderungsmanagement (Engineering Change Management)	174
20.2.8	Freigabemanagement	174
<b>21</b>	<b>Vernetzung von Entwicklungsdaten</b>	177
21.1	Vernetzung von PLM-Objekten direkt im Systemmodell	177
21.2	Vernetzung von Systemmodellen im PLM-System	178

**Teil VIII Demonstratoren**

<b>22</b>	<b>Fokus der Demonstratoren</b>	183
22.1	Zielsetzung der Demonstratoren	183
22.2	PLM-Technologie und -Werkzeuge für MBSE	184
22.2.1	Anwendbare Standards	184
22.2.2	Weiterentwicklungsbedarf für die Kollaboration	185
22.3	Einordnung der zwei Demonstratoren	185
<b>23</b>	<b>Demonstrator 1 – Modellbasierte Entwicklung cybertronischer Produkte</b>	189
23.1	Anwendungsszenario Autonomes Parken	190
23.2	Annahmen zum Demonstrator	191
23.3	Herausforderungen einer praktischen Realisierung	192
23.3.1	Herausforderung 1: Durchgängiges Anforderungsmanagement	193
23.3.2	Herausforderung 2: SysML-Modell(artefakte) im PLM verwalten	194
23.3.3	Herausforderung 3: Simulationsmodell einbinden	194
23.4	PLM-Umgebung, IT-Bebauung und Schnittstellen	196
23.5	Abbildung der mecPro <sup>2</sup> -Konzepte	197
23.5.1	Produktentwicklungsprozess: Prozessrahmenwerk	198
23.5.2	Modellierungsvorgehen: Beschreibungssystematik	198
23.5.3	Integration von Prozessrahmenwerk und Beschreibungssystematik	199
23.5.4	Modelle und Modellmanagement	200
23.5.5	Werkzeuge und Drehbuch	200
23.6	Drehbuch und Implementierung	201
23.6.1	Funktion und Aufbau des Drehbuchs	201
23.6.2	Rollen im Drehbuch	201
23.6.3	Kapitel und Szenen	202
<b>24</b>	<b>Demonstrator 2 – Kollaborative Entwicklung cybertronischer Produkte und Produktionssysteme</b>	209
24.1	Einleitung	209
24.2	Der Kontext des Demonstrators 2	210
24.3	Spezifische Inhalte des Demonstrators 2	212
24.3.1	Szene 1 – Integration der CTP Entwicklung und der CTPS Planung	212
24.3.2	Szene 2 – Planung des Produktionsprogramms	216
24.3.3	Szene 3 – Erste simulative Überprüfung der Produzierbarkeit des zukünftigen Produktionsprogramms	217
24.3.4	Szene 4 – Ableitung erster technischer Verfahren für Fertigung, Montage und Logistik	219
24.3.5	Szene 5 – Alternative Betrachtungen brauchen mehr Simulation	224
<b>25</b>	<b>Gemeinsame Erkenntnislage</b>	227
25.1	Erkenntnisse aus Demonstrator 1	227
25.2	Erkenntnisse aus Demonstrator 2	228
25.3	Schlussbetrachtung zur MBSE-PLM-Integration	229

**Teil IX Ausblick und Erkenntnisse**

**26 Zusammenfassung und Ausblick** ..... 233

    26.1 Model-based Everything ..... 233

    26.2 IT-Unterstützung im modellbasierten Entwicklungsprozess ..... 235

    26.3 System Lifecycle Management und die digitale Transformation ..... 237

**Sachverzeichnis** ..... 241

**Autorenverzeichnis** ..... 245