

**Masterarbeit**

# **MODELLBASIERTES SYSTEMS ENGINEERING EINES PROZESSINTEGRIERTEN PARTIKELANALYSATORS**

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang  
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

**Stefan Steirer**

1810321041

betreut und begutachtet von

DI Johannes Fritz, BSc

Graz, im November 2022



.....  
Unterschrift

## **EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in black ink, reading "Stevia Steh". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Unterschrift

## **DANKSAGUNG**

Meiner Familie, meinen Freunden, meinem Chef, meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich für die moralische Unterstützung und für Rat und Tat von Herzen danken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn DI Johannes Fritz, BSc, der sich immer Zeit für Abstimmungen und Fragestellungen genommen und mich mit konstruktiven Anregungen und hilfreicher Kritik bei der Erstellung der Arbeit unterstützt hat.

## **KURZFASSUNG**

Modellbasierte Ansätze gewinnen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zunehmend an Bedeutung, um Ressourcen zu schonen und Produkte termingerecht auf den Markt zu bringen. Zentral sind in diesem Zusammenhang die Umsetzung von modernem Anforderungsmanagement und die Nutzung bereits entwickelter Module für neue Produkte. Dies kann mit Hilfe von Variationsmanagement und modellbasierten Systems-Engineering-Methoden erreicht werden. Anton Paar entwickelt komplexe Messsysteme für ein breites Anwendungsfeld, etwa die Messung von rheologischen Verhalten oder der Partikelgröße. Ziel der Arbeit ist es, zu untersuchen, inwiefern Variantenmanagement und modellbasierter Systementwurf in den Produktentwicklungsprozess von Messsystemen integriert werden können, um Time-to-Market-Ziele zu erreichen und Entwicklungsressourcen zu sparen. Im ersten Schritt wurden verschiedene Methoden evaluiert, um das beste Verfahren zur Erstellung des Modells eines hochkomplexen prozessintegrierten Partikelanalysesystems zu finden. Basierend auf dem Ergebnis dieser Analyse ergeben sich die verschiedenen Varianten, um identische Komponenten zu finden, die für mehrere Anwendungen wiederverwendet werden können. Dadurch können Ressourcen gespart werden und nachhaltige Entwicklung wird ermöglicht. Darüber hinaus konnten die verschiedenen Varianten des Systems in eine modellbasierte Systems-Engineering-Umgebung integriert werden, um die Vorteile im Vergleich zu veralteten Ansätzen aufzuzeigen. Das Ergebnis belegt, dass State-of-the-Art-Ansätze im Produktentstehungsprozess einen positiven Einfluss auf die Entwicklungsqualität haben. Darüber hinaus zeigt es, dass modellbasierte Methoden auch die Entwicklungszeit positiv beeinflussen können. Durch weitere Untersuchungen können diese Ergebnisse der Masterarbeit verifiziert werden.

## **ABSTRACT**

Model-based approaches within the complete product development process have become more and more essential to save resources and launch products within time. Consequently, it is crucial to implement state-of-the-art requirements engineering to profit from already developed modules for new products. This can be reached by variation management procedures and model-based systems engineering tools. Anton Paar develops complex measurement systems for a broad field of applications such as measuring rheological behavior or the particle size. The aim of the thesis is to investigate the possibility to integrate variation management and model based overall system design into the product development process of measurement systems to achieve time-to-market goals and save important development resources. The first step is to evaluate different methods to find the best procedure to create a model of a highly complex process integrated particle analyzing system. Based on the output of this analysis all different variations are illustrated to find identical components to re-use for more than one application to save important resources and sustainable development. In addition, the different variations of the system are integrated into a Model-Based Systems Engineering environment to illustrate the advantages in comparison to outdated approaches. The result proves that state-of-the-art approaches within the product design process have a positive impact on the development quality. Moreover, it demonstrates that model-based methods can also positively influence the development time. Further investigations will verify the benefit of the master's thesis.

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung .....	1
1.1	Unternehmen .....	1
1.2	Problem- und Aufgabenstellung .....	3
2	Sensortechnologien in der Partikelanalyse .....	4
2.1	Übersicht Partikelmessstechnik .....	4
2.2	Dynamische Bildanalyse .....	6
2.3	Dynamische und elektrophoretische Lichtstreuung .....	7
2.4	Laserbeugung .....	9
3	Grundlagen der prozessintegrierten Messtechnik .....	11
3.1	Anwendungsbereiche .....	11
3.2	Integration in die Prozessanalytik .....	12
4	Grundlagen der Systementwicklung .....	18
4.1	Methoden im Projektmanagement .....	18
4.2	Variantenmanagement in der Produktentwicklung .....	24
5	Systems Engineering im industriellen Umfeld .....	26
5.1	Grundlagen des modellbasierten Systems Engineerings .....	26
5.2	Sprachen für modellbasiertes Systems Engineering .....	32
5.2.1	UML .....	32
5.2.2	SysML .....	32
5.2.3	ModelicaML .....	34
5.2.4	IDEF .....	34
5.2.5	Nutzwertanalyse .....	35
5.3	Werkzeuge für modellbasiertes Systems Engineering .....	38
5.3.1	Enterprise Architect .....	38
5.3.2	CATIA NoMagic .....	39
5.3.3	Eclipse Papyrus .....	40
5.3.4	Nutzwertanalyse .....	40
5.4	Methoden für modellbasiertes Systems Engineering .....	43
5.4.1	SYSMOD .....	43
5.4.2	VAMOS .....	44
5.4.3	FAS .....	45
5.4.4	OOSEM .....	46
5.4.5	Nutzwertanalyse .....	47
6	Modellbasiertes Systems Engineering eines prozessintegrierten Partikelanalysators .....	50
6.1	Marktanalyse prozessintegrierte Partikelmessstechnik .....	51
6.2	Variantenmanagement und Modularisierung .....	54
6.2.1	Erster Schritt: Dekomposition der hierarchischen Produktstruktur .....	55
6.2.2	Zweiter Schritt: Analyse der Komponenten .....	59
6.2.3	Dritter Schritt: Modularisierung .....	62

6.2.4	Vierter Schritt: Überführung in modularisierte Produktstruktur .....	67
6.3	Systemmodellierung .....	69
6.3.1	Gesamtsystem: Modellierung vom Core nach VAMOS .....	69
6.3.2	Gesamtsystem: Modellierung der Varianten nach VAMOS .....	74
6.4	Mehrwertanalyse durch Risikoreduktion .....	79
7	Ergebnisse und Ausblick .....	82
	Literaturverzeichnis .....	83
	Abbildungsverzeichnis .....	85
	Tabellenverzeichnis .....	89
	Abkürzungsverzeichnis .....	90

# 1 EINLEITUNG

Zu Beginn der Arbeit wird das Unternehmen Anton Paar kurz vorgestellt und die Problemstellung beschrieben, um sich in weiterer Folge mit der Arbeit und der Aufgabenstellung identifizieren zu können sowie ein tieferes Verständnis für die Motivation hinter dem Thema zu erlangen und zu verstehen, welchen Mehrwert die Arbeit für das Unternehmen bietet.

## 1.1 Unternehmen

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Anton Paar erstellt und soll unterstützend für den Produktentstehungsprozess in Zukunft eingesetzt werden. Die Firma wurde im Jahr 1922 vom gleichnamigen Firmengründer angemeldet und hat sich von einer Ein-Personen-Schlosserei zu einem international erfolgreichen Unternehmen entwickelt. Der Unternehmenssitz ist in Graz und wird in Abbildung 1 dargestellt. Weltweit ist das Unternehmen in 110 Ländern operativ tätig. Es gibt 33 Vertriebstöchter, 50 Vertriebspartner sowie weitere neun produzierende Unternehmen in Europa und den USA. Aktuell sind weltweit über 3800 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in der Forschung und Entwicklung, Produktion sowie im Vertrieb und Service beschäftigt. Die Besonderheit des Grazer Familienunternehmens besteht darin, dass alle kritischen Komponenten intern gefertigt werden, wodurch die Abhängigkeit zu Lieferanten geringer und die Produktqualität gegeben ist.<sup>1</sup>



Abbildung 1: Anton Paar Headquarter, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022)

---

<sup>1</sup> Vgl. Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022), S. 1 ff.

Am Firmensitz in Graz sind neben der Entwicklung auch die mechanische und elektronische Fertigung, die Glasinstrumentenerzeugung sowie die Gerätemontage ansässig.

In den letzten hundert Jahren hat sich das Unternehmen aus Graz zum Weltmarktführer beim Analysieren der Dichte, Konzentration, Viskosität und Rheologie entwickelt sowie sich mit strategischen Zukäufen und Eigenentwicklungen in neuen Märkten wie der Partikelanalyse positioniert. In Abbildung 2 ist ein Teil der Produkte von Anton Paar dargestellt. Zu sehen ist auch das Dichtemessgerät DMA 5001 das die Dichte in der Einheit  $\text{g/cm}^3$  mit einer Messgenauigkeit von sechs Nachkommastellen messen kann. Dies ist auf eine selbstentwickelte Biegeschwingertechnologie zurückzuführen. Neben der Dichte ist auch das MCR abgebildet, mit dem das rheologische Verhalten, also das Fließverhalten, von Medien bestimmt werden kann. Als Beispiel kann hier Zahnpasta dienen, die zwar unter Druck aus der Tube fließen, jedoch trotzdem an der Zahnbürste haften soll. Eine Vielzahl der Messinstrumente wird auch in der Qualitätskontrolle eingesetzt, wo über eine lange Zeit eine hohe Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit gefordert sind, damit eine Abweichung im Herstellungsprozess sofort erkannt werden kann. Des Weiteren werden die Messgeräte auch in Automation- und Robotiklösungen eingebunden, um Kunden und Kundinnen teil- und komplett automatisierte Anlagen anbieten zu können. Das Tochterunternehmen Anton Paar SportsTec entwickelt und produziert Fußballsimulatoren, mit denen Fußballer und Fußballerinnen ihre Fähigkeiten verifizieren können und die datenbasiert deren Stärken und Schwächen auswerten. So vielseitig wie die Produktpalette sind auch die Kunden und Kundinnen von Anton Paar. Dazu zählen die größten Produzenten von Bier und Softdrinks, Unternehmen aus der Lebensmittelindustrie, Chemie- und Erdölindustrie, Pharmaunternehmen und weltweit führende akademische Einrichtungen.<sup>2</sup>



Abbildung 2: Produktportfolio Anton Paar, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022)

---

<sup>2</sup> Vgl. Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022), S. 1 ff.

## 1.2 Problem- und Aufgabenstellung

Wie bereits in der Vorstellung des Unternehmens erläutert, entwickelt und produziert die Firma Anton Paar Labormessgeräte für verschiedenste Anwendungen wie die Rheologie, Dichtebestimmung oder Analyse von Partikeln. In der vorliegenden Arbeit wird sich mit dem Zweig der Partikelanalyse beschäftigt.

Da das Unternehmen aktuell nur Labormessgeräte für die Partikelanalyse anbietet und der Markt auch prozessintegrierte Lösungen fordert, werden früher oder später auch Partikelanalytoren benötigt werden, die im laufenden Prozess operieren können. Bei diesem Prozess handelt es sich um Herstellungsprozesse in den Bereichen der Pharmazie-, Lebensmittel- oder Farbindustrie.

Da eine Entwicklung neuer Technologien und Produkte viel Zeit, Kosten und personenbezogene Ressourcen bindet, es zudem aktuell erforderlich ist, mit Ressourcen nachhaltig umzugehen, und der dynamische Markt fordert, den Time-To-Market, also eine Produkteinführung, so schnell wie möglich zu erreichen, ist es von Belang, sich mit den neuesten Methoden in der Produktentwicklung auseinanderzusetzen. Eine Herangehensweise, die gerade bei neuen Entwicklungsprojekten eingesetzt werden kann, ist das modellbasierte Systems Engineering. Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, bei dem Anforderungen, Use-Cases, Aktivitäten und die Systemstruktur mit Modellen dargestellt werden, um einerseits eine bessere Übersicht zu generieren und andererseits komplexe Systeme verständlich und abstrakt darstellen zu können. Aufgrund der Tatsache, dass aktuell bei Entwicklungsprojekten noch keine modellbasierten Ansätze im Systems Engineering verwendet werden, diese Methodik aber vielversprechend ist, besteht das Ziel dieser Arbeit in einer Evaluation, ob solche Ansätze in der Entwicklung verankert werden können und welchen Mehrwert sie bringen.

Zu Beginn der Arbeit werden alle theoretischen Grundlagen erarbeitet, um in weiterer Folge modellbasierte Werkzeuge anwenden und diese dahingehend bewerten zu können, welchen Mehrwert sie in der Produktentwicklung bringen. Zusätzlich besteht die Problematik, dass gerade bei Produktfamilien das Variantenmanagement vernachlässigt wird und somit Komponenten oder Baugruppen mit ähnlichen Anforderungen doppelt entwickelt werden, wodurch bedeutsame Ressourcen verloren gehen. Da es bei modellbasierten Methodiken auch Vorgehensweisen für Variantenmanagement gibt, ist ein weiteres Ziel der Arbeit, eine Lösung zu finden, wie Varianten effizient und zielführend dargestellt werden können, um Ressourcen einsparen und die Entwicklungszeit verkürzen zu können. Das übergeordnete Ziel der Arbeit liegt darin, ein System modellbasiert abzubilden, um zu beweisen, dass es möglich ist, im industriellen Umfeld neue Produkte mittels dieser Ansätze darzustellen.

Die Arbeit ist in sechs übergeordnete Teile gegliedert, wobei das erste Kapitel die Einleitung war. Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Sensortechnologie in Bezug auf die Partikelanalyse erarbeitet, um ein grundsätzliches Verständnis zu schaffen. Da das übergeordnete Ziel darin besteht, die Sensortechnologie in laufende Herstellungsprozesse zu integrieren, wird sich im dritten Kapitel mit den Grundlagen der prozessintegrierten Messtechnik befasst. Der theoretische Teil wird im vierten Kapitel mit den relevantesten Themen der Systementwicklung komplettiert. Im fünften und sechsten Kapitel erfolgt eine Darstellung der Auswahl, Bewertung und schließlich Umsetzung eines prozessintegrierten Partikelanalytators mit modellbasierten Methoden. Abschließend werden die Ergebnisse reflektiert und es erfolgt ein Ausblick zu den folgenden Schritten.

## 2 SENSORTECHNOLOGIEN IN DER PARTIKELANALYSE

Um eine Einführung in die Thematik zu ermöglichen und in weiterer Folge die Thematik besser verstehen zu können, wird zu Beginn ein Überblick über das Thema der Partikelanalyse gegeben.

In den folgenden vier Unterkapiteln wird erläutert, was unter Partikeln zu verstehen ist und welche Eigenschaften in der Analyse wesentlich sind. Ebenso werden die drei relevantesten Technologien beschrieben, um deren wesentlichen Eigenschaften zu vermitteln. Dies ist erforderlich, um verstehen zu können, wie komplex die Integration von Sensortechnologien in industriellen Herstellungsprozessen ist und welche Herausforderungen sich dabei ergeben.

### 2.1 Übersicht Partikelmessstechnik

Jede Person ist täglich mit Produkten in Kontakt, deren Inhaltsstoffe zuvor analysiert wurden. Somit wurden auch die Eigenschaften der Partikel wie die Größe, die Form, das Zeta-Potential und auch statistische Aussagen wie die Partikelgrößenverteilung ermittelt.

Grundsätzlich werden Partikel immer in Partikelkollektiven, sogenannten dispersen Stoffsystemen, analysiert. Das Stoffsystem wird in die disperse Phase (die Vielzahl einzelner Partikel) und die kontinuierliche Phase (das Trägermedium und das umgebende Medium) aufgeteilt. Beide Phasen können dabei fest, flüssig oder gasförmig sein. In der Praxis werden Partikel in einer Flüssigkeit wie zum Beispiel Wasser oder Ethanol aufgelöst oder innerhalb eines Gasstroms, meistens Druckluft, analysiert. Zusätzlich wird zwischen Zwei- und Dreiphasensystemen unterschieden. Dreiphasensysteme sind in der Praxis Partikel, dispergiert in einer Flüssigkeit, wobei als dritter Bestandteil Luftblasen durch den Dispergiervorgang entstehen. Hinsichtlich der Partikelgröße bei der dispersen Phase wird zwischen molekulardispersen, kolloiddispersen und grobdispersen Systemen differenziert. In Tabelle 1 sind die drei zuvor genannten Partikelsysteme und deren Partikelgrößenbereich ersichtlich.<sup>3</sup>

System	Partikelgröße
Molekulardisperse Systeme	$< 10^{-9} \text{ m}$
Kolloiddisperse Systeme	$> 10^{-9} \text{ m}$ und $< 10^{-6} \text{ m}$
Großdisperse Systeme	$> 10^{-6} \text{ m}$

Tabelle 1: Partikelgröße in der dispersen Phase, Quelle: Stieß (2009), S. 9.

<sup>3</sup> Vgl. Stieß (2009), S.9 ff.

Bei Partikeln gibt es neben der Partikelgröße auch eine Reihe anderer Eigenschaften, die charakterisiert werden und unterschiedlichste Anwendungen wie etwa in der Farbindustrie, im Pharma-Bereich oder in der Baustoffherstellung finden.<sup>4</sup> Wie in Abbildung 3 ersichtlich, sind Eigenschaften wie Rauigkeit, Formfaktor, Sinkgeschwindigkeit und Geometrie neben der Partikelgröße, angenommen als kugelförmiges Objekt, ebenfalls von Interesse.<sup>5</sup>

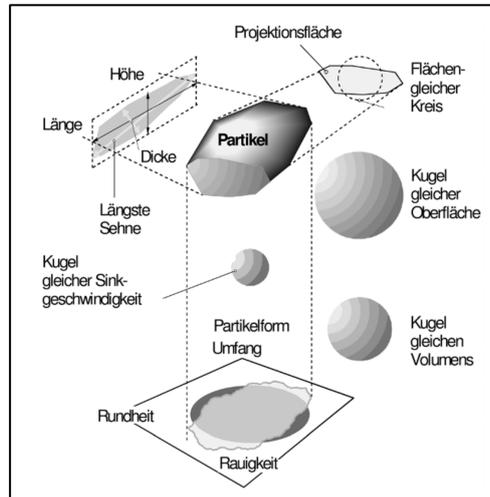


Abbildung 3: Darstellungsarten von Einzelpartikeln, Quelle: Bohnet (2004), S. 17.

In der Partikelmesstechnik gibt es eine Vielzahl von Methoden, die unterschiedlichen Technologien zur Analyse verwenden und sich daher vor allem im Messbereich unterscheiden. In Tabelle 2 sind die wichtigsten und meistverbreiteten Technologien sowie deren Partikelgrößenmessbereich zusammengefasst. Der Bereich der Partikelgröße liegt zwischen einem Nanometer und zehn Millimetern. Da eine Messmethode nicht den ganzen Bereich abdecken kann, wird oft eine Kombination aus Messgeräten in Laboren eingesetzt.<sup>6</sup>

Partikelgröße in $\mu\text{m}$	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	10000
<b>Siebverfahren</b>								
<b>Dynamische Bildanalyse</b>								
<b>Streulichtverfahren</b>								
<b>Sedimentationsverfahren</b>								
<b>Dynamische Lichtstreuung</b>								

Tabelle 2: Aufteilung der Messverfahren, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022), S. 4.

<sup>4</sup> Vgl. Stieß (2009), S. 11 ff.

<sup>5</sup> Vgl. Bohnet (2004), S. 15 ff.

<sup>6</sup> Vgl. Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022), S. 3 ff.

Die drei für diese Arbeit relevanten Messmethoden werden in den Unterkapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 näher erläutert. Dabei handelt es sich um die dynamische Bildanalyse, dem Streulichtverfahren und der dynamischen Lichtstreuung.

## 2.2 Dynamische Bildanalyse

Die dynamische Bildanalyse ist eine der bedeutendsten Technologien in der Partikelmesstechnik und in der Kategorie der abbildenden Verfahren angesiedelt. Dies bedeutet, dass die Größe, Größenverteilung und der Formfaktor mittels Bilderkennung aus aufgenommenen Bildern errechnet werden. Dies hat den Vorteil gegenüber anderen Messtechniken, dass der Benutzer oder die Benutzerin die gemessenen Partikel sieht und somit das Ergebnis nicht abstrakt wirkt, wodurch Vertrauen geschaffen wird.<sup>7</sup>

Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau, dessen relevante Komponenten sind in die Beleuchtungseinheit (Nummer 4 und 5), Bildaufnahmeeinheit (Nummer 5 und 7), Auswerteeinheit (Nummer 8 und 9), Dispergierung (Nummer 1 und 2) und dem Messbereich (Nummer 3 und 6).<sup>8</sup>

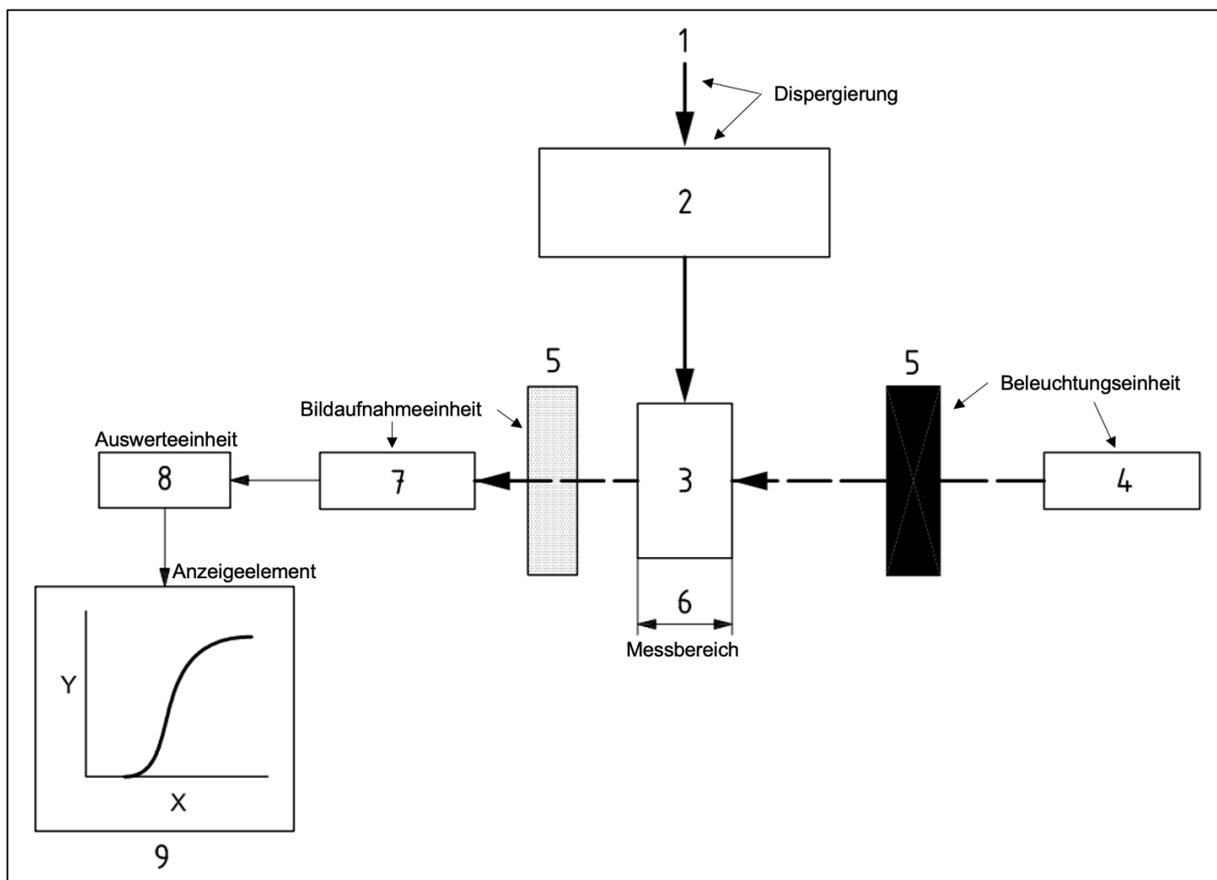


Abbildung 4: Schematische Bildanalyse, Quelle: ISO (Hrsg.) (2006), S. 3.

<sup>7</sup> Vgl. Stieß (2009), S. 175 f.

<sup>8</sup> Vgl. ISO (Hrsg.) (2006), S. 3 ff.

Die Beleuchtungseinheit besteht aus einer Lichtquelle, oft als LED ausgeführt, die die Partikel beleuchtet, und verschiedenen Objektiven, um auch kleinere Partikel vergrößern zu können. Der nächste wichtige Teil ist die Aufnahmeeinheit, die in der Praxis meist in Form einer CCD-Kamera realisiert ist und die Aufgabe hat, Bilder von den Partikeln aufzunehmen. Diese Bilder werden in weiterer Folge an die Auswerteeinheit übermittelt und mit Hilfe einer Bilderkennungssoftware analysiert, woraufhin am Bildschirm Daten wie die Partikelgröße, die Partikelgrößenverteilung, der Formfaktor und Abbildungen der analysierten Partikel angezeigt werden. Die Dispergierung kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden und hat die Aufgabe, Partikelschwarme zu trennen, damit von der Kamera einzelne Partikel aufgenommen werden können und das Ergebnis nicht verfälscht wird. Die Bewegung der Probe durch den Messkanal kann mit verschiedenen Arten erzeugt werden. Entweder mittels durchfließender Flüssigkeit, erreicht durch eine Pumpe oder vom Prozess bereits vorhanden, von einem Gasstrom, wie Druckluft, oder durch freien Fall, bei dieser Methode fallen die Partikel durch den Messkanal durch.<sup>9</sup>

Mit der dynamischen Bildanalyse lassen sich Partikel mit einer Größe von etwa 0,03 mm bis 30 mm analysieren. Aufgrund des weitgehend automatischen Messablaufes ist das Messsystem für die Prozessintegration geeignet. Damit die Messung nicht verfälscht wird, gibt es gewisse Anforderungen, die es zu bedenken und zu berücksichtigen gilt. Beispielsweise müssen eine ausreichend große Anzahl von Partikeln und im besten Fall jede Kornklasse abgebildet werden können. Da die Partikel sehr schnell durch den Messkanal fließen, müssen oft mehrere Bilder ausgewertet werden. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass die Partikel einzeln, also optisch getrennt, abgebildet werden, da ansonsten nicht zwischen Agglomeraten und größeren Einzelpartikeln unterschieden werden kann. Da die Auswertung über Bilderkennungsalgorithmen geschieht, ist es essenziell, dass der Kontrast zwischen dem einzelnen Partikel und dem Hintergrund groß genug ist, um Partikelbegrenzungen auswerten zu können.<sup>10</sup>

### 2.3 Dynamische und elektrophoretische Lichtstreuung

Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Analyse von Partikelsystemen. Neben der dynamischen Bildanalyse sind auch die dynamische und elektrophoretische Lichtstreuung anerkannte Messtechniken zur Charakterisierung von Partikelsystemen im Hinblick auf Partikelgröße bzw. Zeta-Potential. Die genannten Methoden nutzen das Streulicht von bewegten Partikeln, um auf die genannten Messgrößen rückzuschließen. In weiterer Folge wird jedoch nur die dynamische Lichtstreuung näher erläutert, da mit dieser Methode die Partikelgröße bestimmt wird.<sup>11</sup>

Die dynamische Lichtstreuung ist eine optische Methode zur Messung der Partikelgröße in Suspensionen (Stoffgemisch aus einer Flüssigkeit und Partikeln) und Emulsionen (zwei normalerweise nicht mischbare Flüssigkeiten). Das Prinzip der Methode liegt in der Messung des Streulichts und der Streuintensität einer Probe, um einen Mittelwert in definierter Messzeit zu erhalten.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. ISO (Hrsg.) (2006), S. 1 ff.

<sup>10</sup> Vgl. Stieß (2009), S. 176 f.

<sup>11</sup> Vgl. Bellmann/Caspari/Moitz/Babick (2020), S. 50 f.

<sup>12</sup> Vgl. Bellmann/Caspari/Moitz/Babick (2020), S. 54 ff.

In Abbildung 5 ist das Messprinzip abgebildet, wobei ersichtlich wird, dass ein Messsystem grundsätzlich aus einer Lichtquelle, einer Probe, einem Detektor, ausgerichtet mit definiertem Winkel zur Probe, und einer Datenauswertung besteht.<sup>13</sup>

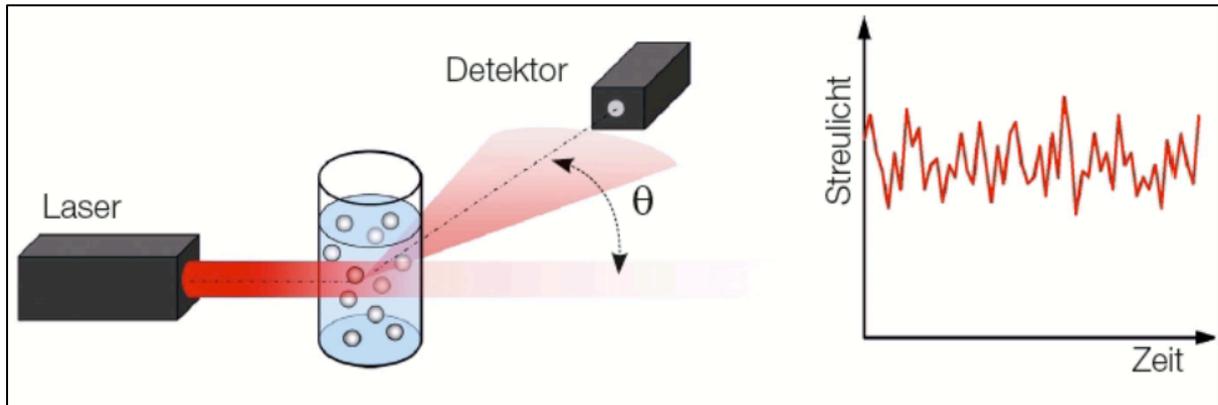


Abbildung 5: Messprinzip der dynamischen Lichtstreuung, Quelle: Bellmann/Caspari/Moitz/Babick (2020), S. 54.

Die Fluktuation der Intensität des Streulichts entsteht durch die Dynamik innerhalb der Probe, ausgelöst durch das Aneinanderstoßen der einzelnen Partikel und Moleküle. Diese Bewegung und das ständige Umrorden der Partikel innerhalb der Probe wird auch Brownsche Bewegung genannt und ist von der Partikelgröße abhängig. Generell haben kleinere Partikel eine höhere Dynamik als größere Partikel und somit auch eine andere Streulichtintensität, mit der sich der hydrodynamische Durchmesser, die Partikelgröße, berechnen lässt. Zur Berechnung wird die umgekehrte Proportionalität des Partikeldiffusionskoeffizienten zur Partikelgröße angewendet, wie in Formel 1 dargestellt.<sup>14</sup>

	$D_p / \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Partikeldiffusionskoeffizient	
	$\mu_{hd} / \frac{\text{s}}{\text{kg}}$	hydrodynamische Mobilität	
$D_p = \mu_{hd} * k_B * T = \frac{k_B * T}{3 * \pi * \eta * x}$	$k_B / \frac{\text{J}}{\text{K}}$	Boltzmann-Konstante ( $1,381 * 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ )	(1)
	T/K	Temperatur	
	$\frac{\eta}{\text{Pa}} * \text{s}$	dynamische Viskosität	
	x/m	Partikelgröße	

<sup>13</sup> Vgl. Bellmann/Caspari/Moitz/Babick (2020), S. 54 ff.

<sup>14</sup> Vgl. Bellmann/Caspari/Moitz/Babick (2020), S. 19 ff.

## 2.4 Laserbeugung

Die nächste weit verbreitete Methode zur Bestimmung der Partikelgröße und in diesem Fall auch zur Berechnung der Partikelgrößenverteilung ist das Streulichtverfahren, auch Laserbeugung genannt. Bei diesem Messprinzip wird der Effekt genutzt, dass die Partikelgröße vom gestreuten Licht auf einem gewissen Winkel abhängig ist. Ein prinzipieller Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt und besteht, wie die beiden anderen bereits genannten Verfahren, aus einer Lichtquelle, der Probe und der Sensorik zur Aufnahme der Messsignale. Die zu messenden Partikel, Nummer 2, können in diesem Fall ähnlich wie bei der dynamischen Bildanalyse in Flüssigkeiten oder Gasen dispergiert werden. Als Lichtquelle dient ein Laser mit definierter Wellenlänge und Leistung. Dieser wird durch eine Sammellinse, Nummer 6, auf eine Transmissionsdiode zur Leistungsbestimmung fokussiert. Das vom Partikel gestreute Licht wird von mehreren Fotodetektoren gemessen, weil es für die spätere Berechnung benötigt. Die Fotodetektoren sind einerseits ein Detektorarray, Nummer 3, und andererseits einzelnen Fotodetektoren, Nummer 4 und 5, die in einem gewissen Winkel positioniert sind, um von Partikel mit gewissen Größenbereichen das Streulicht zu detektieren.<sup>15</sup>

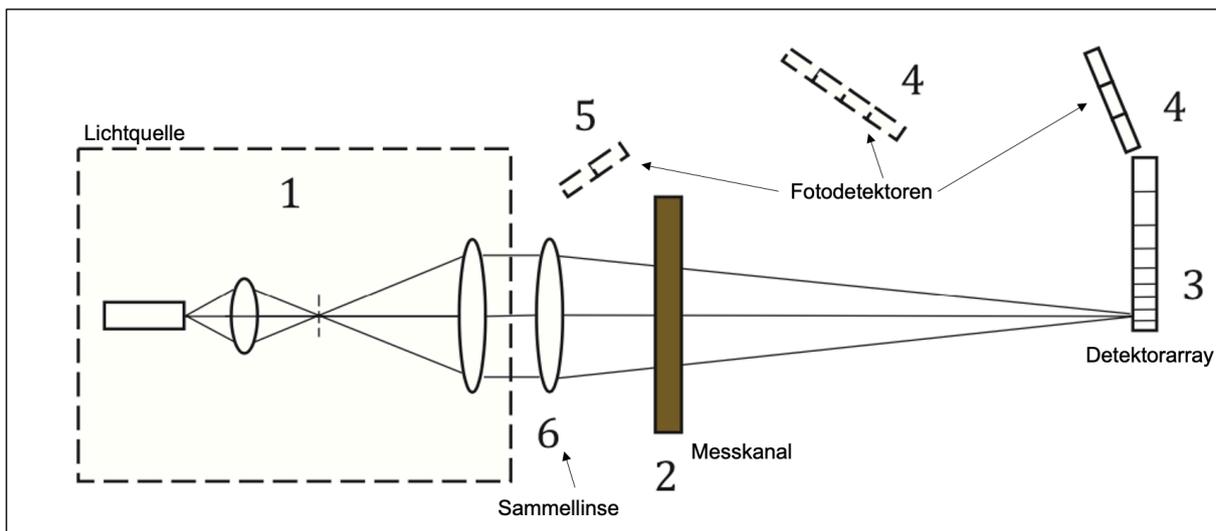


Abbildung 6: Messprinzip der Laserbeugung, Quelle: ISO (Hrsg.) (2022), S. 9.

<sup>15</sup> Vgl. ISO (Hrsg.) (2022), S. 7 ff.

Die unten ersichtliche Formel bildet die Grundlage zur Berechnung der Partikelgröße. Die Streulichtintensität im Verhältnis zur Referenzintensität, gemessen mit der Transmissionsdiode, ist abhängig vom Streuwinkel, der Wellenlänge und der Partikelgröße.

$$\frac{I}{I_0} = F(\theta, \Phi, n, \lambda, d) \quad (2)$$

$I/\frac{W}{m^2}$	Streulichtintensität
$I_0/\frac{W}{m^2}$	Referenzintensität
$\theta/\text{rad}$	Streuwinkel
$\lambda/\text{m}$	Wellenlänge
$d/\text{m}$	Partikelgröße

Bei der Laserbeugung ist eine Justage vom Messsystem notwendig, da dem Gerät beigebracht werden muss, welches Streumuster die verschiedenen Partikelgrößen erzeugen. Dazu werden meist polydisperse Proben verwendet. Hierbei handelt es sich um Partikelsysteme mit verschiedenen Partikelgrößen, die in vielen verschiedenen Winkeln streuen. Allgemein kann gesagt werden, dass größere Partikel eher auf kleine Winkel Licht streuen und kleine Partikel eher auf größere Winkel. In Abbildung 7 sind zwei beispielhafte Streumuster dargestellt, wobei der am rechten Teil des Bildes abgebildete Partikel zirka doppelt so groß ist wie jener am linken Teil.<sup>16</sup>

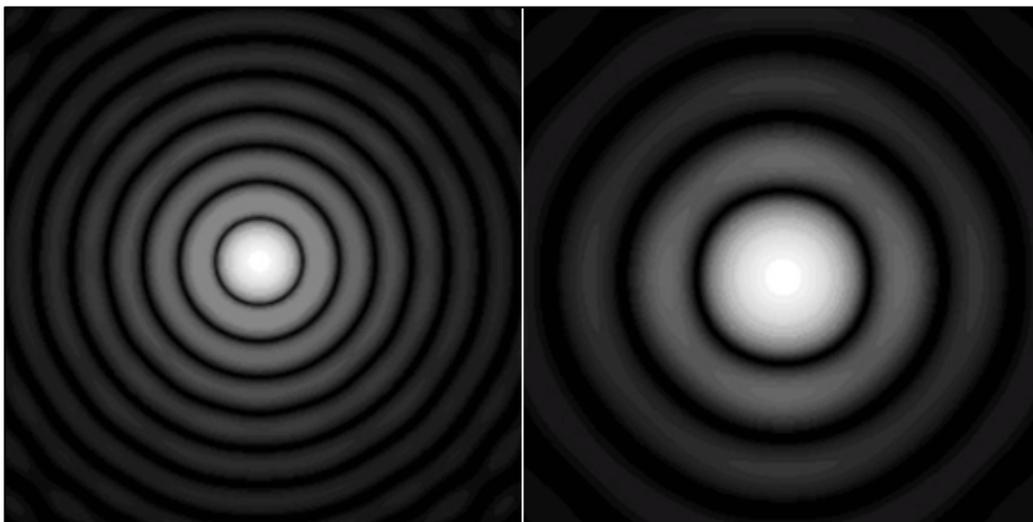


Abbildung 7: Vergleich zwei verschiedener Größenklassen, Quelle: ISO (Hrsg.) (2009), S. 6.

<sup>16</sup> Vgl. ISO (Hrsg.) (2009), S. 6 ff.

### 3 GRUNDLAGEN DER PROZESSINTEGRIERTEN MESSTECHNIK

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Prozessanalytik erläutert, um einen Überblick über die Messtechnik zu erhalten und in weiterer Folge den Praxisbezug im Anforderungsmanagement und in der modellbasierten Umsetzung besser verstehen zu können. Das Thema der Prozessintegration umfasst neben der Partikelanalyse auch eine Reihe anderer Messtechnologien, die in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt werden, da der Fokus hier auf der Entwicklung von Partikelanalysatoren liegt.

Die Integration der Messtechnik direkt in den industriellen Herstellungsprozess bringt eine Vielzahl von Vorteilen mit sich:<sup>17</sup>

- Reduktion der Sicherheitsrisiken
- Geringere Umweltbelastung
- Zielgenaue Produktion nach definierten Eigenschaften
- Kosteneffiziente Produktion durch optimierte Prozesse
- Höhere Produktqualität aufgrund von genauerer Kontrolle
- Vorausschauende Wartung

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein Anwendungsgebiet der prozessintegrierten Messtechnik in Bezug auf die Anwendung der Partikelcharakterisierung dargestellt. Danach wird die Integration der Messtechnik in Prozessen erläutert. In diesem Unterkapitel wird auch auf die Probennahme hingewiesen. Nachdem Kommunikation und Vernetzung ein immer bedeutenderes Thema in der Industrie sind, werden nach der Integration der Prozessmesstechnik die Vernetzungsarten und Kommunikationsmöglichkeiten einer Anlage erarbeitet. Dies ist erforderlich, um die Anforderungen an das Produkt definieren zu können. Vervollständigt wird das Kapitel mit einer Analyse des Marktes und bereits vorhandenen Lösungen für die Prozessanalytik.

#### 3.1 Anwendungsbereiche

Die Prozessanalyse, also das Analysieren einer Messgröße im laufenden Prozess, findet in einer Vielzahl von verschiedenen Industrien Anwendung und ist aufgrund von wirtschaftlichen Vorteilen für die Anwender aus der Messtechnik nicht wegzudenken. Wie bereits erwähnt, werden verschiedenste Messmethoden verwendet und die Prozessanalyse ist nur ein Teilbereich in der Prozessanalytik. Es werden drei Anwendungsbeispiele dargestellt, die auch für die Partikelanalyse von Interesse sind und bei denen die Charakterisierung von Partikeleigenschaften unentbehrlich ist.

##### **Beispiel: Chemische Industrie**

In der chemischen Industrie, ähnlich wie bei anderen Anwendungsgebieten, ist eine schnelle, zuverlässige, reproduzierbare und richtige Analyse im Prozess eine Anforderung.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. Kessler (2006), S. 34 f.

<sup>18</sup> Vgl. Koch (1997), S88 f.

Von Relevanz in der chemischen Industrie ist es, nicht gewünschte Reaktionsprodukte zu verhindern, um die Produktqualität einzuhalten. Dies wird mit immer engeren Spezifikationsgrenzen erreicht, jedoch können diese Spezifikationen nur mit komplexen Messinstrumenten und Algorithmen in der Auswertung erfüllt werden. Die Variationsbreite der Proben ist hoch und das Ziel besteht darin, vom Menschen durchgeführte Qualitätskontrollen gänzlich abzulösen, um Gesundheitsrisiken zu minimieren. Bei chemischen Prozessen wird zwischen kontinuierlichen, halbkontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozessen unterschieden, die sich auf die Anforderungen an das Messinstrument auswirken. Die chemische Grundstoffherstellung ist in der Kategorie der stabilen kontinuierlichen Prozesse angesiedelt. Hier sind Messungen mit hohen Wiederholungsraten meist nicht notwendig. In der Herstellung von Reaktionsmischungen (Mischungen von Chemikalien) sind meist wesentlich kürzere Messintervalle notwendig, da sich Zusammensetzung und Zustand rapide ändern können. Grundsätzlich gilt gerade in der chemischen Industrie, dass bei kontinuierlichen Prozessen, also dort, wo es keine Änderungen an der Chemikalie gibt, der Messbereich eng und die Empfindlichkeit groß sein sollte. Bei nicht kontinuierlichen Prozessen ist es genau umgekehrt: Es besteht eine hohe Anforderung an die Sensor-Dynamik und dafür ein wesentlich breiterer Messbereich. Die Aggregatzustände können fest, flüssig und gasförmig sein und es kann auch zu mehrphasigen Stoffsystemen kommen. Zusätzlich sind die Anforderungen an die mechanische Robustheit gegenüber den eingesetzten Chemikalien sehr hoch und hängen von der Probe ab. Es kann auch zu hohen Drücken und Temperaturen kommen. Dies hat zur Folge, dass das System gegenüber Explosionen abgesichert sein muss, und auch die Temperatur muss kontinuierlich überwacht werden. Die Partikelanalyse findet ihre Anwendung in der Analyse der Partikelgröße und deren Verteilung innerhalb der chemischen Industrie. In der Farbindustrie ist auch das Zeta-Potential der Partikel, also das Potential an der Oberfläche, von Interesse, da diese Messgröße einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Partikel im Stoffsystem hat.<sup>19</sup>

### 3.2 Integration in die Prozessanalytik

Die Integration von Messsensoren in die Prozessanalytik ist von mehreren Faktoren abhängig und kann sich von Anlage zu Anlage stark unterscheiden. Im Wesentlichen sind die Probe, der gewünschte Automatisierungsgrad, die Komplexität der Anlage und die angestrebte Prozessqualität für die Auslegung der Prozessanalytik und der notwendigen Messgrößen verantwortlich.

Die Probe im Prozess kann drei Aggregatzustände besitzen. Sie kann flüssig, gasförmig und pulverförmig, also fest, sein. In der Analyse von gasförmigen Proben wird die Partikelcharakterisierung aktuell selten in der Praxis eingesetzt. Gleiches gilt für die Labormessgeräte, weshalb sie nicht näher erläutert wird. Neben der Probe ist es von großer Bedeutung, wie hoch der Automatisierungsgrad des Prozesses sein sollte. Hier wird zwischen *inline*, *online*, *atline* und *offline* unterschieden. In Abbildung 8 sind die Arten der Integration in die Prozessanalytik dargestellt.<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> Vgl. Kessler (2006), S. 475 ff.

<sup>20</sup> Vgl. Koch (1997), S. 17 ff.

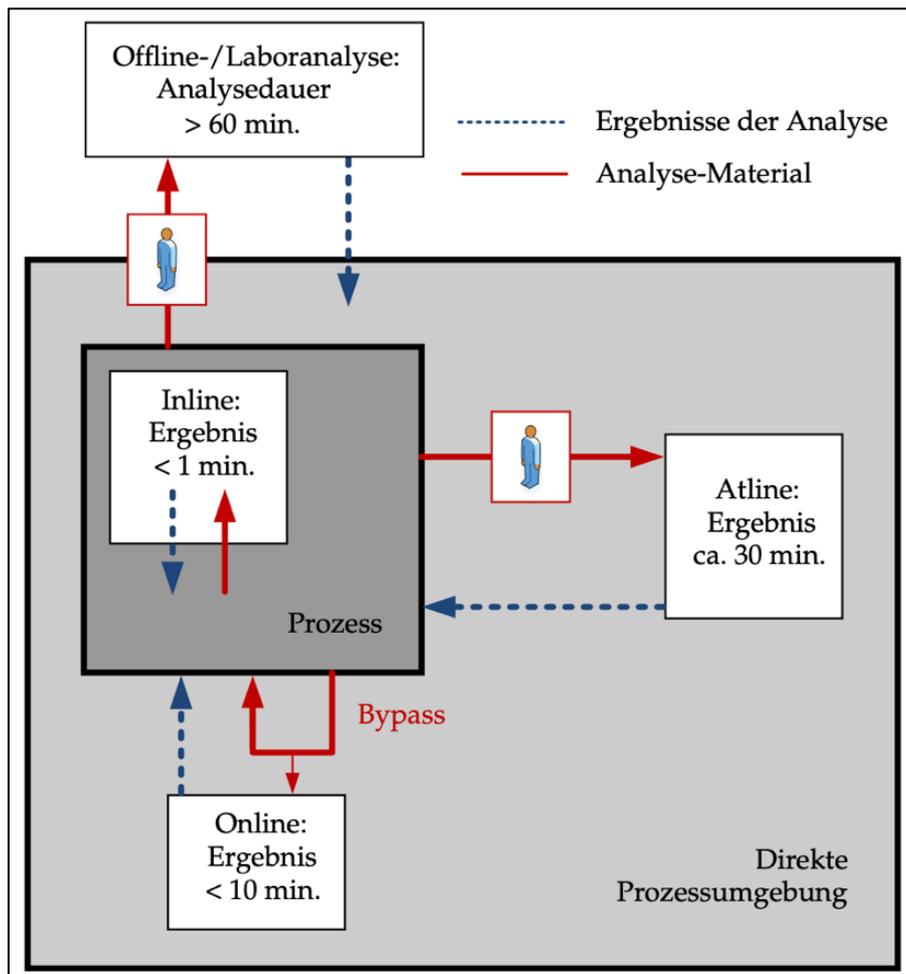


Abbildung 8: Arten der Prozessanalytik, Quelle: Vraetz (2018), S. 8.

In Abbildung 8 sind die vier Arten der Prozessintegration ersichtlich. Das Offline- und das Atline-Messverfahren benötigen im Gegensatz zum Inline- und Online-Verfahren einen Mitarbeiter oder eine Mitarbeiterin, der oder die die Messung durchführt. Offline bedeutet eine manuelle Probennahme sowie den Transport der Probe in ein Messlabor außerhalb der direkten Prozessumgebung zur Analyse und Auswertung. Dies hat eine lange Analysedauer wie auch eine geringe Messfrequenz zur Folge. Das Atline-Verfahren ähnelt dem Offline-Verfahren, jedoch mit dem Unterschied, dass sich hier das Messlabor innerhalb der direkten Prozessumgebung befindet, wodurch wertvolle Zeit in der Analyse eingespart werden kann. Die Messung der Probe erfolgt bei beiden manuellen Methoden mit einem Labormessgerät. Bei der Online-Analyse wird mittels automatisierter Probennahme über einen Bypass die Probe in das Sensorsystem geführt und analysiert. Nach der Messung wird die Probe entweder zurück in den Prozess geführt oder entsorgt. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse wird der Prozess automatisiert gesteuert und aufgrund der Messung im Prozess ist die Zeit, die für den Informationsgewinn der Analyse benötigt wird, geringer als die Zeit, in der sich die Eigenschaft des Prozesses ändert. Die Inline-Messung ist, ähnlich wie die Online-Messung, im Prozess integriert, jedoch mit dem Unterschied, dass bei der Inline-Analyse der Sensor im Materialstrom integriert ist und somit eine sehr hohe Messfrequenz erreicht werden kann.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Vgl. Vraetz (2018), S. 6 ff.

In Tabelle 3 sind die jeweiligen Charakteristika der vier verschiedenen Arten zusammengefasst.

	Messfrequenz	Analysedauer	Automatisierung	Service	Integrationskosten
<b>Offline</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig
<b>Atline</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig
<b>Online</b>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch
<b>Inline</b>	Hoch	Niedrig	Hoch	Mittel	Hoch

Tabelle 3: Prozessanalytik-Methoden Vor- und Nachteile, Quelle: Eigene Darstellung

Die Probennahme, die Integration in den Prozess, der Messablauf, die Messfrequenz und der Messsensor hängen stark von der Probe ab, genauer davon, ob die Probe oder das Medium gasförmig, flüssig oder fest ist. Des Weiteren hängt der gesamte Aufbau von der Partikelgröße, der Probenart und vielen weiteren Parametern ab, die im ersten Schritt jedoch nicht genauer erläutert werden. Nachdem die Analyse bei der Offline- und Atline-Variante mit Labormessgeräten durchgeführt wird, erfolgt bei diesen beiden Varianten keine Integration in den Prozess. Somit werden für die Prozessanalytik, also die direkte Integration in den Prozess, nur das Inline- und Online-Verfahren näher betrachtet und erläutert. Zu beachten ist gleichwohl, dass die Probennahme aus dem Prozess trotzdem gewährleistet sein muss, da die Probe aus dem Prozess stammen muss. Die Analyse, in der Prozessanalytik oder auch in der Labormesstechnik, von gasförmigen Medien ist in vielen Anwendungen notwendig und unerlässlich. Ein Beispiel hierfür ist die kontinuierliche Analyse von Abgasen bei Kraftwerken, Turbinen oder Öfen, um die optimale Fahrweise erzielen zu können. Die Probennahme für die Online-Messung ist im gasförmigen Aggregatzustand im Vergleich zu fest und flüssig einfach. Es muss im Wesentlichen darauf geachtet werden, dass die Entnahme der Probe bei laminarer Strömung, also ohne Turbulenzen, erfolgt. Unterschieden wird dabei zwischen der Probennahme über ein Bypass-System und einer Stichleitung direkt vom Prozess, wie in Abbildung 9 dargestellt.<sup>22</sup>

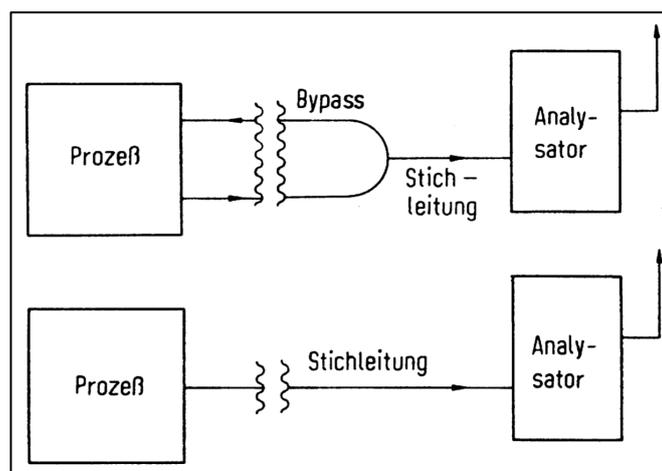


Abbildung 9: Prinzip der Probennahme bei gasförmigen Medien, Quelle: Koch (1997), S. 20.

<sup>22</sup> Vgl. Koch (1997), S. 17 ff.

Der Probenstrom wird mittels einer Entnahmesonde aus dem produktführenden Prozess oder dem Behälter entnommen und über eine Stichleitung dem Analysegerät zugeführt. Die Sonde ist über einen Flansch mit dem Entnahmestutzen auf der Rohrleitung oder dem Behälter befestigt.<sup>23</sup>

In Abbildung 10 ist ein Schema der Probennahme bei gasförmigem Aggregatzustand dargestellt.

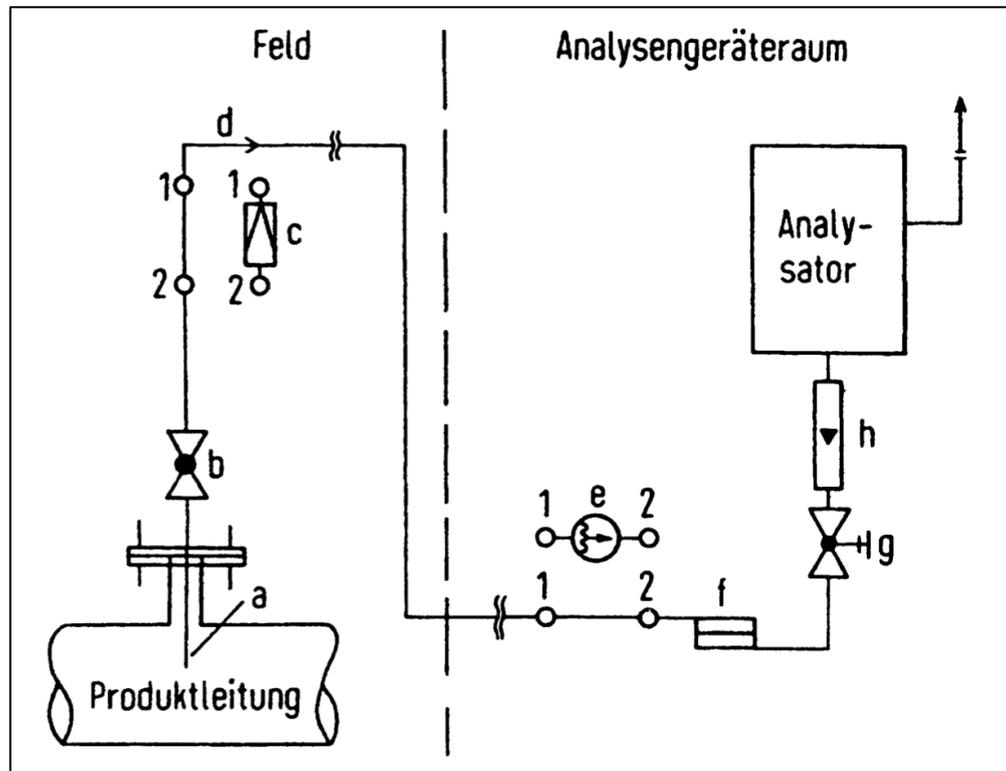


Abbildung 10: Schema der Probenentnahme bei gasförmigen Proben, Quelle: Koch (1997), S. 21.

Abhängig vom Druck im Prozess oder Behälter wird entweder ein Druckminderer oder eine Förderpumpe verwendet, um den gewünschten Druck für die Analyse zu erhalten. Nach der Analyse wird die entnommene Probe entweder entsorgt oder dem Prozess zurückgeführt. Bei der Inline-Analyse ist eine Probenahme nicht notwendig, da der Sensor direkt integriert ist. Essenziell beim Inline-Verfahren ist jedoch, dass die Probe messbar ist und nicht zum Beispiel mit zu viel Druck am Sensor vorbeigefördert wird, da somit die Messung verfälscht würde. Zusätzlich enthält die Entnahmeleitung ein Ventil, die Sonde, einen Filter und einen Strömungsmesser.<sup>24</sup>

Die Probennahme im flüssigen Aggregatzustand gestaltet sich grundsätzlich ähnlich wie im gasförmigen Zustand, wenn es sich um sogenannte echte, nicht vermischte Lösungen handelt. Sollte es sich um Emulsionen, Feststoffe in Flüssigkeiten oder mehrphasige Systeme handeln, ist die Probennahme komplexer, da gewährleistet werden muss, dass eine Probe entnommen und gemessen wird, die für eine größere Menge repräsentativ ist.<sup>25</sup>

<sup>23</sup> Vgl. Koch (1997), S. 17 ff.

<sup>24</sup> Vgl. Koch (1997), S. 20 ff.

<sup>25</sup> Vgl. Koch (1997), S. 41 f.

In Abbildung 11 ist der schematische Aufbau eines Bypass-Systems für die Inline-Analyse dargestellt.

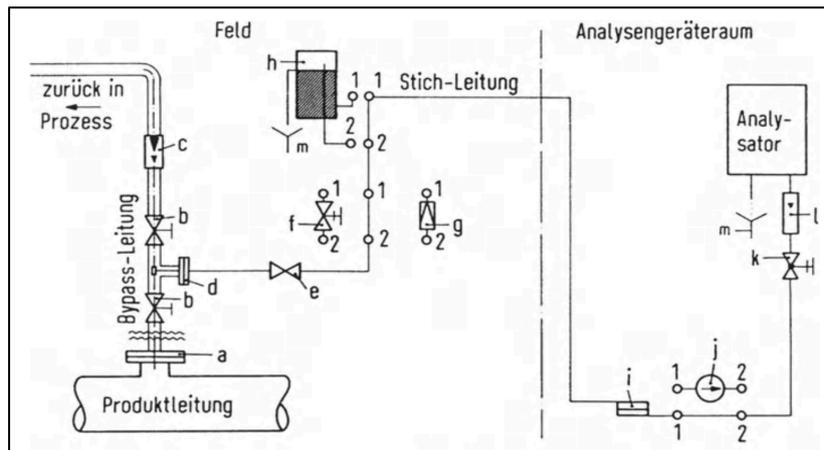


Abbildung 11: Schema der Probenentnahme bei flüssigen Proben, Quelle: Koch (1997), S. 42.

Mittels eines Entnahmestutzens wird die Bypass-Leitung mit der Prozessleitung verbunden und über Ventile entweder in die Stichleitung geführt oder wieder zurück in den Prozess gefördert. Über eine Entnahmesonde wird die Probe für die Analyse aus der Bypass-Leitung entnommen und über Ventile, Filter, Druckminderer oder Förderpumpen zum Analysator geleitet. Wie die Probenentnahme, der Transport zum Analysegerät oder die Probenaufbereitung umgesetzt wird, hängt jeweils von der Probe ab. Manche Proben, wie zum Beispiel Kakaobutter, müssen temperiert werden, damit der Prozess nicht gestört wird. Andere Proben müssen hingegen vor der Messung erneut dispergiert werden, um eine ordentliche Messung durchführen zu können. Bei Inline-Systemen ist keine Probenentnahme notwendig, da der Sensor im Prozess integriert ist, wie in Abbildung 12 schematisch dargestellt.<sup>26</sup>

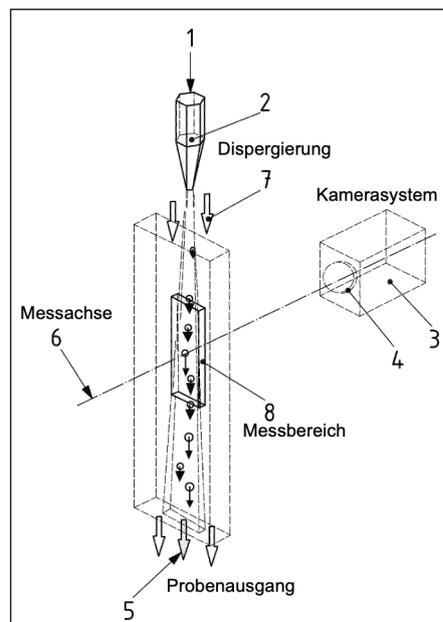


Abbildung 12: Schema für Inline-Analyse, Quelle: S. ISO (Hrsg.) (2006), S.16.

<sup>26</sup> Vgl. Koch (1997), S. 41.

Der dritte Aggregatzustand in der Prozessanalytik ist der Feststoff. Dieser nimmt im Vergleich zu flüssigen und gasförmigen Proben jedoch eine untergeordnete Rolle ein, da gerade in der chemischen Industrie die Aggregatzustände flüssig und gasförmig gängiger sind. Es gibt dennoch einige Anwendungen, zum Beispiel in der Baustoffherstellung, bei denen ausschließlich Feststoffe analysiert werden müssen. Bei der Probenahme in Online-Systemen muss berücksichtigt werden, dass Feststoffproduktströme eine räumliche Inhomogenität aufweisen. Dies bedeutet, dass die einzelnen Feststoffe nicht gleichmäßig verteilt sind und es zu Analysefehlern kommen kann, wenn dies bei der Probenahme nicht berücksichtigt wird. Diesem Effekt kann mit mehreren Methoden entgegengewirkt werden. So können beispielsweise Proben von mehreren Stellen gezogen und vor der Analyse vermengt werden. Um diesem systematischen Fehler entgegenzuwirken, muss ein automatisiertes Probenentnahmesystem für Feststoffe gewisse Kriterien erfüllen. In Abbildung 13 ist ein Beispiel für die Probenentnahme dargestellt. Hier befördert der Abstreifer (Nummer 4) die Probe von der Fördertechnik in den Messbereich (Nummer 5).<sup>27</sup>

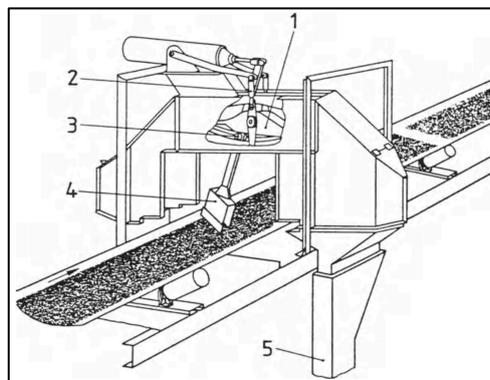


Abbildung 13: Beispiel Online-Probenentnahme, Quelle: Koch (1997), S. 68.

Neben der Online-Analyse ist auch eine Inline-Analyse möglich, wie in Abbildung 14 ersichtlich. In den beiden Grafiken sind zwei Methoden der dynamischen Bildanalyse von Festkörpern in der Inline-Prozessanalytik dargestellt. Bei beiden Methoden ist keine Probenentnahme für die Analyse notwendig. Wie ersichtlich, werden in der Bildanalyse eine Lichtquelle (Nummer 1) und ein Kamerasystem (Nummer 2) benötigt, um die Partikelcharakterisierung durchführen zu können.<sup>28</sup>

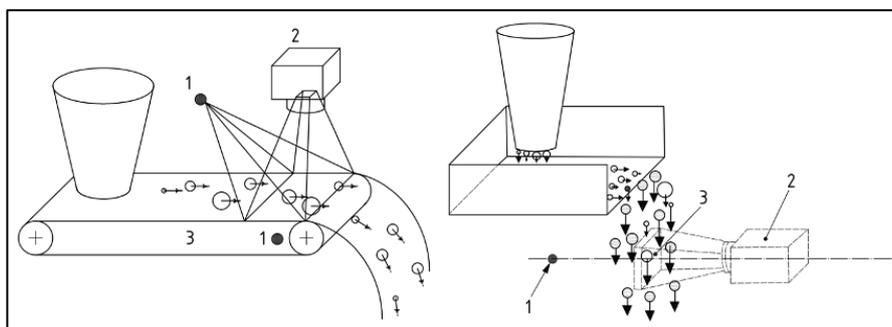


Abbildung 14: Beispiele dynamische Bildanalyse im Inline-System, Quelle: ISO (Hrsg.) (2006), S. 21 f.

<sup>27</sup> Vgl. Koch (1997), S. 67 ff.

<sup>28</sup> Vgl. ISO (Hrsg.) (2006), S. 21 f.

## 4 GRUNDLAGEN DER SYSTEMENTWICKLUNG

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der modellbasierten Systementwicklung erarbeitet, um in weiterer Folge die Methoden und Techniken an praxisnahen Anwendungen einzusetzen. Zu Beginn werden verschiedene Herangehensweisen im Projektmanagement und auch der V-Modell-Ansatz erläutert. Zu den Herangehensweisen zählen der Unterschied zwischen agilem, klassischem und hybridem Projektmanagement sowie die Themen serielle, simultane und unternehmensübergreifend Projektabwicklung. Neben den Methoden werden auch die Themen Variantenmanagement, Anforderungsmanagement und das Gebiet des modellbasierten Systementwicklung bearbeitet.

### 4.1 Methoden im Projektmanagement

Projektmanagement wird in jedem Unternehmen, bewusst oder unbewusst, auf verschiedenste Arten eingesetzt und relevant für ein erfolgreiches Projekt. Je nach Projektumfang, Projektart, Komplexität, Projektmitgliedern und gegebenen Rahmenbedingungen des Unternehmens gibt es verschiedene Methoden, um Projekte durchzuführen. Grundsätzlich kann bei den Vorgehensmodellen zwischen klassischem, agilem und hybridem Projektmanagement unterschieden werden. Das klassische Projektmanagement ist ein sequenzieller und serieller Ablauf und wird auch Wasserfall-Modell oder Phasenkonzept genannt, da die einzelnen Arbeitspakete und Phasen nacheinander abgearbeitet werden. Hier ist die Idee, Entwicklung, Umsetzungsplanung und Realisierung eines Projektes in einzelne Arbeitspakete aufzugliedern und diese wiederum in Phasen zu unterteilen, die logisch und zeitlich voneinander getrennt sind und sequenziell abgearbeitet werden. In Abbildung 15 ist ein Phasenkonzept zu erkennen.<sup>29</sup>

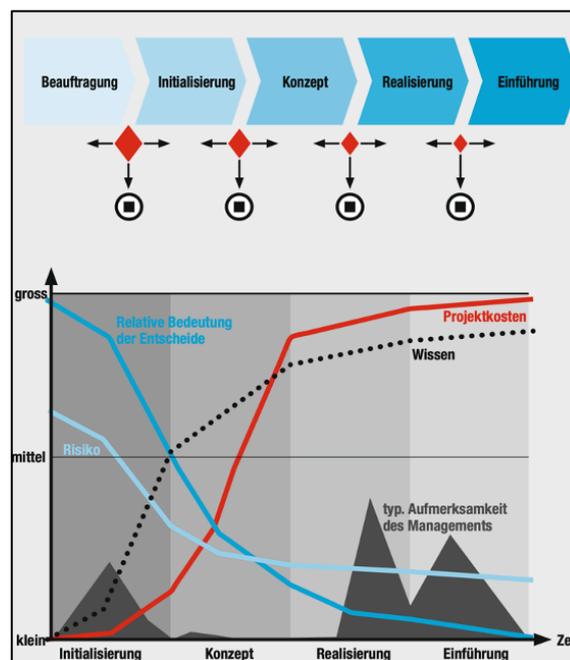


Abbildung 15: Beispiel Phasenkonzept, Quelle: Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 23.

<sup>29</sup> Vgl. Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 21 ff.

Wie aus Abbildung 15 ersichtlich, haben Entscheidungen zu Beginn von Projekten einen großen Einfluss auf deren weiteren Verlauf, da es von großer Bedeutung ist, dass die Anforderungen genau definiert und die Systemgrenzen festgelegt sind. Dies gestaltet sich jedoch oftmals schwierig, da bei Entwicklungsprojekten zu Beginn noch nicht das Wissen vorhanden ist, das notwendig wäre, um wissensbasierte Entscheidungen zu treffen. Daher ist das Risiko am Projektbeginn am höchsten. Die roten Rhomben stellen Meilensteine dar. Das Phasenkonzept ähnelt dem *Stage-Gate-Prozess*, wonach nach jeder *Stage* ein *Gate* zur Folge hat. Zu diesem *Gate* müssen vorab definierte Ziele erreicht werden, damit das Projekt weitergeführt wird. Mit dieser Vorgehensweise wird der Zweck verfolgt, dass Projekte, die nicht vielversprechend sind, so früh wie möglich erkannt und daraufhin nicht weiterverfolgt werden, da ein später Projektabbruch um ein Vielfaches teurer ist als ein Abbruch in einer frühen Phase. Im klassischen Projektmanagement sind in der Regel *Scope* festgelegt und die Dimensionen *Zeit* und *Budget* werden flexibel gehandhabt. In der agilen Vorgehensweise sind *Zeit* und *Budget* festgelegt, während der *Scope* variabel ist. Agiles Projektmanagement beinhaltet ein bewegliches, flexibles, prozessorientiertes und reflektives Vorgehen. In der agilen Herangehensweise wird die Realisierung von Lösungen bereits ohne Detailwissen der Anforderung umgesetzt, da sich das gewünschte Ergebnis ohnehin im Projektverlauf ändert. In Abbildung 16 ist ein Konzept für agile Projektentwicklung visualisiert. Das hybride Modell ist eine Kombination zwischen klassischem und agilem Projektmanagement und in der Praxis am weitesten verbreitet.<sup>30</sup>

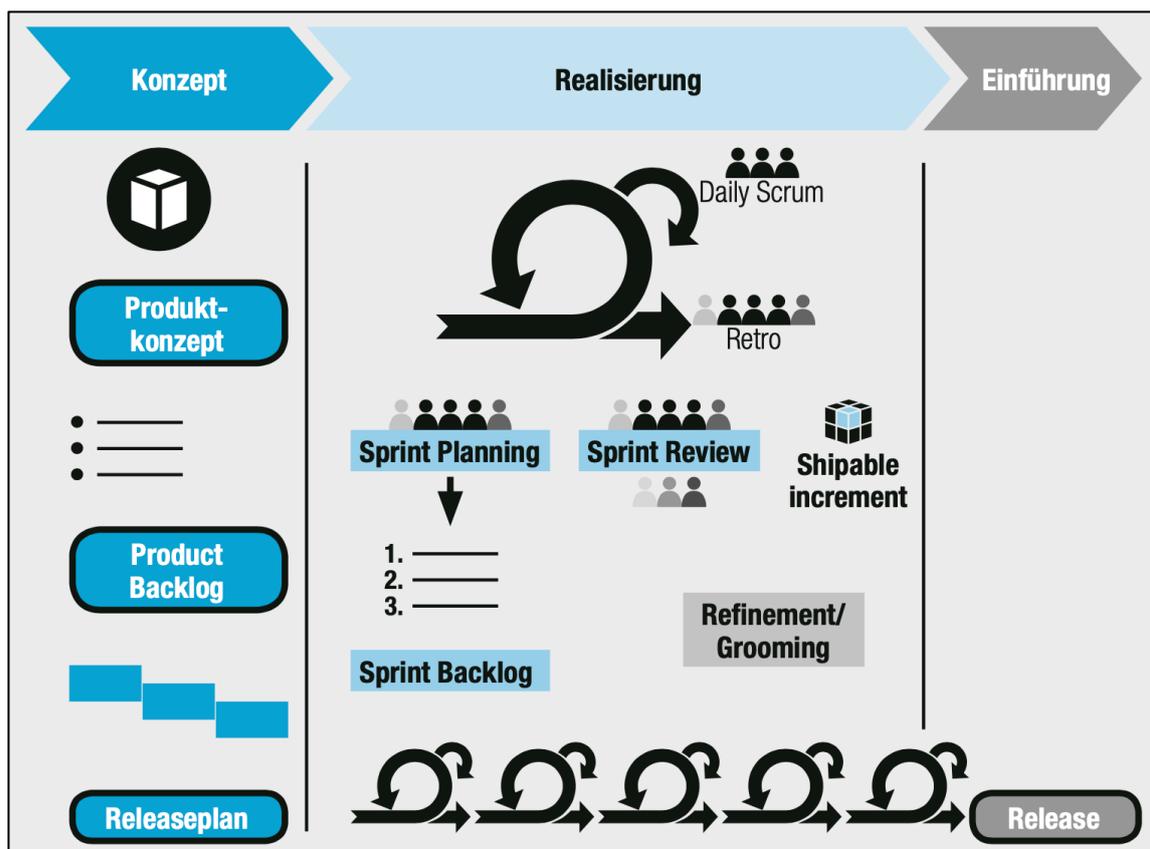


Abbildung 16: Agiles Projektmanagement, Quelle: Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 65.

<sup>30</sup> Vgl. Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 19 ff.

Neben den bereits genannten drei grundsätzlichen Methoden kann auch zwischen serieller, simultaner und unternehmensübergreifend Systementwicklung unterschieden werden. Die serielle und simultane Systementwicklung ist in Unternehmen etabliert und zählt noch immer zu den typischen Herangehensweisen im Projektmanagement, da einerseits die benötigten Tools für unternehmensübergreifend oder auch unternehmensübergreifendes Engineering und andererseits das Wissen in der Anwendung des Projektmanagements sowie das Vertrauen der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen fehlen.

Unternehmensübergreifend bedeutet im Zusammenhang mit Projektmanagement die Parallelisierung, Verteilung und Vernetzung der Produkte, Lösungen, Projekte und Prozesse bereits in frühen Projektphasen zwischen Zulieferer, Kunden, externen Projektpartnern sowie internen Abteilungen. *Cross Enterprise Engineering*, kurz CEE, umfasst das Planen, Entwickeln und Gestalten von Bauteilen, Lösungen und Produkten über örtliche, unternehmerische und systemtechnische Grenzen hinaus und ermöglicht somit ein hohes Potential in der Projektlaufzeit (siehe Abbildung 17). Cross Enterprise Engineering bedeutet eine mehrdimensionale Zusammenarbeit innerhalb und außerhalb des Unternehmens über alle benötigten Disziplinen und stellt somit andere Voraussetzungen an IT-Lösungen und Tools. Diese Tools müssen den gesamten Produktlebenszyklus von der ersten Idee bis zur After-Sales-Betreuung abdecken und jeder Mitarbeiter und jede Mitarbeiterin muss das System verstehen können. Daher werden in der CEE-Methode oft Modelle verwenden, um Informationen zu dokumentieren.<sup>31</sup>

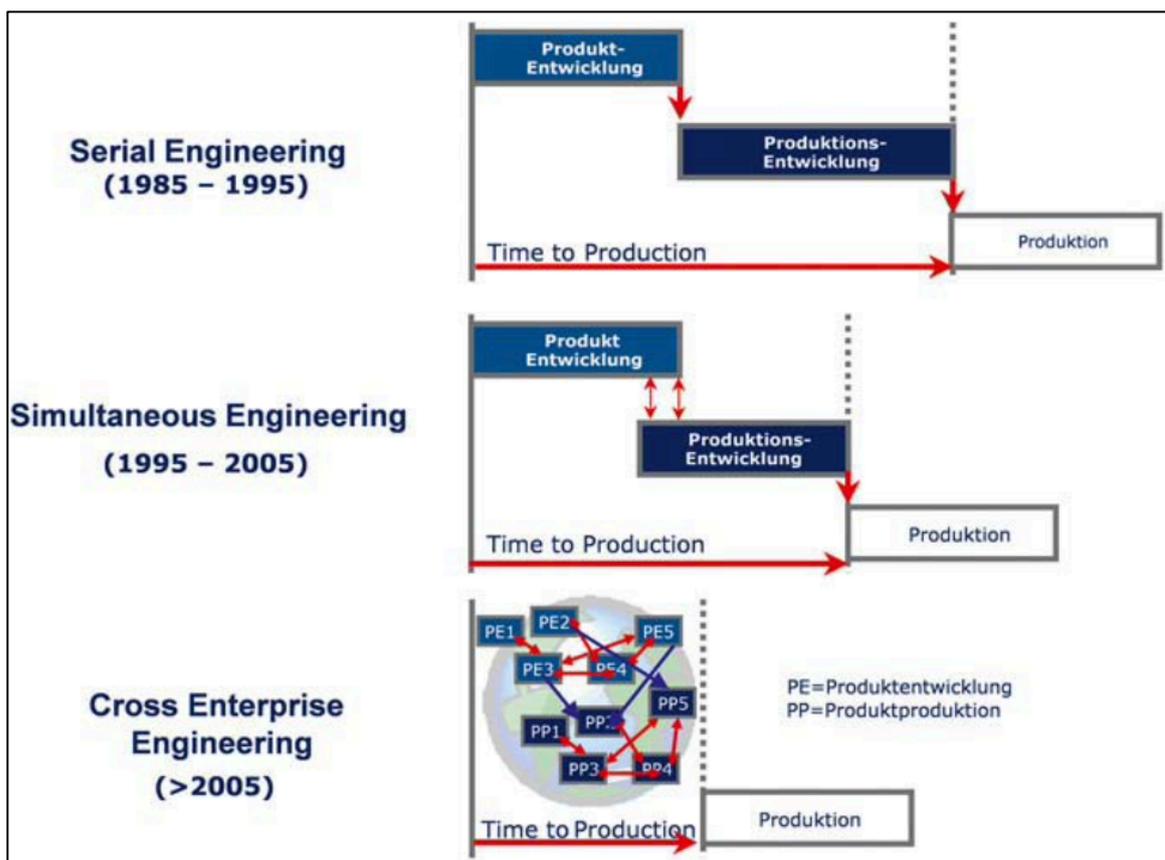


Abbildung 17: Methoden des Produktentstehungsprozesses, Quelle: Eigner/Stelzer (2008), S. 19.

<sup>31</sup> Vgl. Eigner/Stelzer (2008), S. 18 ff.

Neben den gerade genannten Methoden ist zusätzlich der *Stage-Gate-Prozess* ein vorbereitendes Werkzeug, um Projekte abzuwickeln und bereits in einem frühen Stadium bewerten zu können, ob das Projekt erfolgreich wird oder nicht. Je nach Projektkomplexität wird in diesem Prozess unterschieden, wie viele *Stages* und *Gates* benötigt werden. Die Bezeichnung und die Aufteilung sind von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich und somit je nach Branche adaptiv und flexibel. Wie Abbildung 18 zeigt, unterscheidet man zwischen *Stages* und *Gates* sowie in der Ausführungstiefe. In der Stage werden die Aufgaben erledigt, die im Gate benötigt werden, damit das Projekt weitergeführt werden kann. Für jedes Gate gibt es grundsätzlich genau definierte Anforderungen, die zu einem Stichtag, meist mit der Durchführung eines Review Meetings, abgeschlossen sein müssen. Wenn gewisse Anforderungen aufgrund von technischen Problemen oder Anforderungen nicht eingehalten werden können, müssen die Stakeholder entscheiden, ob das Projekt weitergeführt werden soll oder nicht. Die Anforderung beim Gate sind von Gate zu Gate unterschiedlich und an die Projektphase angepasst. Das übergeordnete Ziel dieses Prozesses besteht darin, Projekte so früh wie möglich auszusortieren, um einerseits Kosten und Ressourcen zu sparen und andererseits nur jene Projekte weiterzuverfolgen, die die höchsten Erfolgchancen haben. Von Bedeutung ist dahingehend, dass für kleine Projekte mit Kosten bis zum Beispiel 50.000 € nicht der gleiche Prozess angewendet wird wie für große Entwicklungsprojekte mit Investitionskosten von mehreren Millionen Euro.<sup>32</sup>

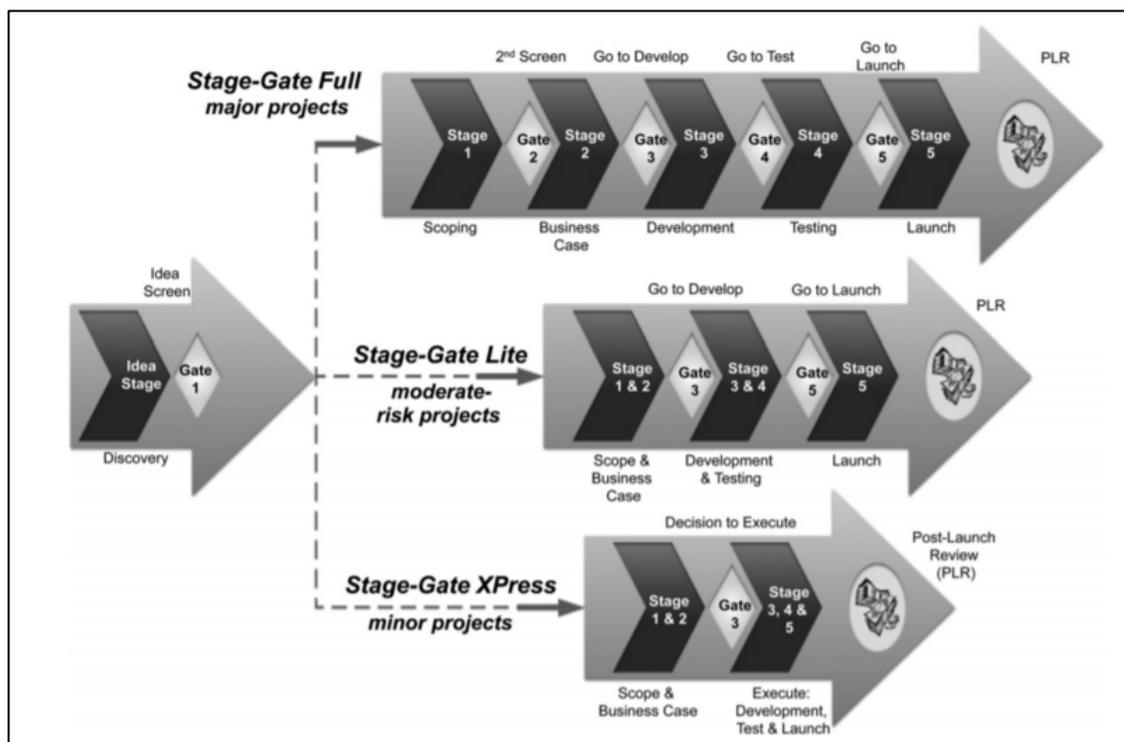


Abbildung 18: Stage-Gate-Modelle, Quelle: Cooper (2014), S. 23.

Die Entwicklung komplexer Systeme erfordert das Zusammenwirken zwischen den Disziplinen Elektronik, Software, Firmware, Maschinenbau und Systemarchitektur. Neben diesen Disziplinen sind je nach System oder Entwicklungsgebiet auch andere im Produktentwicklungsprozess involviert.

<sup>32</sup> Vgl. Cooper (2014), S. 20 ff.

Das V-Modell, wie in Abbildung 19 ersichtlich, beschreibt einen weit verbreiteten Ansatz in der Produktentwicklung. Es deckt jedoch nicht nur den Entwicklungsprozess ab, sondern startet beim Geschäftsmodell, also dem Definieren der Anforderungen und endet nach dem Überleitungsprozess in die Fertigung sowie dem Produktrelease. Die Grundidee des V-Modells ist die Zerteilung komplexer Systeme und Aufgabenstellungen, die disziplinspezifische Entwicklung von Sub-Systemen und die Implementierung von verifizierten Systemkomponenten im vorher definierten Gesamtsystem. Neben dem V-Modell gibt es auch andere Modelle, die eingesetzt werden, wie zum Beispiel das W-Modell oder Wasserfallmodell, die hier jedoch nicht näher betrachtet werden.<sup>33</sup>

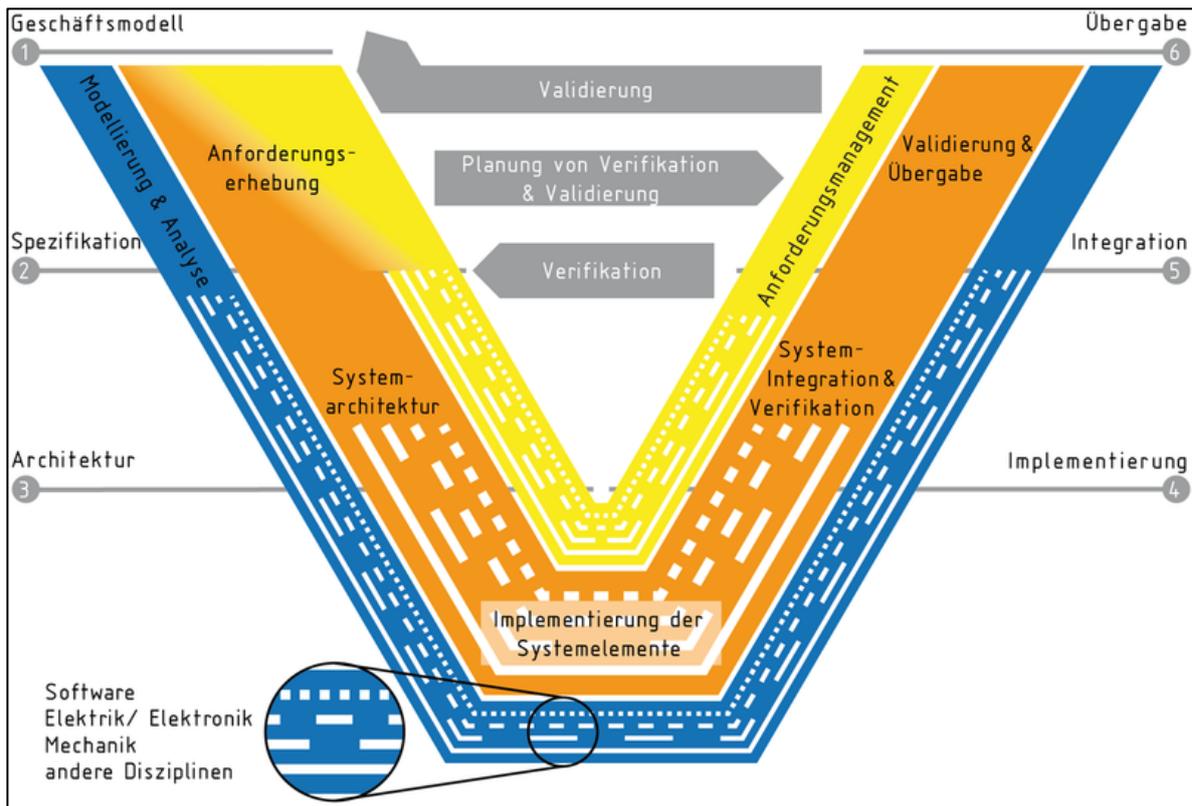


Abbildung 19: V-Modell nach VDI 2206, Quelle: VDI (2021), S. 4.

Den Ausgangspunkt bilden das Klären und Definieren der Anforderungen der einzelnen Stakeholder. Diese Anforderungen sind gleichzeitig die Bewertungskriterien in der späteren Validierung und dienen als Maßstab für die Charakteristik des Produkts. Daher ist es erforderlich, die Planung und Definition der Abnahmekriterien einzelner Anforderungen der Verifikation und Validierung bereits zu Beginn zu bedenken. Nach der Anforderungserhebung beginnt der Entwurf und die Systemarchitektur vom System um ein bereichsübergreifendes Lösungskonzept, die alle physikalischen und logischen Eigenschaften vom späteren Produkt, definieren. Das Gesamtsystem wird in weiterer Folge in Teilsysteme und Teilfunktionen aufgeteilt und den verschiedenen Disziplinen zugewiesen.<sup>34</sup>

<sup>33</sup> Vgl. Gräßler /Roesmann/Thiele (2021), S. 253 ff.

<sup>34</sup> Vgl. Gausemeier/Moehring (2003), S. 3 ff.

Um eine spätere Integration in das Gesamtsystem zu gewährleisten, ist es wesentlich, dass die Funktionen und Schnittstellen zu den anderen Funktionen genau festgelegt sind. Im Idealfall sind die Teilfunktionen unabhängig und können vor der Integration in das Gesamtsystem verifiziert werden. Die Prozesse, Tools und Methoden der einzelnen Disziplinen sind unterschiedlich und entsprechend beim Systementwurf zu berücksichtigen. Dies kann mit disziplinübergreifenden Werkzeugen und Methoden wie zum Beispiel einem modellbasierten Systementwurf unterstützt werden. Modellbasierte Methoden sind gerade im Systementwurf von Bedeutung, da dieser eine gemeinsame Sprache der Spezifikation und Anforderungen darstellt, mit der jede Disziplin arbeiten kann. Der nächste Schritt beinhaltet das domänenspezifische disziplinabhängige Entwerfen der Funktionen mit den benötigten Tools der jeweiligen Disziplinen. Die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden in weiterer Folge in das Gesamtsystem integriert und im Gesamtkontext verifiziert und validiert. Diese Schritte sollten sukzessive je nach Gesamtfortschritt durchgeführt werden, um möglichst früh erkennen zu können, ob das Produkt richtig entwickelt wird (dies wird durch die Verifikation abgedeckt) und ob auch das richtige Produkt entwickelt wird, was als Validierung des Produkts bezeichnet wird. Dieser Prozess wird mit domänenübergreifenden Modellen unterstützt. Der letzte Schritt im Produktentstehungsprozess nach dem V-Modell umfasst die Überleitung des Produkts in die Produktion und einen kontrollierten Launch des Produkts. In der Überleitung werden Arbeitspläne, Anleitungen, Supply-Chain-Themen, Baugruppenstrukturen und produktspezifische Auslieferprüfungen definiert. In Abbildung 20 ist das V-Modell erneut dargestellt. Hier lässt sich erkennen, dass das V-Modell im Produktentstehungsprozess, in Abhängigkeit von der Komplexität des Systems, mehrmals durchgeführt wird. Grund dafür ist, dass die Funktionen so früh wie möglich verifiziert und validiert werden.<sup>35</sup>

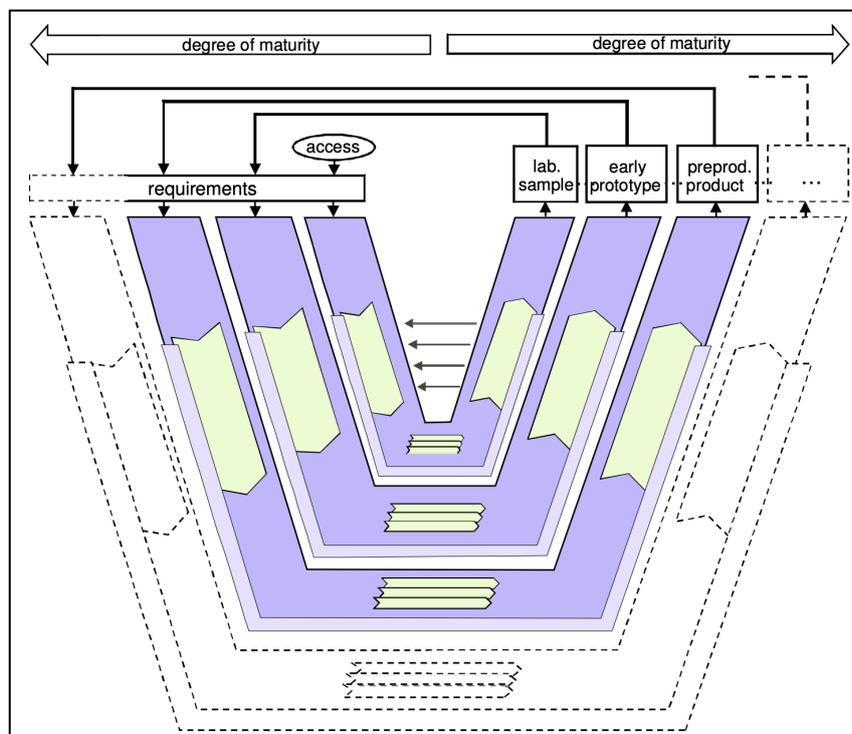


Abbildung 20: V-Modell-Prozess, Quelle: Gausemeier/Moehring (2003), S. 7.

<sup>35</sup> Vgl. Gausemeier/Moehring (2003), S. 3 ff.

## 4.2 Variantenmanagement in der Produktentwicklung

In den letzten Jahren ist ein Anstieg von Produktvariationen zu beobachten, die aktuell ein wesentliches Kaufargument für Kunden und Kundinnen darstellen. Die Bereitstellung von Konfiguratoren, zum Beispiel bei neuen Fahrzeugen, wird heute vorausgesetzt und ist notwendig, um mit der Konkurrenz Schritt halten zu können. Einerseits bringt dies einen Mehrwert für die Kunden und Kundinnen, da diese das Produkt auf ihre eigenen Bedürfnisse abstimmen können, und andererseits werden durch die Variantenvielfalt der Produktentwicklungsprozess und die spätere Produktion um ein Vielfaches komplexer. Von Bedeutung ist hier der Zeitpunkt der Entscheidung, welche Varianten entwickelt werden sollen, da die Beeinflussbarkeit im Projektverlauf immer geringer und kostenintensiver wird. Dies bedeutet, dass die Variantenvielfalt bereits zu Beginn des Projekts definiert und auch in den Anforderungen dokumentiert werden muss. Wie in Abbildung 21 ersichtlich, wird die Komplexität der definierten Varianten jedoch erst im Projektverlauf beziehungsweise beim Start der Produktion wahrgenommen.<sup>36</sup>

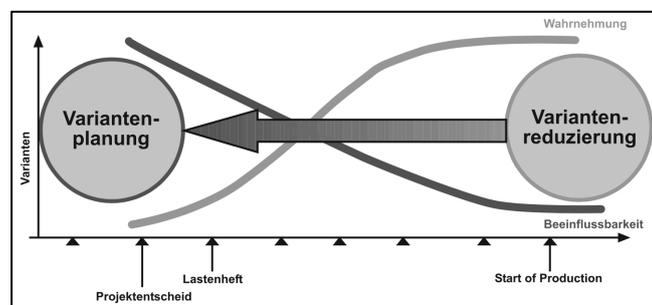


Abbildung 21: Zeitleiste Variantenvielfalt, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 227.

Eine zu hohe Variantenvielfalt hat einerseits Auswirkungen auf die Produktentwicklung und andererseits, wie in Abbildung 22 ersichtlich, auch auf den Erlös sowie das Betriebsergebnis. Die Schwierigkeit liegt darin, ein Mittelmaß zu finden, wobei einerseits die vom Markt geforderten Varianten verfügbar sind und andererseits die Kosten nicht exponentiell steigen.<sup>37</sup>

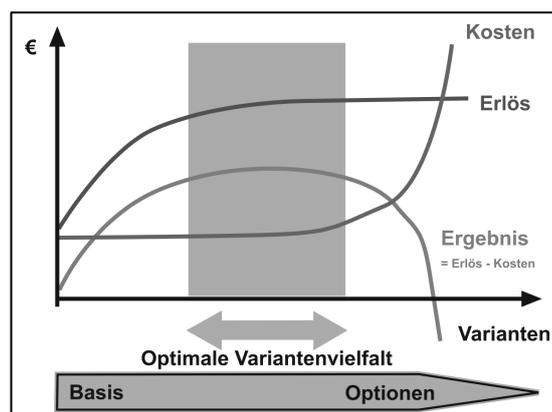


Abbildung 22: Bereich der optimalen Variantenvielfalt, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 228.

<sup>36</sup> Vgl. Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 221 ff.

<sup>37</sup> Vgl. Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 225 ff.

Zu wenig Varianten im Vergleich zu den Mitbewerbern und Mitbewerberinnen birgt das Risiko von weniger Verkäufen und somit auch einem geringeren Erlös. Jedoch wirkt sich eine zu hohe Vielfalt auch auf die Kosten im Unternehmen aus. Die zentrale Frage ist, wie die Varianten entstehen und ob sie einen messbaren Mehrwert für das Unternehmen bringen. In Abbildung 23 lässt sich erkennen, wo Varianten entstehen und wie schnell eine Vielzahl von Varianten entsteht. Auch die Steigerung der Komplexität im ganzen Produktlebenszyklus ist hier dargestellt. In den Variantenmanagement-Prozess werden im Allgemeinen alle Stakeholder wie das Marketing, die Entwicklung, die Produktion, die Beschaffung und das Controlling eingebunden, um am Ende der Entwicklung die richtigen Varianten zu produzieren und Gewinn zu erzielen.<sup>38</sup>

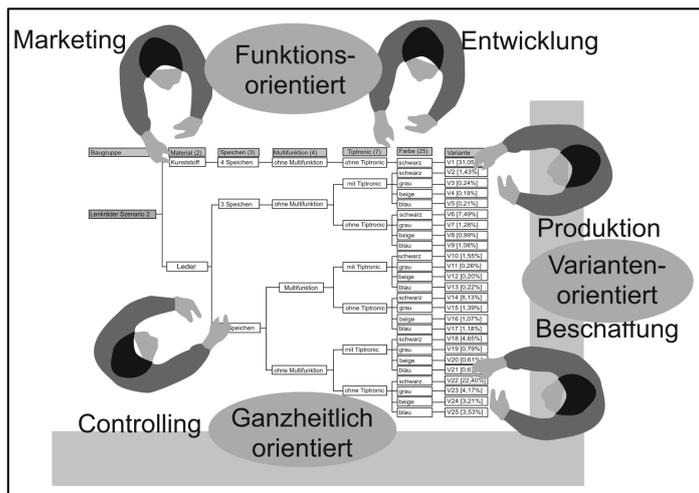


Abbildung 23: Kreation der Varianten, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 230.

In Abbildung 24 ist die Bewertung verschiedener Variantenszenarien seitens der Audi AG ersichtlich. In Summe fällt die Wahl auf das Szenario mit dem besten Betriebsergebnis und den meisten Varianten.<sup>39</sup>

	Szenario 1 (Vorgänger)	Szenario 2	Szenario 3
<b>Varianten:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Angebot</li> <li>Funktionen</li> <li>Technik</li> </ul>		
	53	25	7
<b>Haupt-Kosten [Mio €]:</b>			
• Entwicklung	- 9	- 7	- 6
• Invest	- 7	- 5	- 5
• Fertigung	- 3	- 3	- 2
• Kaufteile	- 184	- 181	- 175
<b>Erlös [Mio €]:</b>			
• Einnahmen aus Optionen	+ 206	+ 212	+ 205
<b>Ergebnis [Mio €]:</b>			
• Summe aus Kosten + Erlös	+ 3	+ 16	+ 17
<b>Empfehlung:</b>			
• Variantenziel		Ziel: 25	Kein Premiumangebot!

Abbildung 24: Variantenbewertung Audi, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 233.

<sup>38</sup> Vgl. Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 228 ff.

<sup>39</sup> Vgl. Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 230 ff.

## 5 SYSTEMS ENGINEERING IM INDUSTRIELLEN UMFELD

Nachdem in Kapitel 4 die Grundlagen und Vorgehensweisen in der Systementwicklung erarbeitet wurden, bezieht sich das Kapitel 5 auf das Systems Engineering im industriellen Umfeld.

Zu Beginn werden die Grundlagen des modellbasierten Systems Engineerings ausgearbeitet, um in weiterer Folge eine Analyse der Werkzeuge, Methoden und Sprachen durchzuführen, damit im nächsten Schritt analytisch entschieden werden kann, was für die Modellierung des Gesamtsystems am besten geeignet ist. Dies erfolgt mittels der Paarvergleichsmethode, damit eine subjektive Entscheidung getroffen werden kann. Anschließend wird auf die aktuelle Situation der Systementwicklung eingegangen, um daraufhin den Mehrwert des modellbasierten Systems Engineerings darlegen zu können.

### 5.1 Grundlagen des modellbasierten Systems Engineerings

Im Zuge der Produktentwicklung werden von diversen Disziplinen im Produktlebenszyklus verschiedene Modelle erstellt, bearbeitet und wiederverwendet. Diese Modelle bilden jedoch nur einen Teil des Gesamtsystems ab und stellen somit auch nur einen Ausschnitt der Anforderungen und Funktionen dar. Zusätzlich zur bestehenden Vielzahl an Modellen werden die Anforderungen an das System in Dokumenten festgehalten, wobei keine Beziehung zur Umsetzung bzw. zur Verifizierung oder Validierung hergestellt wird. Die Aufgabe des modellbasierten Systems Engineerings ist es, das gesamte System abzubilden, um das Systemdenken zu fördern und jeder Mitarbeiterin sowie jedem Mitarbeiter zu vermitteln, welche Funktionen, Anforderungen und Abhängigkeiten innerhalb der einzelnen Disziplinen existieren und welche Funktionen das Gesamtsystem schließlich vorweisen muss. Zusätzlich sollte ein Modell – und nicht verschiedene Dokumente – der Informationsträger sein. Neben den technischen Funktionen wie z. B. der Messung der Temperatur gibt es verschiedenste Anforderungen von allen Stakeholdern, die abgebildet werden müssen. Hierbei verwendet das modellbasierte Systems Engineering Methoden, Werkzeuge und Sprachen. In Abbildung 25 ist ein vereinfachter Prozess des Systems Engineerings abgebildet und die grundsätzliche Vorgehensweise beschrieben. Es lässt sich erkennen, dass sich das System aus mehreren Elementen zusammensetzt und als Ganzes mit der externen Umgebung wie den Stakeholder agiert.<sup>40</sup>

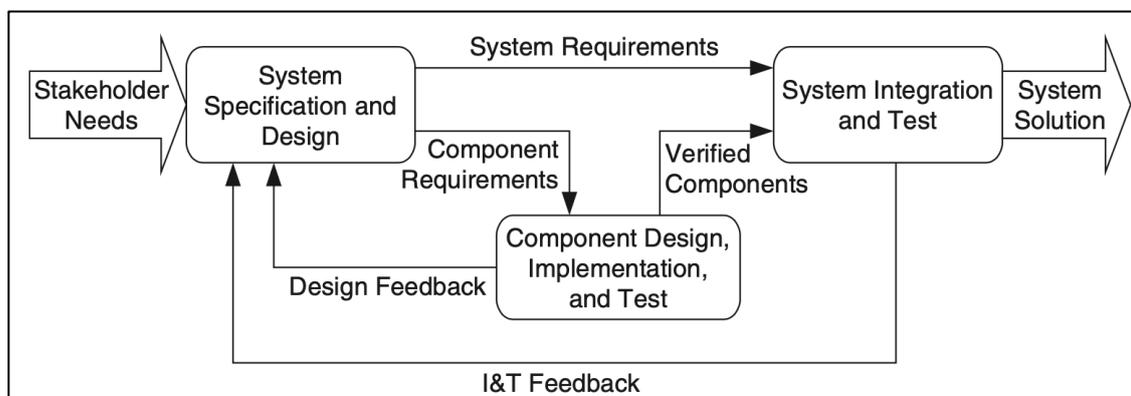


Abbildung 25: Vereinfachter Systems-Engineering-Prozess, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 4.

<sup>40</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 1 ff.

Systems Engineering ist ein multidisziplinärer Ansatz, der zur Lösungsfindung von Stakeholder-Anforderungen dient und technische sowie Management-Prozesse beinhaltet. Innerhalb der Management-Aspekte sind die Projektkosten, der Projektzeitplan und die wirtschaftlichen Entwicklungsrisiken abgebildet. Die technischen Prozesse des Systems Engineerings dienen dazu, dass das Ziel als Ganzes erreicht wird, und beinhalten daher die Analyse, die Spezifikation, den Entwurf und die Überprüfung des Systems, damit die einzelnen Teile zusammenarbeiten. Wie in Abbildung 25 zu erkennen, werden zuerst die Stakeholder- Bedürfnisse abgefragt und daraufhin die Spezifikationen und das Design des Systems abgeleitet. Die System-Anforderungen werden erstellt und bilden die Anforderungen der Stakeholder ab. Dahingehend werden das finalisierte System bzw. Teilelemente auch validiert. Zusätzlich werden die Anforderungen der einzelnen Komponenten abgeleitet. Diese dienen zur technischen Entwicklung des Systems und werden zusätzlich für die Verifikation benötigt. Im Prozess gibt es zudem eine *Design-Feedback-Schleife*, um den Entwicklungsfortschritt immer wieder mit den Spezifikationen abgleichen zu können.<sup>41</sup>

Der Ansatz des modellbasierten Systems Engineering erfordert auch neue Rollen im Projektteam, die bei konventionellen Herangehensweisen nicht beziehungsweise nur oberflächlich vorhanden sind. Wie Abbildung 26 zeigt, gibt es bei größeren Projekten insgesamt fünf neue Rollen. Wie diese Rollen ausgeprägt sind, hängt jeweils von der Projektgröße und -komplexität ab.

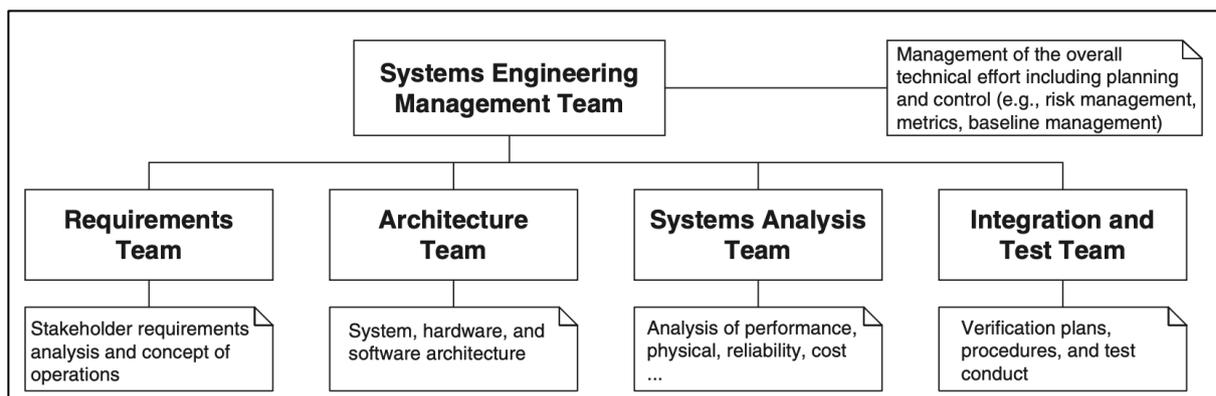


Abbildung 26: Beispiel eines Systems-Engineering-Teams, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 10.

Der Systems-Engineering-Manager hat die Verantwortung über das Projekt und ist somit auch für dessen Erfolg verantwortlich. Diese Rolle ist in vielen Fällen auch gleichbedeutend mit dem Projektleiter. Das Requirements-Team ist für die Bedürfnisse der Stakeholder, das Gesamtkonzept der Anwendungen, zusammengefasst für die Spezifikation und Validierung der Systemanforderungen, verantwortlich. Für die Entwicklung der Systemarchitektur und die Aufteilung des Gesamtsystems in einzelne Komponenten sowie die Definition der Abhängigkeiten und Verbindungen dieser ist das Architektur-Team verantwortlich. Die Verantwortung über technische Aspekte wie zum Beispiel Messgenauigkeit, physikalische Eigenschaften, Wartbarkeit, Kosten und Produzierbarkeit hat das Systemanalyse-Team. Abgerundet werden die neuen Rollen durch das Integrations- und Test-Team, die für die Erstellung der Testpläne und -abläufe sowie die Durchführung der Verifikationstests verantwortlich sind.<sup>42</sup>

<sup>41</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 4 f.

<sup>42</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 10 f.

Das Systemmodell ist grundsätzlich aus den vier Hauptteilen *Struktur*, *Verhalten*, *Parametrik* und *Anforderungen* aufgebaut. Diese vier Modelltypen stehen miteinander in Verbindung und sind voneinander abhängig- siehe dazu Abbildung 27.<sup>43</sup>

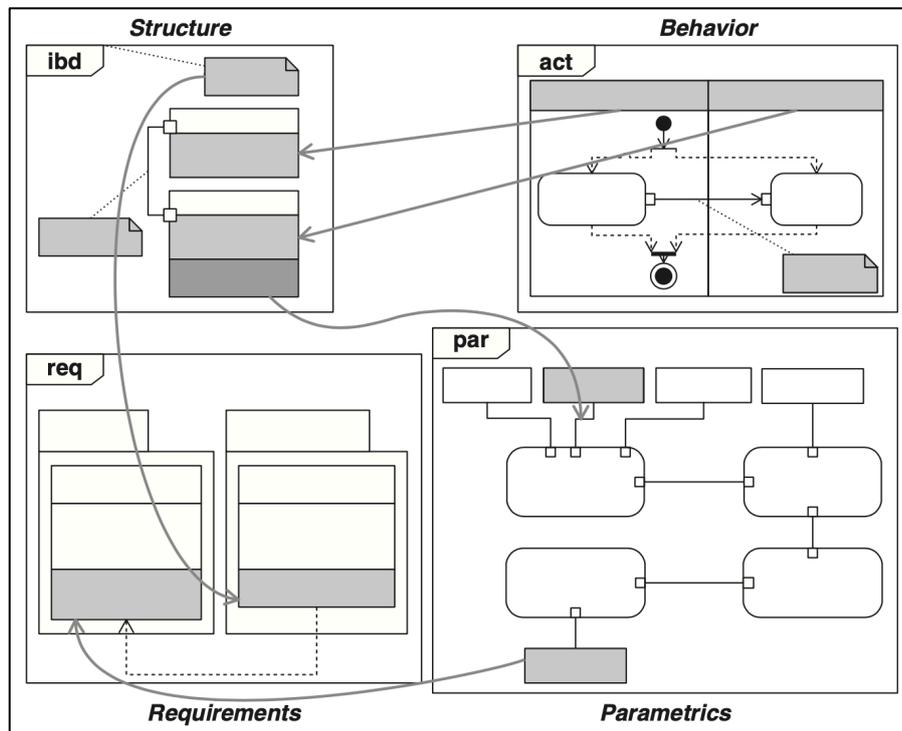


Abbildung 27: Beispiel Systemmodell, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 17.

Im Strukturdiagramm ist die Struktur des Systems abgebildet und in Blöcken dargestellt. Hier wird bereits der Aufbau des Gesamtsystems dargestellt und in die einzelnen Komponenten unterteilt. Ein Block kann Funktionen, Einheiten, Komponenten und Einschränkungen wie zum Beispiel das Gewicht beinhalten. Wie der Name bereits verrät, bildet das Verhaltensdiagramm das Verhalten bei äußeren Einflüssen, Systemzustände, physikalische Änderungen oder Benutzerinteraktionen des Systems ab. Es wird also dargestellt, wie das System auf eine Änderung oder Eingabe reagiert. In der Modellierungssprache *SysML* gibt es insgesamt vier verschiedene Diagrammtypen. Ein Aktivitätsdiagramm zeigt das ablauforientierte Verhalten, ein Zustandsdiagramm das ereignisorientierte Verhalten, ein Sequenzdiagramm das nachrichtenorientierte Verhalten und das Use-Case-Diagramm, welches das Top-Level-Systemverhalten darstellt, jedoch nicht wie die anderen Typen das Verhalten des Systems. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden auch andere Modellierungssprachen evaluiert und miteinander verglichen. Im Anforderungsdiagramm sind alle Anforderungen dargestellt, die das System erfüllen muss. Hierbei handelt es sich nicht nur um technische Anforderungen, sondern auch um wirtschaftliche oder rechtliche Anforderungen wie zum Beispiel die Herstellkosten oder die RoHS-Konformität des Produkts. Zur Anforderung sollte sofort auch ein Testfall erstellt werden, der die Anforderung verifiziert oder validiert. Das parametrische Diagramm stellt Verbindungen zwischen den Eigenschaftswerten des Systems dar.<sup>44</sup>

<sup>43</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 17 f.

<sup>44</sup> Vgl. Weilkiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 352 ff.

Wie in Abbildung 28 ersichtlich, werden die Requirements der Hardware, Software, Konstruktion und Firmware im Systemmodell spezifiziert und dies dient als Input für das Design der einzelnen Komponenten der verschiedenen Disziplinen. Das Design der Hardware oder das Erstellen der Software muss in einem CAD-Modell oder einer anderen Programmierumgebung durchgeführt werden.<sup>45</sup>

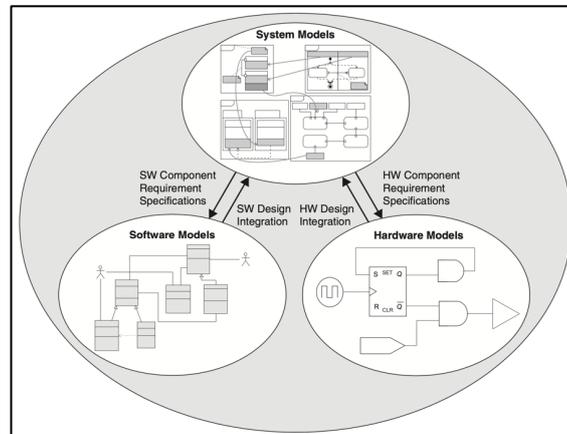


Abbildung 28: Spezifizierung der Komponenten mit Systemmodell, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 18.

Das Systemmodell ist ein primärer Bestandteil der modellbasierten Systementwicklung und auch ein wesentlicher Teil der technischen Grundlage des Systems. Es stellt eine konsistente Quelle der Information von Systemspezifikationen, vom Entwurf und von der Verifikation dar. Zusätzlich ist eine Rückverfolgbarkeit gegeben, da die initialen Anforderungen im Systemmodell gesichert sind. Jede technische Disziplin (Konstruktion, Hardware, Software, Firmware und Test) wird vom Systemmodell durch detailliertere Informationen zu Spezifikation, Design, Analyse und Verifikation dargestellt (siehe Abbildung 29).

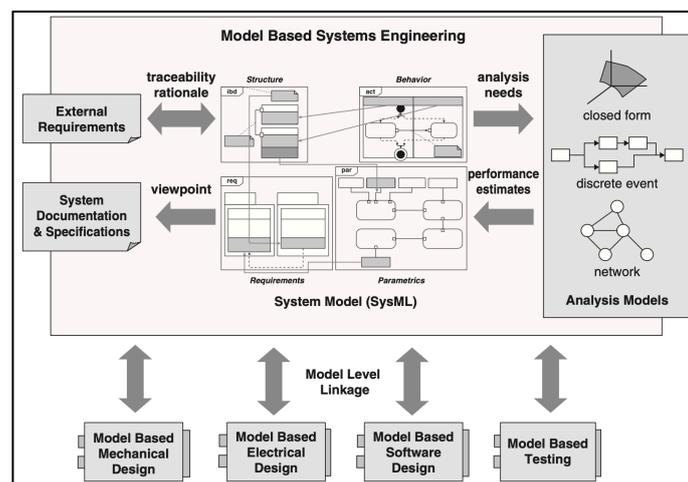


Abbildung 29: Übersicht modellbasiertes Systems Engineering, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 508.

Das übergeordnete Ziel liegt darin, dass die Modelle – und nicht verschiedenste Dokumente – als Informationsträger genutzt werden.<sup>46</sup>

<sup>45</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 17 f.

<sup>46</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 507 f.

Zur Erstellung modellbasierter Systeme werden Methoden, Werkzeuge und Sprachen verwendet (siehe Abbildung 30). Bereits im Vorfeld, also bevor mit dem Modellieren begonnen wird, muss eine Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Werkzeugen, Methoden und Sprachen erfolgen, da diese sich in Abhängigkeit von der Anwendung unterscheiden können.

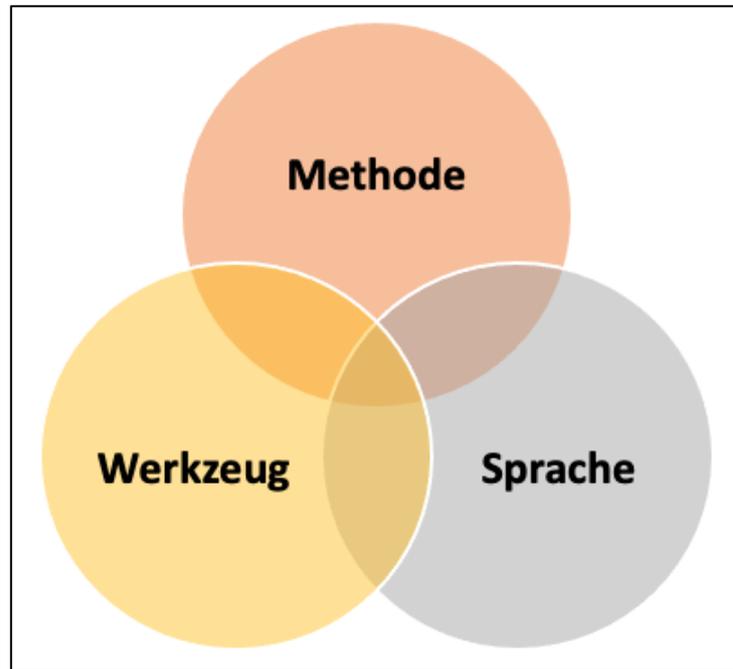


Abbildung 30: Verknüpfung von Werkzeug, Tool und Sprache, Quelle: Weilkiens (2016), S. 7.

Zu Beginn werden die Sprachen evaluiert. Ähnlich wie bei Programmierumgebungen zur Softwareerstellung, gibt es auch hier verschiedene Sprachen. Jede Sprache unterscheidet sich von der anderen und besitzt verschiedene Vor- und Nachteile für gewisse Anwendungen. Dies wird in Unterkapitel 5.2 genauer erläutert.

Der nächste Bestandteil bei der Modellierung ist die Methode. Durch diese wird definiert, wie die Sprache in Verbindung mit dem Tool eingesetzt und wie das Modell aufgebaut wird. Es existieren verschiedenste Methoden, die auf einzelne Anwendungen zugeschnitten sind. In Unterkapitel 5.4 findet sich eine Auswahl an Methoden, die näher beschrieben und bewertet werden.

Neben der Sprache und der Methode ist auch das Werkzeug von Relevanz. Das Werkzeug ist die Software, mit der die Modellierung durchgeführt und unterstützt wird. Welche Werkzeuge es aktuell am Markt gibt, wird in Unterkapitel 5.3 näher erläutert.<sup>47</sup>

In weiterer Folge werden die Sprache, das Werkzeug und die Methode in einem Anwendungsfall angewendet und es wird der Mehrwert gegenüber Methoden analysiert. Die Bewertung wird mittels Nutzwertanalyse durchgeführt und die dazu benötigte Gewichtung der Bewertungsgrundlagen erfolgt anhand der Paarvergleichsmethode.

---

<sup>47</sup> Vgl. Weilkiens (2016), S. 7 f.

In Tabelle 4 ist die Bewertung zur Bestimmung der Gewichtung ersichtlich. Damit werden die ausgewählten Eigenschaften gegenübergestellt und bewertet.

Bewertung	Beschreibung
2	Zeile relevanter als Spalte
1	Zeile und Spalte gleichwertig
0	Spalte relevanter als Zeile

Tabelle 4: Paarvergleichsmethode Bewertung, Quelle: Eigene Darstellung

In der Nutzwertanalyse konnten für jedes Kriterium zwischen null und zehn Punkte vergeben werden. Diese Punkte wurden daraufhin mit der davor erstellten Bewertung gewichtet. Das Ergebnis bildet die Summe der gewichteten Punkte, und die Sprache, die Methode oder das Werkzeug mit der höchsten Punktzahl ist für die Anforderungen im Produktentstehungsprozess am besten geeignet. Die Kriterien wurden von Vertretern jeder Disziplin im Produktentstehungsprozess definiert (siehe Tabelle 5). Der Paarvergleich und die Nutzwertanalyse entstanden aus Bewertungen eines sehr breiten und interdisziplinären Umfeldes. Die Vergabe der Punkte und der Paarvergleich wurden mit den gleichen Personen in den Nutzwertanalysen in den Unterkapiteln 5.2.5, 5.3.4 und 5.4.5 durchgeführt.

Rolle im Unternehmen	Interesse
Abteilungsleiter Entwicklung	Auslastung der Ressourcen in der Entwicklung, professionelle Projektabwicklung und Einhalten der Entwicklungsprozesse.
Produktmanagement	Erfüllung der Produkt- und Marktanforderungen, zeitgerechter Verkaufsstart und geringe Herstellkosten.
Produktbereichsleiter	Geringe Projektkosten, kurze Entwicklungszeit und Erfüllung aller Anforderungen.
Projektleitung	Erreichung der geplanten Projektkosten, Einhalten der Entwicklungszeit und Erfüllung der Anforderungen sowie der Qualitätsziele.
System-Architekt	Hochwertige Definition der Anforderungen von Produktseite, um die Systemanforderungen, Systemkomponenten und die übergeordnete Systemarchitektur erstellen zu können.
Firmware	Definierte Systemanforderungen, um in weiterer Folge die Systemkomponenten zu spezifizieren, sowie einfache Möglichkeit, die Ergebnisse zu dokumentieren.
Software	Unterstützung von agilen Entwicklungsmethoden und klare Anforderung an Software-Funktionen und Schnittstellen.
Hardware	Definierte Systemanforderungen, um in weiterer Folge die Systemkomponenten zu spezifizieren.
Konstruktion	Definierte Systemanforderungen, um in weiterer Folge die Systemkomponenten spezifizieren zu können.

Tabelle 5: Mitwirkende Bereiche in der Analyse und Bewertung, Quelle: Eigene Darstellung

## 5.2 Sprachen für modellbasiertes Systems Engineering

In diesem Abschnitt werden verschiedene Sprachen zur graphischen Modellbildung erläutert und in weiterer Folge bewertet. Es gilt, die Sprache ausfindig zu machen, die sich am besten für das Modellieren von Varianten eignet und die geforderten Anforderungen erfüllt. Es werden die Sprachen *UML*, *SysML*, *ModelicaML* und *IDEF* analysiert und miteinander verglichen. Diese Sprachen wurden gewählt, da jede einzelne ihre Vorteile und auch Nachteile hat. Zuerst wird *UML* evaluiert da *SysML* teilweise gleich aufgebaut ist. Auf die methodisch ausgewählte Sprache wird im weiteren Verlauf direkt an einem Praxisbeispiel näher eingegangen.

### 5.2.1 UML

Die Sprache *UML* gehört zu der *Object Management Group* und ist eine der am weitesten verbreiteten Modellierungssprachen, auf die auch andere wie *SysML* aufbauen. Die Sprache *UML* hat ihren Ursprung in der Spezifizierung, Visualisierung und Dokumentation von Softwaresystemen. Aktuell ist die Sprache noch immer am weitesten im Software Engineering verbreitet und stellt eine programmiersprachenunabhängige und grafische Modellierungssprache dar. Zur Modellierung bietet *UML* das Struktur-, Verhaltens- und Interaktionsdiagramm. Untergeordnet bieten diese drei Diagramme noch weitere Arten zur Modellierung und Darstellung von Systemen. Mit den Strukturdiagrammen werden hauptsächlich statische Komponenten des Systems dargestellt und mit dem Verhaltensdiagramm dessen verschiedenen Zustände.<sup>48</sup>

Neben der Modellierung neuer Systeme wird die Sprache auch für Reverse Engineering eingesetzt und bestehender Code in Modellen dargestellt, um das Programm verständlicher zu gestalten.<sup>49</sup> Eine weitere Möglichkeit, die Werkzeuge bieten, besteht darin, *UML*-Modelle in die benötigte Programmiersprache umzuwandeln, um somit einfach und schnell die beste Lösung zu finden. Der Fokus und die Stärken der Sprache liegen in der Systementwicklung und disziplinspezifischen Entwicklung.<sup>50</sup>

### 5.2.2 SysML

Gleich wie *UML* stammt auch *SysML* von der *Object Management Group*, kurz *OMG*, und stellt eine grafische Modellierungssprache für modellbasiertes Systems Engineering dar. Im Gegensatz zu *UML* ist *SysML* am weitesten im Systems Engineering, also der Modellierung des gesamten Systems, verbreitet und somit für mechatronische Systeme geeignet. *SysML* (*System Modeling Language*) ermöglicht es System zu spezifizieren, und zu analysieren. Sowie die Architektur sowie den Systementwurf von Systemen und die Verifizierung und Validierung der Anforderungen darzustellen. Die Sprache arbeitet mit verschiedenen Diagrammen. In Summe sind es bei *SysML* mehr als neun verschiedene Diagrammtypen.<sup>51</sup>

---

<sup>48</sup> Vgl. Object Management Group (2017), Online-Quelle [20.Januar.2023]

<sup>49</sup> Vgl. Kossiakoff/Sweet/Seymour/Biemer (2011), S. 229 f.

<sup>50</sup> Vgl. Weilkiens (2016), S. 16 ff.

<sup>51</sup> Vgl. Object Management Group (2022), Online-Quelle [20.Januar.2023]

In Abbildung 31 sind die verschiedenen Diagramme abgebildet. Die drei wichtigsten sind das Strukturdiagramm, das Anforderungsdiagramm und das Verhaltensdiagramm.<sup>52</sup>

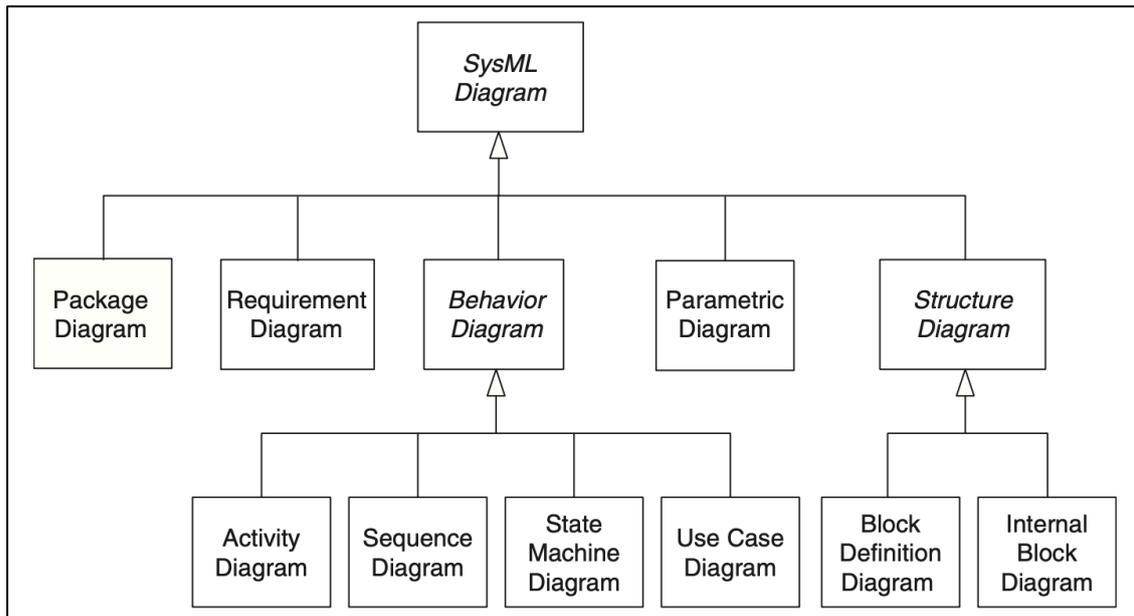


Abbildung 31: SysML Übersicht der Diagramme, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 32.

Der größte und wichtigste Unterschied zu UML ist das Modellieren der Anforderungen. Bei SysML gibt es für das Anforderungsmanagement das Anforderungsdiagramm. Hier werden alle Systemanforderungen der verschiedenen Stakeholder definiert und es finden sich bereits Testfälle, um die Qualität der Umsetzung zu überprüfen. SysML verwendet einen Teil der Diagramme von UML und in Summe ist SysML nicht so umfangreich wie UML (siehe Abbildung 32).<sup>53</sup>

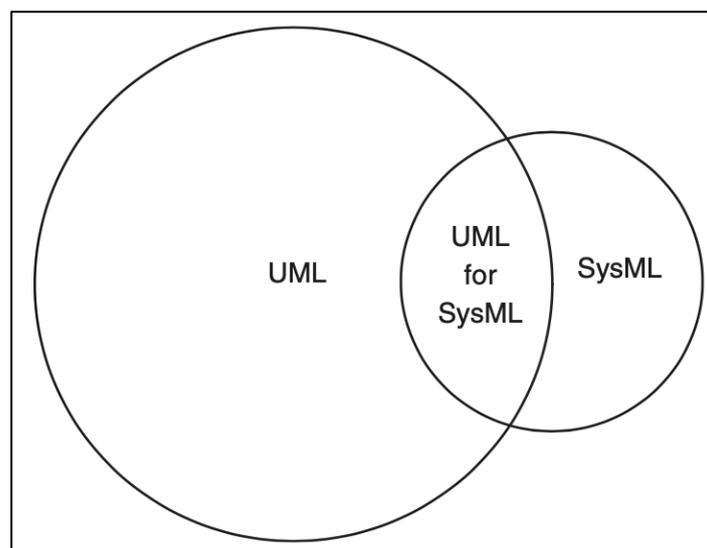


Abbildung 32: UML und SysML, Quelle: Weikiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 350.

<sup>52</sup> Vgl. Weikiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 349 ff.

<sup>53</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 32. f.

### 5.2.3 ModelicaML

Neben SysML bietet auch ModelicaML die Möglichkeit, Anforderungen zu modellieren, und unterstützt die Entwicklung mechatronischer Systeme von der Anforderungsanalyse und dem Systementwurf über die Implementierung bis zur Verifizierung und Validierung. Das ModelicaML-Modell ist mit SysML konsistent, weshalb die Möglichkeit besteht, SysML-Modelle in ModelicaML-Modelle zu konvertieren. In Abbildung 33 sind die verschiedenen Diagrammtypen von ModelicaML abgebildet, wobei ersichtlich wird, dass die meisten Diagramme mit SysML übereinstimmen und nur einige von SysML modifiziert wurden.<sup>54</sup>

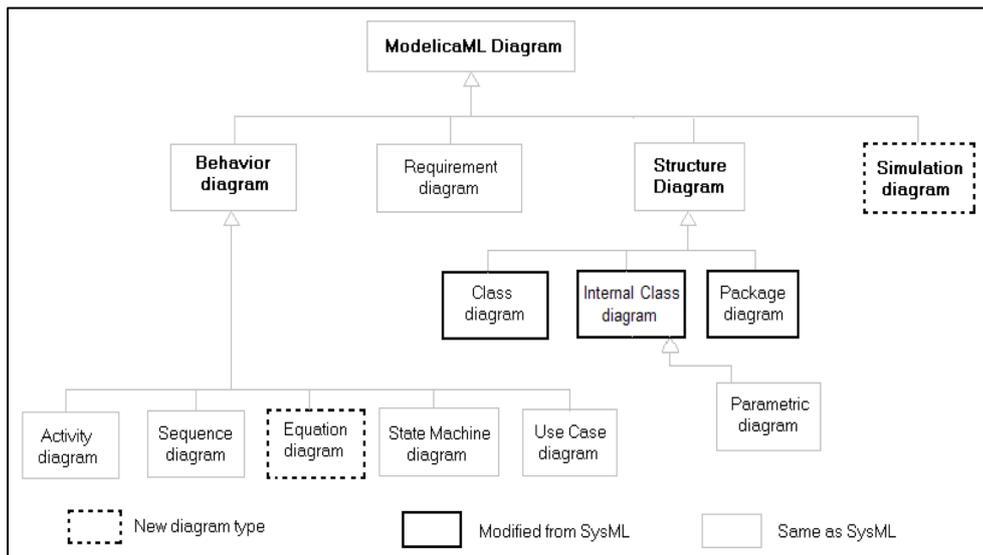


Abbildung 33: ModelicaML-Diagrammarten, Quelle: Hertzog/Pop (2009), S. 142.

Ersichtlich ist auch, dass der Diagrammtyp *Simulation* bei SysML nicht zur Verfügung steht. Hierin liegen der große Vorteil von ModelicaML gegenüber SysML und die wichtigste Unterscheidung der beiden Sprachen. ModelicaML ist eine Erweiterung von Modelica, einer Sprache zur Modellierung physikalischer Systeme. Die Besonderheit von ModelicaML besteht in der Möglichkeit, komplexe physikalische Systeme auf höherer Ebene zu modellieren, was die Entwicklung von Modellen und Simulationen erleichtert und beschleunigt. ModelicaML ermöglicht es, Modelle von Systemen auf verschiedenen Abstraktionsstufen zu erstellen, von einfachen Schaltkreisen bis hin zu komplexen mechatronischen Systemen und komplexen Regelungen.<sup>55</sup>

### 5.2.4 IDEF

Die vierte Sprache, die auf Basis der Möglichkeit zum Anforderungsmanagement, zur Variantenmodellierung, Systemmodellierung, Simulationsmöglichkeit und bereichsspezifischen Anwendung evaluiert wird, ist IDEF, was für *Integrated Definition Methods* steht. Die Sprache teilt sich in fünf unterschiedliche Typen auf, die sich hinsichtlich ihres Anwendungsgebiets unterscheiden.<sup>56</sup>

<sup>54</sup> Vgl. OpenModelica (2013), Online-Quelle [20.Januar.2023]

<sup>55</sup> Vgl. Hertzog/Pop (2009), S. 138 ff.

<sup>56</sup> Vgl. IDEF (2022), Online-Quelle [5.November.2022]

Die IDEF-Sprachen sind grafisch und basieren auf einer konzeptuellen Modellierungstechnik. Sie wurden entwickelt, um die Kommunikation zwischen Fachexperten, Managern und Entwicklern zu verbessern und das Verständnis von Prozessen und Systemen zu erleichtern. Es gibt mehrere IDEF-Sprachen, die unterschiedliche Zwecke erfüllen, darunter IDEF0 (Prozessmodellierung), IDEF1X (Datenmodellierung) und IDEF3 (Systemmodellierung).<sup>57</sup>

Die IDEF0-Sprache wird hauptsächlich verwendet, um Prozesse und Funktionen in einer Organisation darzustellen und die Beziehungen zwischen ihnen zu verstehen. Sie nutzt eine hierarchische Struktur, die aus Prozessen und Unterprozessen besteht, die in Aktivitäten und Funktionen unterteilt sind. Die IDEF3-Sprache dient zur Modellierung von Systemen und deren Beziehungen zu anderen Systemen und Umgebungen. Es wird eine Blockdiagramm-Darstellung genutzt, um die Beziehungen und Abhängigkeiten darzustellen. Diese Sprache hat ihre Stärken im Modellieren von Entscheidungen, Aktionen und Aktivitäten von Systemen. Nicht beziehungsweise nur beschränkt möglich ist hingegen das Modellieren von Anforderungen. Bei gewissen Anwendungen sind auch die anderen Typen von IDEF vertreten.<sup>58</sup>

### 5.2.5 Nutzwertanalyse

In diesem Abschnitt werden die evaluierten Sprachen mittels einer Nutzwertanalyse bewertet, um einerseits die Sprachen miteinander vergleichen zu können und andererseits die richtige Sprache für die spätere Anwendung auszuwählen. Vor der Nutzwertanalyse wurden die Bewertungsparameter mittels Paarvergleichsmethode verglichen und es wurde eine Gewichtung bestimmt. Diese fließt wiederum in die Nutzwertanalyse ein. Die folgenden Bewertungsparameter wurden gewählt, um die passende Sprache wählen zu können.

Variantenmanagement: Die Sprache muss für Variantenmodellierung und Variantenmanagement ausgelegt sein beziehungsweise dieses unterstützen. Dazu ist es erforderlich, dass es Methoden für die Sprache gibt.

Anforderungsmanagement: Ein Entwicklungsprojekt oder ein System kann nur erfolgreich und zielgerichtet entwickelt werden, wenn zu Beginn, wie im V-Modell in Kapitel 4.1 ersichtlich, die Anforderungen strukturiert erarbeitet und dokumentiert werden. Da die Dokumentation grafisch und modellbasiert durchgeführt wird, muss die Sprache dies auch unterstützen.

Systemmodellierung: Ziel ist es, dass nicht nur die Anforderungen, sondern auch Use Cases, Abläufe und das System selbst modelliert werden. Daher muss die Sprache das ganze System modellbasiert darstellen können.

Simulation: Gewisse Sprachen unterstützen Simulationen und bieten eigene Diagrammtypen an, um Simulationen abzubilden.

---

<sup>57</sup> Vgl. IDEF (2022), Online-Quelle [5.November.2022]

<sup>58</sup> Vgl. IDEF (2022), Online-Quelle [5.November.2022]

Bereichsspezifisch: Ein System im Sinne der Produktentwicklung ist eine komplexe Zusammensetzung von Hardware, Software, Firmware, Konstruktion und Stakeholdern wie Lieferanten, Auftragsgebern, Politik und anderen projektspezifischen Parteien. Die Sprache sollte möglichst viele dieser Disziplinen im Gesamtmodell darstellen können.

In Abbildung 34 ist der Vergleich der Kriterien zusammengefasst. Der Vergleich und somit die Bewertung der einzelnen Kriterien wurde mit Vertretern der einzelnen Disziplinen im Projektteam, Projektleitern und Projektleiterinnen sowie Führungskräften in der Produktentwicklung und dem Produktbereich durchgeführt. Es wurde bewusst ein breites Umfeld gewählt, da die Modellierungssprache nicht nur in der Entwicklungsabteilung, sondern auch im Produktbereich, zum Beispiel für das Anforderungsmanagement, eingesetzt werden muss.

	Variantenmanagement	Anforderungsmanagement	Systemmodellierung	Simulation	Bereichsspezifisch	Summe	Gewichtung
Variantenmanagement		1	1	2	2	6	0,30
Anforderungsmanagement	1		1	2	2	6	0,30
Systemmodellierung	1	1		2	1	5	0,25
Simulation	0	0	0		1	1	0,05
Bereichsspezifisch	0	0	1	1		2	0,10

Abbildung 34: Paarvergleichsmethode Sprache, Quelle: Eigene Darstellung

Wie bereits erwähnt, wird die Gewichtung aus dem Paarvergleich verwendet, um die Bewertungspunkte in der Nutzwertanalyse in deren Relevanz darzustellen. Da die Möglichkeit besteht, dass zum Beispiel eine Sprache die Möglichkeit zur Simulation unterstützt aber diese jedoch nicht relevant sind für die Anwendung.

Die Nutzwertanalyse ist in Abbildung 35 dargestellt. Es wurden die Sprachen *UML*, *SysML*, *ModelicaML* und *IDEF* jeweils einzeln mit den Kriterien bewertet. Für jedes Kriterium konnten zwischen null und zehn Punkte vergeben werden. Diese Punkte wurden daraufhin gewichtet mit der davor erstellen Bewertung. Das Ergebnis bildet die Summe der gewichteten Punkte und die Sprache mit der höchsten Punktzahl ist am geeignetsten für die Anforderungen im Produktentstehungsprozess. Die Vergabe der Punkte und der Paarvergleich würde mit den gleichen Personen durchgeführt.

		Variantenmanagement Gewichtung: 0,30	Anforderungsmanagement Gewichtung: 0,30	Systemmodellierung Gewichtung: 0,25	Simulation Gewichtung: 0,05	Bereichsspezifisch Gewichtung: 0,10
<b>UML</b>	Punkte	8	2	8	2	6
	Gewichtung x Punkte	2,40	0,60	2,00	0,10	0,60
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>5,70</b>				
<b>SysML</b>	Punkte	10	10	8	2	8
	Gewichtung x Punkte	3,00	3,00	2,00	0,10	0,80
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>8,90</b>				
<b>ModelicaML</b>	Punkte	6	8	8	8	4
	Gewichtung x Punkte	1,80	2,40	2,00	0,40	0,40
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>7,00</b>				
<b>IDEF</b>	Punkte	6	2	6	2	6
	Gewichtung x Punkte	1,80	0,60	1,50	0,10	0,60
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>4,60</b>				

Abbildung 35: Nutzwertanalyse Sprache, Quelle: Eigene Darstellung

Die Sprache SysML schnitt bei den beiden Kriterien Variantenmanagement und Anforderungsmanagement am besten ab und ist somit für die geforderte Anwendung qualifiziert. Da die Aufgabe, das Modellieren eines Gesamtmodelles, der Varianten sowie deren Anforderungen ist und die Sprache SysML in den relevantesten, Ergebnis aus der Gewichtung, Kriterien gegenüber den anderen Sprachen am besten erfüllt.

## 5.3 Werkzeuge für modellbasiertes Systems Engineering

Um die Sprache verwenden und das ganze Potenzial ausschöpfen zu können, ist das Werkzeug für die Modellierung von immenser Bedeutung. Es gibt verschiedene Werkzeuge von verschiedenen Herstellern, die alle spezifischen Vor- und Nachteile aufweisen. Da bei der Sprache die Wahl auf SysML gefallen ist, wird das Werkzeug ausgewählt, das am besten zur Sprache und den Anwendungsanforderungen passt. Die Bewertung der Werkzeuge Enterprise Architect, CATIA NoMagic und Eclipse Papyrus wird wie bereits bei der Sprache mittels Nutzwertanalyse durchgeführt.

### 5.3.1 Enterprise Architect

Das Werkzeug Enterprise Architect stammt von Sparx Systems und ist eine Plattform, die die Bildung von Modellen in allen Aspekten des Entwicklungszyklus abdeckt. Eingesetzt wird das Tool für verschiedene Problemstellungen im Unternehmen, wie etwa die Modellierung von Geschäftsmodellen, die Modellbildung bei Softwarelösungen oder die Modellierung von Gesamtsystemen sowie des damit verbundenen Anforderungsmanagements. In Abbildung 36 ist die grafische Benutzeroberfläche von Sparx Enterprise Architect dargestellt.

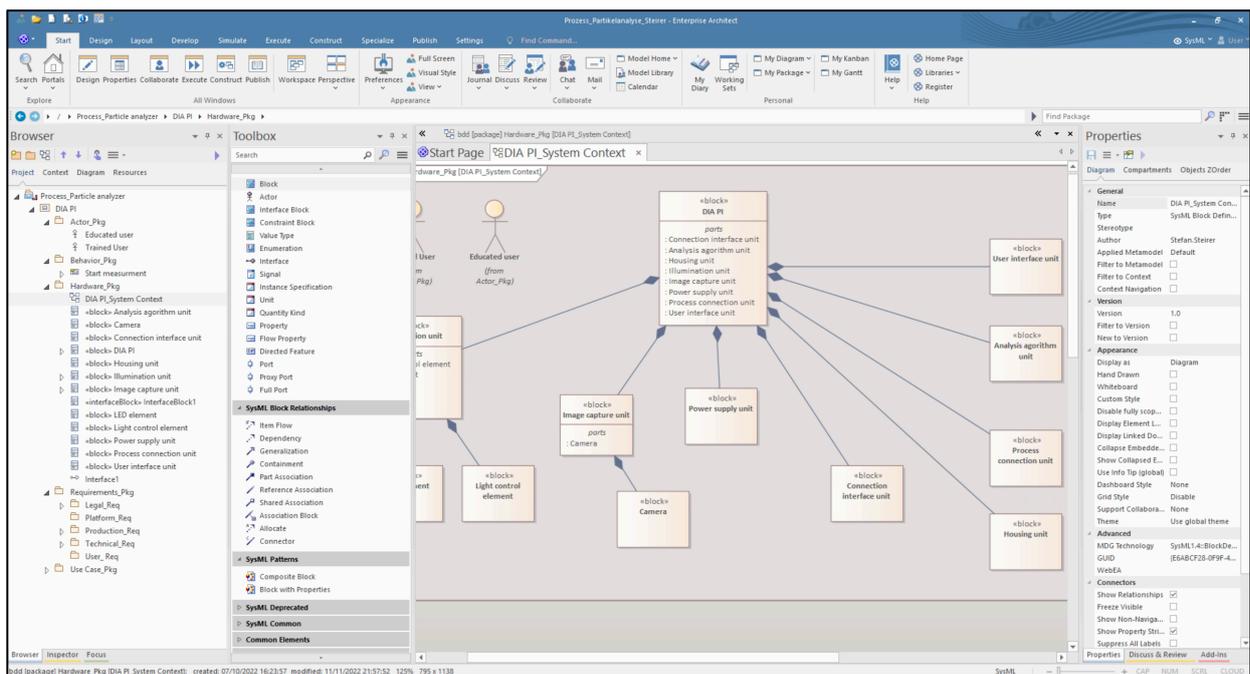


Abbildung 36: Sparx Enterprise Architect, Quelle: Eigene Darstellung

Mit dem Werkzeug können komplexe Systeme modelliert und für Stakeholder sowie Projektmitarbeiter und Projektmitarbeiterinnen verständlich dargestellt werden. Des Weiteren ist es möglich das man Anforderungen definiert, modelliert, verwaltet und verfolgt über den Entwicklungszeitraum, um einerseits Änderungen zu verwalten und andererseits zu verfolgen und zu steuern. Es gibt auch die Funktion, dass man Modellabhängigkeiten zwischen Elementen, Systemdynamiken und Systemzustände darstellt.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> Vgl. Sparx (2019), Online-Quelle [8.November.2022]

Das Werkzeug dient jedoch nicht nur zur Modellierung, sondern auch zur Dokumentation aller Projektergebnisse und hat den Vorteil, dass Informationen zentralisiert sind.<sup>60</sup> Das Werkzeug unterstützt die gängigsten Sprachen wie UML und SysML und das Unternehmen ist auch beitragendes Mitglied der Object Management Group (OMG).<sup>61</sup>

### 5.3.2 CATIA NoMagic

Das Tool NoMagic stammt vom Hersteller *Dassault Systemes* und ist ebenso wie *Enterprise Architect* ein Werkzeug für das Modellieren von Softwarearchitektur und Systems Engineering. Anders als *Sparx* bietet *Dassault Systemes* eine Reihe weiterer Werkzeuge an und deckt somit ein großes Spektrum ab, das von der Systemmodellierung über die Simulation bis hin zur Konstruktion reicht. In Abbildung 37 ist die grafische Benutzeroberfläche des Tools ersichtlich. Deutlich wird, dass der grundsätzliche Aufbau der Benutzeroberfläche und der Anordnung der Funktionen anderen Tools wie *Enterprise Architect* von *Sparx* stark ähnelt. Das Werkzeug unterstützt Anforderungsmanagement, Analysefunktionen, Simulationsfunktionen, Systemdesign, Verifikation und Validierung sowie die wichtigsten Sprachen, um dies für die modellbasierte Entwicklung von Gesamtsystemen umsetzen zu können.<sup>62</sup>

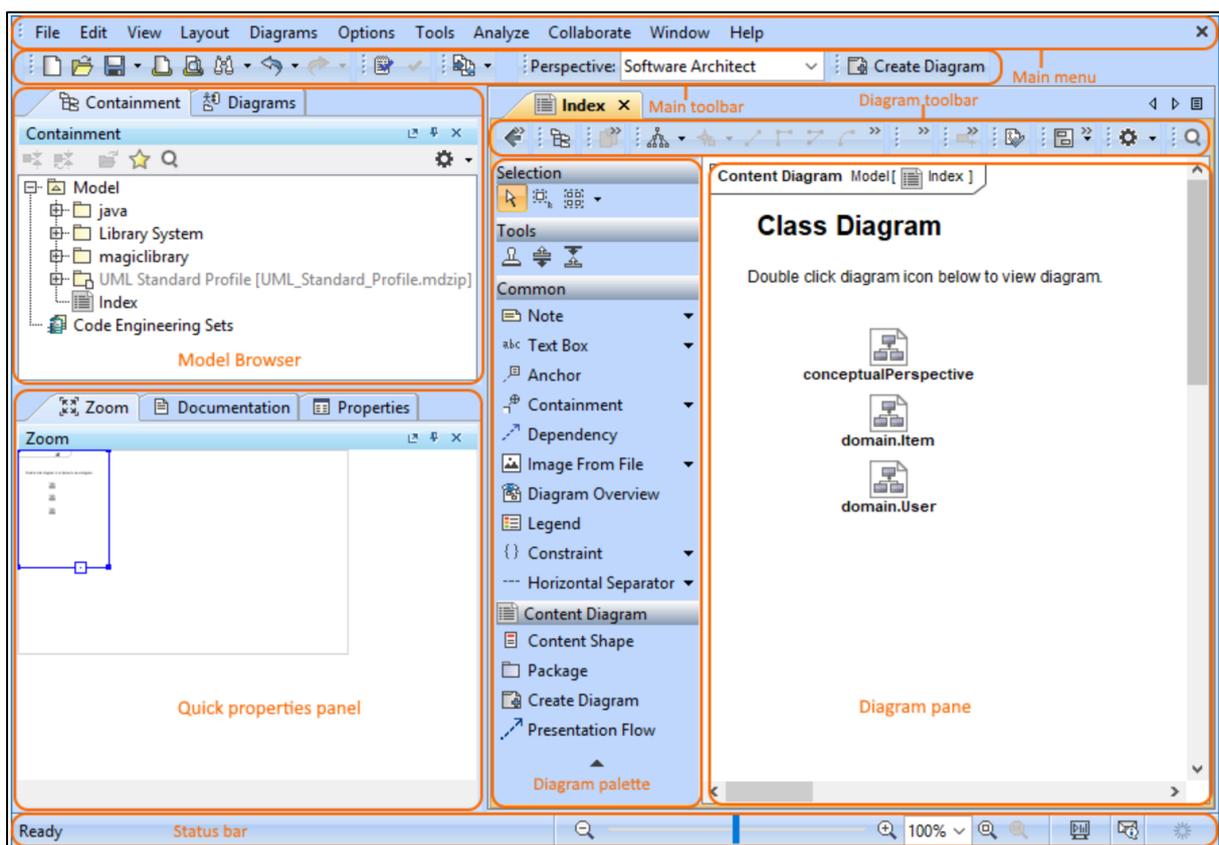


Abbildung 37: Dassault Systemes NoMagic Benutzeroberfläche, Quelle: Catia (2022), Online-Quelle [9.November.2022]

<sup>60</sup> Vgl. Sparx (2019), Online-Quelle [8.November.2022]

<sup>61</sup> Vgl. Sparx (2019), Online-Quelle [8.November.2022], S. 4 ff.

<sup>62</sup> Vgl. Catia (2022), Online-Quelle [9.November.2022]

### 5.3.3 Eclipse Papyrus

Das letzte Werkzeug in der Evaluierung ist *Papyrus* von *Eclipse*. Dieses unterstützt ebenso die Sprachen *UML* und *SysML* zur Modellierung von Systemen, Softwarelösungen oder anderen Anwendungen im Unternehmen. Der größte Vorteil gegenüber den anderen beiden Tools liegt darin, dass *Papyrus* kostenlos ist und somit gerade in der Evaluierungsphase von modellbasierten Methoden im Unternehmen von Interesse sein könnte. Auch für Universitäten oder Non-Profit-Organisationen sind kostenfreie Tools vorteilhaft. Obwohl das Tool eine Open-Source-Software ist, wird das Werkzeug auch in der Industrie eingesetzt. *Papyrus* bietet die Möglichkeit, alle Diagrammart von *UML* und *SysML* anzuwenden, und hat das Ziel, die Spezifikationen nach *OMG* umzusetzen. Die grafische Benutzeroberfläche ist in Abbildung 38 dargestellt und zeigt einen ähnlichen Aufbau wie die anderen Tools. Bei *Papyrus* sind die Modellierungsfunktionen so konzipiert, dass sie angepasst werden können, um die Mehrfachnutzung von Modellen zu fördern. Dennoch gibt es einige Funktionen, die *Papyrus* im Gegensatz zu *Enterprise Architect* und *NoMagic* nicht kann beziehungsweise die nur begrenzt anwendbar sind. *Papyrus* konzentriert sich hauptsächlich auf die Modellierung von Softwaresystemen und fokussiert sich auf die bediene Sprachen *UML* und *SysML* und nicht wie zum Beispiel *Enterprise Architect* auch auf das Darstellen von Geschäftsmodellen, Anforderungen und Risiken. Ebenso ist das Werkzeug von *Sparx* in der Lage große und komplexe Systeme mit einer Vielzahl von Elementen und Beziehungen zu verwalten während *Papyrus* gerade bei umfangreichen Modellen an seine Leistungsgrenzen stößt.<sup>63</sup>

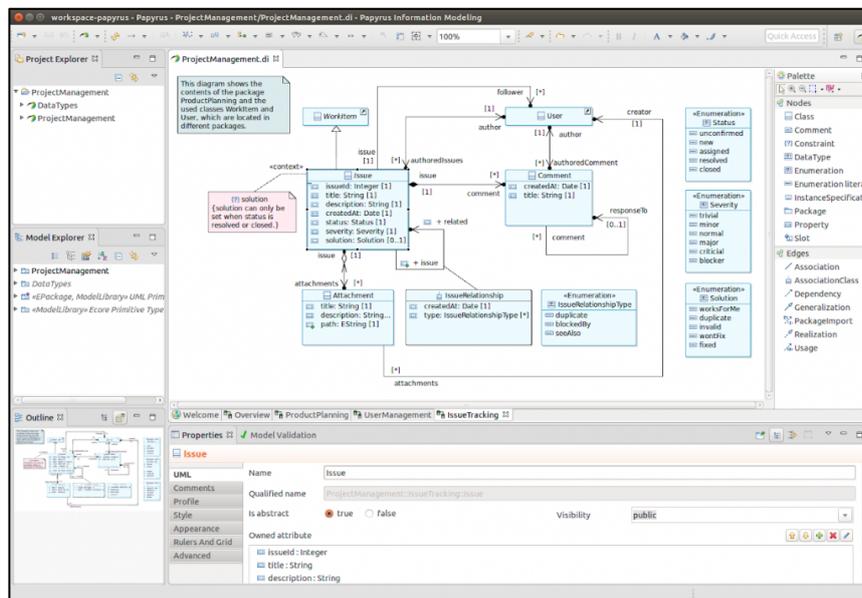


Abbildung 38: Eclipse Papyrus Benutzeroberfläche, Quelle: EclipseSource (2022), Online-Quelle [8.November.2022]

### 5.3.4 Nutzwertanalyse

Nach der gleichen Methodik wie bei der Bewertung der Sprache wird auch das Werkzeug für die weitere Anwendung definiert. Da für das Werkzeug andere Kriterien gelten als für die Sprache, werden die ausgewählten Kriterien nachfolgend kurz beschrieben. In Abbildung 39 ist der Paarvergleich dargestellt.

<sup>63</sup> Vgl. EclipseSource (2022), Online-Quelle [8.November.2022]

Anschaffungskosten: Die Anschaffungskosten beschreiben, mit welchen Kosten gerechnet werden muss, um das Werkzeug nutzen zu können. Dies ist ein wesentlicher Punkt, da mit dem Werkzeug langfristig geplant und ein Großteil des Projektwissens abgebildet wird.

Erfahrung beim Arbeitgeber: Es sind grundsätzlich Werkzeuge zu bevorzugen, zu denen es bereits Erfahrungen im Unternehmen gibt. Vielleicht wurde das Tool auch schon bei Projekten evaluiert oder eingesetzt. Bei der Bewertung gilt jedoch, dass das Werkzeug zum Unternehmen und zu den Anwendungsfällen passen muss. Ist dies nicht gegeben, ist der Nutzen erster Erfahrungen von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen nicht relevant.

Integrierbarkeit: Dieser Parameter gibt an, ob das Werkzeug in aktuelle Prozesse des Unternehmens integrierbar ist.

Benutzerfreundlichkeit: Das Werkzeug sollte das Modell übersichtlich darstellen und die Navigation unterstützen, da das Modell nicht nur vom System Engineer, sondern vom gesamten Projektteam und von definierten Stakeholdern eingesehen werden kann.

Modellierungssprachen: Die ausgewählte Modellierungssprache für die konkrete Anwendung ist SysML, da diese Sprache für das Systems Engineering prädestiniert ist. Das Werkzeug muss die Sprache möglichst umfangreich unterstützen.

Support: Dieses Kriterium bewertet den grundsätzlichen Support des Herstellers, die vorhandene Literatur sowie die bereits vorhandenen Modelle, um sich Expertise einholen zu können.

Die Kriterien Modellierungssprachen, Anschaffungskosten und Benutzerfreundlichkeit wurden am höchsten bewertet und sind die relevantesten Eigenschaften, die das Werkzeug erfüllen muss.

	Anschaffungskosten	Erfahrung beim Arbeitgeber	Integrierbarkeit	Benutzerfreundlich	Modellierungssprachen	Support	Summe	Gewichtung
Anschaffungskosten	X	2	1	1	1	1	6	0,20
Erfahrung beim Arbeitgeber	0	X	0	1	0	1	2	0,07
Integrierbarkeit	1	2	X	0	0	1	4	0,13
Benutzerfreundlich	1	1	2	X	0	1	5	0,17
Modellierungssprachen	1	2	2	2	X	2	9	0,30
Support	1	1	1	1	0	X	4	0,13

Abbildung 39: Paarvergleichsmethode Werkzeug, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 40 ist die Nutzwertanalyse des Werkzeugs abgebildet und das Ergebnis der Bewertung ersichtlich.

		<b>Anschaffungskosten</b> Gewichtung: 0,20	<b>Erfahrung beim Arbeitgeber</b> Gewichtung: 0,07	<b>Integrierbarkeit</b> Gewichtung: 0,13	<b>Benutzerfreundlich</b> Gewichtung: 0,17	<b>Modellierungssprachen</b> Gewichtung: 0,30	<b>Support</b> Gewichtung: 0,13
<b>Sparx Enterprise Architect</b>	Punkte	4	8	8	8	9	8
	Gewichtung x Punkte	0,80	0,53	1,07	1,33	2,70	1,07
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>7,50</b>					
<b>CATIA No Magic</b>	Punkte	4	2	8	8	9	8
	Gewichtung x Punkte	0,80	0,13	1,07	1,33	2,70	1,07
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>7,10</b>					
<b>Eclipse Papyrus</b>	Punkte	9	2	6	6	8	4
	Gewichtung x Punkte	1,80	0,13	0,80	1,00	2,40	0,53
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>6,67</b>					

Abbildung 40: Nutzwertanalyse Werkzeug, Quelle: Eigene Darstellung

Am besten zur konkreten Anwendung und zum Unternehmen passt demnach das Werkzeug Enterprise Architect von Sparx, da alle Anforderungen mit diesem Werkzeug erfüllt werden und es bereits Erfahrungen hiermit im Unternehmen gibt.

Grundsätzlich kämen aber auch andere Werkzeuge in Frage, wie zum Beispiel CATIA NoMagic. Der entscheidende Faktor ist folglich die Expertise im Unternehmen, da die anderen Kriterien von anderen Herstellern ebenso erfüllt werden.

## 5.4 Methoden für modellbasiertes Systems Engineering

In den beiden vorhergehenden Abschnitten wurden die Modellierungssprachen sowie Werkzeuge evaluiert und nach ausgewählten Kriterien bewertet. Um die Sprache und das Werkzeug effizient und zielführend anwenden zu können, wird eine Methode verwendet, wie das Modell aufgebaut wird. Bei den Methoden bestehen starke anwendungsbezogene Unterschiede, wobei jede Methode eigene Vor- und Nachteile aufweist. In den nächsten Unterpunkten werden die Methoden SYSMOD, VAMOS, FAS und OOSEM untersucht und nach ausgewählten Kriterien bewertet.

### 5.4.1 SYSMOD

SYSMOD steht für Systems Modeling Toolbox und ist eine Methode, um modellbasiertes Systems Engineering umzusetzen. Die Methode hat, ähnlich wie eine Vielzahl der Sprachen, ihren Ursprung in der Softwareentwicklung und wurde im Laufe der Zeit auf die Systementwicklung angepasst. Die Prozesse in SYSMOD sind als Leitfaden anzusehen und nicht als strikte Richtlinien. Daher ist es von Bedeutung, ein grundsätzliches Verständnis der Methode aufzubauen, um das Wissen auf verschiedene Systeme und Projekte anwenden zu können. Die Methode ist auf die Modellierungssprachen von OMG ausgelegt, wodurch die Nutzung gemeinsam mit UML oder SysML prädestiniert ist. In Abbildung 41 ist die grundsätzliche Vorgehensweise für das Erstellen von Modellen mit SYSMOD dargestellt.<sup>64</sup>

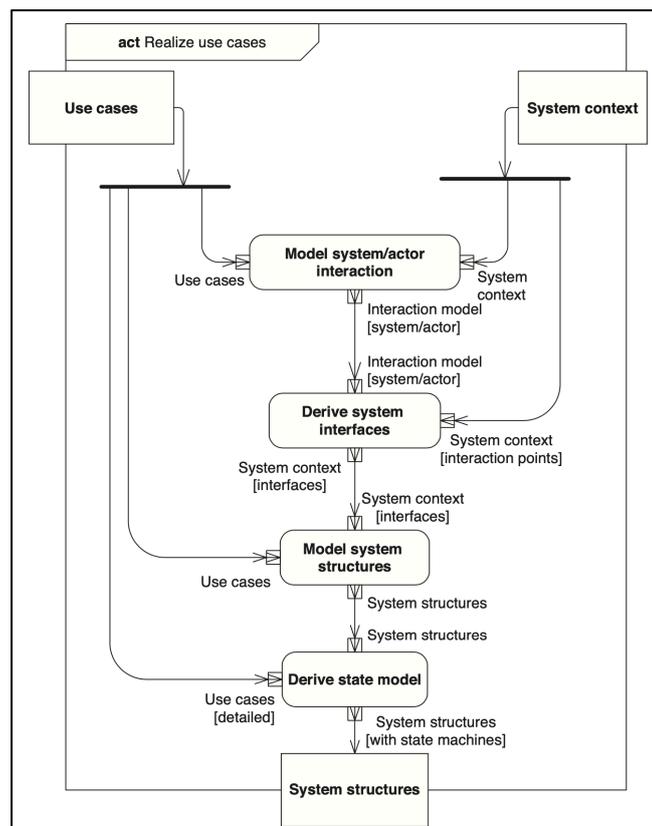


Abbildung 41: Vorgehensweise für SYSMOD, Quelle: Weilkiens (2006), S. 26.

<sup>64</sup> Vgl. Weilkiens (2020), S. 1 ff.

Die Vorgehensweise, um Anwendungsfälle zu realisieren, teilt sich in mehreren Schritten auf und beginnt mit dem Festlegen der Anforderungen und Anwendungsfälle. Der nächste Schritt besteht darin, die Anwendungsfälle und den Systemkontext zu modellieren. Unter Systemkontext wird die Interaktion eines Systems mit der Umgebung und Umwelt verstanden. Im nächsten Schritt wird die Wechselwirkung zwischen dem System und den Akteuren im Hinblick auf einen Anwendungsfall beschrieben. Für jeden Anwendungsfall, Use-Case, wird ein Interaktionsmodell erstellt, das die Interaktion zwischen dem System und dem User beschreibt.<sup>65</sup>

## 5.4.2 VAMOS

Da SysML oder UML keine vorgefertigte Methode für das Modellieren von Varianten bietet, wurde die Methode VAMOS erarbeitet, die diese Lücke schließt. Die Methode VAMOS nutzt die Sprache SysML, um Modelle mit Variantenmanagementaspekten zu erstellen. Die Methode VAMOS ist Teil des SYSMOD-Profiles, kann jedoch unabhängig von SYSMOD benutzt werden. Die VAMOS-Methode setzt sich aus drei übergeordneten Elementen zusammen: dem *Core*, der *Variations* und der *Variation Configurations* (siehe Abbildung 42).<sup>66</sup>

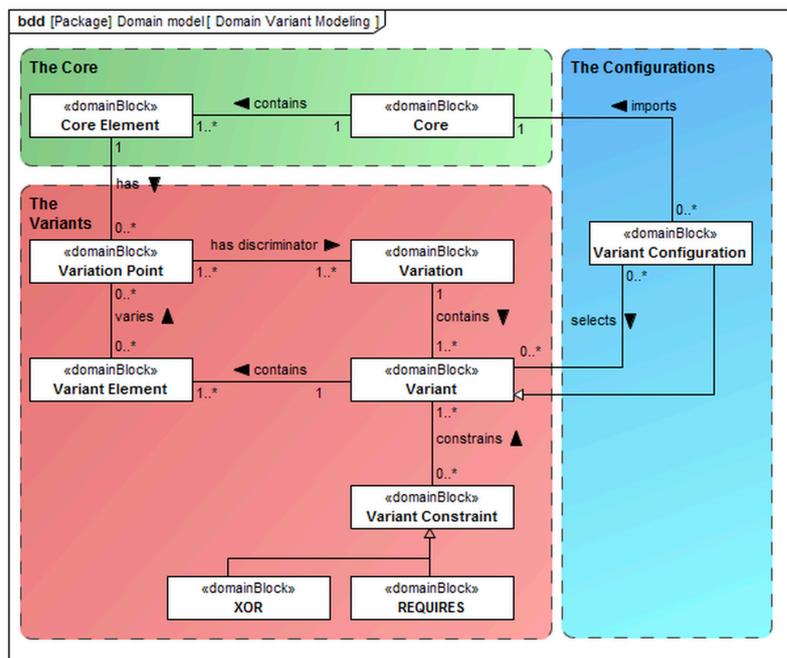


Abbildung 42: Übersicht VAMOS-Methode, Quelle: Weilkiens (2016), S. 4.

Der *Core* enthält alle *Core*-Elemente des Systems, wie Anforderungen, Anwendungsfälle, Systemverhalten, Systemkontext und Architektur. Welche Elemente das System enthält, ist grundsätzlich dem Systems Engineering Mitarbeiter oder der Systems Engineering Mitarbeiterin vorbehalten und muss individuell entschieden werden. Auf die Elemente wird näher eingegangen, falls diese Methode ausgewählt wird.<sup>67</sup>

<sup>65</sup> Vgl. Weilkiens (2006), S. 26 ff.

<sup>66</sup> Vgl. Weilkiens (2016), 3 ff.

<sup>67</sup> Vgl. Weilkiens (2016), S. 7 ff.

Die *Variations* bilden alle Eigenschaften und deren Varianten ab. Als Beispiel kann ein Fahrrad dienen. Das Fahrrad besteht grundsätzlich aus den folgenden Komponenten: Rad, Bremse, Pedale, Lenkung und Licht. Innerhalb dieser Komponenten gibt es verschiedenste Ausführungen oder anders bezeichnet Varianten. Der letzte Baustein von VAMOS sind die sogenannten *Variation Configurations*. Diese Konfigurationen setzen sich aus verschiedensten Varianten zusammen und bilden somit eine Systemkonfiguration. Es ist mit einem Rezept vergleichbar, um ein Produkt zu entwerfen und die gestellten Anforderungen zu erfüllen.<sup>68</sup>

### 5.4.3 FAS

Bei der FAS-Methode handelt es sich um eine Methode, mit der eine funktionale Architekturbeschreibung direkt aus Anwendungsfällen auf intuitive und nachvollziehbare Weise erstellt werden kann. Die Methode ist eine strukturelle Beschreibung in einer grafischen blockorientierten Darstellung und leitet die funktionale Architektur in blockorientierter Form aus Anwendungsfällen ab. Dies geschieht über die Gruppierung von Anwendungsfallaktivitäten. Hierbei wird von Use Cases gesprochen. Daher ist der wichtigste Schritt der FAS-Methodik die Gruppierung von Use-Case-Aktivitäten in funktionale Gruppen. Die Gruppierung wird mittels Matrix erstellt und ist somit für alle Disziplinen übersichtlich gestaltet und leicht zu verstehen. Wie Abbildung 43 zeigt, resultiert die funktionale Architektur aus den Anforderungen und Anwendungsfällen. Die Methode entstand im Jahr 2010 und ist im modellbasierten System Engineering eine weit verbreitete Methode, die in einer Vielzahl von Projekten eingesetzt wird.<sup>69</sup>

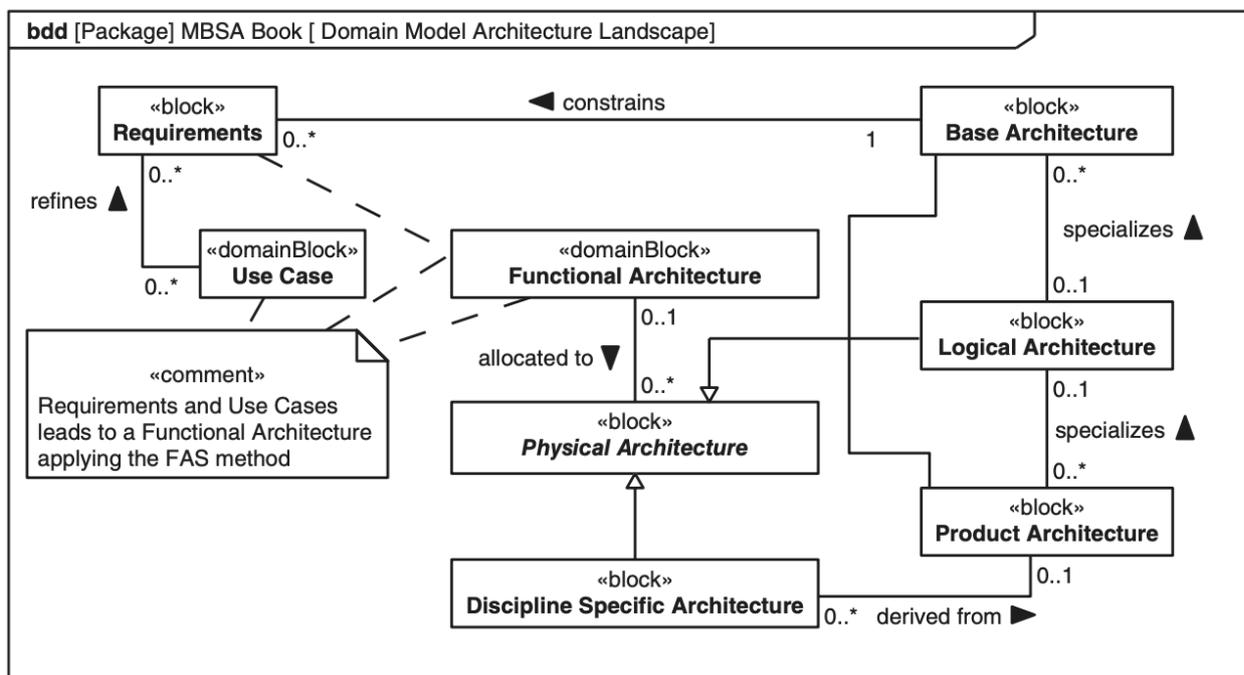


Abbildung 43: Überblick FAS-Methode, Quelle: Weilkiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 216.

<sup>68</sup> Vgl. Weilkiens (2016), S. 7 ff.

<sup>69</sup> Vgl. Weilkiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 195 ff.

Die Methode ist unabhängig von SYSMOD, jedoch liefert die SYSMOD-Methode einige Inputs für die FAS-Methode, weshalb die FAS-Methode oft in den SYSMOD-Prozess integriert wird. Dies ist jedoch vom Projekt abhängig. Angewendet wird die Methode grundsätzlich mit der Modellierungssprache SysML.<sup>70</sup>

### 5.4.4 OOSEM

Die Methode OOSEM ist eine objektorientierte Systems-Engineering-Methode und wurde 1998 eingeführt. Der Prozess hinter der OOSEM-Methode wird in Abbildung 44 dargestellt und in weiterer Folge kurz beschrieben.<sup>71</sup>

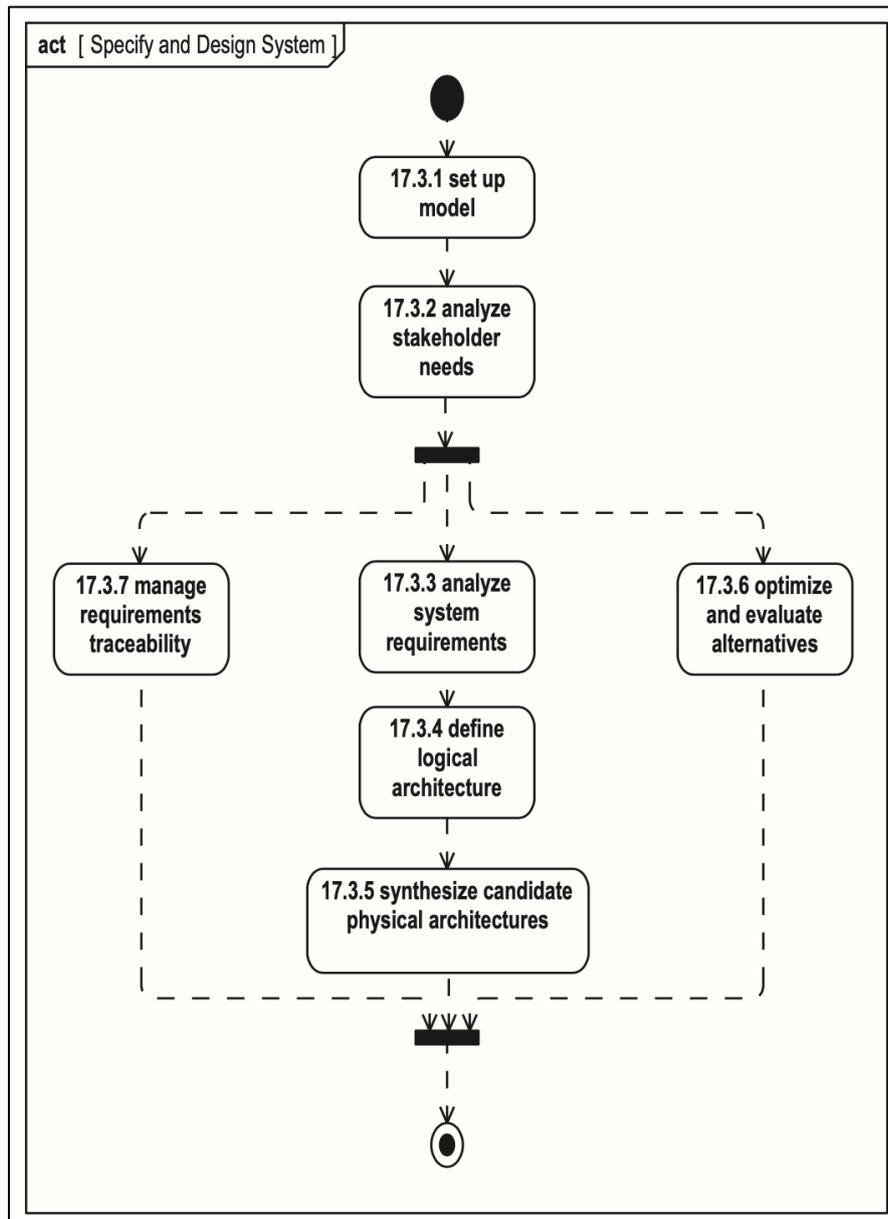


Abbildung 44: Übersicht OOSEM-Methode, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 423.

<sup>70</sup> Vgl. Weikiens/Lamm/Roth/Walker (2022), 195 ff.

<sup>71</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 417 ff.

Der erste Schritt der Methode besteht darin, das Modell aufzusetzen und zu planen, wie es aufgebaut wird. In weiterer Folge werden die Stakeholder-Bedürfnisse analysiert, um zu erkennen, was das System erfüllen muss, damit es den Anforderungen gerecht wird. Danach werden die Anforderungen an das System spezifiziert und es wird festgelegt, wie das System auf Eingabe- und Ausgabeparameter reagiert. Im nächsten Schritt wird das System in logische Komponenten zerlegt und es wird definiert, wie die logischen Komponenten zusammenwirken müssen, um den Anforderungen zu entsprechen.<sup>72</sup>

Im Anschluss werden die logischen Komponenten den physischen Komponenten des Systems zugeordnet. Die Aktivität *Optimize und Evaluate Alternatives* wird im gesamten Prozess angewendet und dient zur Analyse des Systems, für Trade-Off-Studien sowie das Optimieren des Systems. Neben diesen Schritten unterstützt OOSEM auch das Verifizieren und Validieren des Systems.<sup>73</sup>

### 5.4.5 Nutzwertanalyse

Nach derselben Methodik, die bei der Auswahl der Sprache und des Werkzeugs angewandt wurde, wird auch die Methode bewertet. Somit wird auch definiert, wie das Modell strukturiert ist und nach welchem Grundgerüst sich das Systemmodell richtet. Es wurden die folgenden Kriterien definiert, mit denen eine Gewichtung errechnet wurde. Diese Gewichtung fließt in weiterer Folge in die Nutzwertanalyse ein.

Variantenmanagement: Da die Anwendung und das System in mehrere Varianten geteilt sind, muss die Methode mit verschiedenen Varianten umgehen und diese auch darstellen können. Der Parameter *Variantenmanagement* ist somit einer der ausschlaggebendsten in der Bewertung.

Literatur: Zwar gibt es erste Erfahrungen mit dem Werkzeug im Unternehmen, mit Variantenmanagement wurde sich jedoch noch nicht intensiver auseinandergesetzt. Daher ist es von großer Bedeutung, dass es professionelle Literatur zu diesem Thema gibt.

Verständlichkeit: Das nächste bedeutsame Kriterium ist die Verständlichkeit der Modellstruktur, da das Modell auch für Laien zugänglich ist und somit verständlich sein muss. Da dies bei komplexen Aufgabenstellungen oft schwer gewährleistet werden kann, muss die Methode dabei unterstützen.

Anwendbarkeit: Da neben dem Variantenmanagement auch andere Themen wie die Use-Case-Erstellung oder das Anforderungsmanagement von großer Bedeutung sind und beim Systems Engineering auch diese Modelle erstellbar sein müssen. Da zu Beginn immer mit den Anforderungen begonnen wird und danach sukzessive das Modell aufgebaut wird.

---

<sup>72</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 410 ff.

<sup>73</sup> Vgl. Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 417 ff.

Systemstruktur: Produkte und Systeme sind in der Messtechnik meist aufwendige und hochkomplexe Gebilde, wie zu Beginn der Arbeit ersichtlich wurde. Diese Systeme setzen sich aus allen technischen Disziplinen wie der Konstruktion, Firmware, Software und Elektronik zusammen. Dies erhöht die Komplexität von Systemen enorm, weshalb es von Bedeutung ist, dass die Methode diese Komplexität abstrakt und ohne Informationsverlust darstellen kann, was für die Umsetzung relevant ist. Zusätzlich soll das System trotz Komplexität verständlich und lesbar dargestellt werden können.

Wie bei der Gewichtung in Abbildung 45 ersichtlich, sind die Parameter *Variantenmanagement*, *Anwendbarkeit* und *Systemstruktur* am wichtigsten, wenngleich alle Kriterien von Bedeutung sind.

	Variantenmanagement	Literatur	Verständlichkeit	Anwendbarkeit	Systemstruktur	Summe	Gewichtung
Variantenmanagement	X	2	1	1	1	5	0,25
Literatur	0	X	1	1	1	3	0,15
Verständlichkeit	1	1	X	0	0	2	0,10
Anwendbarkeit	1	1	2	X	1	5	0,25
Systemstruktur	1	1	2	1	X	5	0,25

Abbildung 45: Paarvergleichsmethode Methode, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 46 ist die Nutzwertanalyse der Methode dargestellt. Im Rahmen der Nutzwertanalyse wurde mit der Gewichtung und der Bewertung der Kriterien die Summe bestimmt, mit dem Ergebnis, dass die Methode VAMOS am besten zur Anwendung passt, da hiermit das Variantenmanagement am besten abgebildet werden kann.

		Variantenmanagement Gewichtung: 0,25	Literatur Gewichtung: 0,15	Verständlichkeit Gewichtung: 0,10	Anwendbarkeit Gewichtung: 0,25	Systemstruktur Gewichtung: 0,25
<b>SYSMOD</b>	Punkte	4	8	8	8	6
	Gewichtung x Punkte	1,00	1,20	0,80	2,00	1,50
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>6,50</b>				
<b>VAMOS</b>	Punkte	10	8	8	6	8
	Gewichtung x Punkte	2,50	1,20	0,80	1,50	2,00
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>8,00</b>				
<b>FAS</b>	Punkte	6	8	8	8	6
	Gewichtung x Punkte	1,50	1,20	0,80	2,00	1,50
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>7,00</b>				
<b>OOSEM</b>	Punkte	6	8	8	6	6
	Gewichtung x Punkte	1,50	1,20	0,80	1,50	1,50
	Summe der Punkte nach Gewichtung	<b>6,50</b>				

Abbildung 46: Nutzwertanalyse Methode, Quelle: Eigene Darstellung

## 6 MODELLBASIERTES SYSTEMS ENGINEERING EINES PROZESSINTEGRIERTEN PARTIKELANALYSATORS

Im folgenden Kapitel wird analysiert, welche prozessintegrierte Messtechnik aktuell am Markt existiert, damit auf dieser Basis definiert werden kann, welche Anforderungen erfüllt werden sollen.

Danach werden die Varianten der prozessintegrierten Partikelanalyseinrichtung nach einer ausgewählten Methode zur Modularisierung gebildet und es wird versucht, Module zu bilden, um so wenig verschiedene Varianten wie möglich zu entwickeln und zugleich allen Anforderungen gerecht zu werden.

Der nächste Schritt betrifft das modellbasierte Systems Engineering der definierten Systeme mit dem im vorangegangenen Kapitel festgelegten Werkzeug sowie der entsprechenden Sprache und Methode. Die weitere Vorgehensweise in diesem Kapitel ist in Abbildung 47 dargestellt. Diese dient als Überblick darüber, wie von der Analyse des Marktes zu den Anforderungen und zum Systemmodell übergeleitet werden kann.

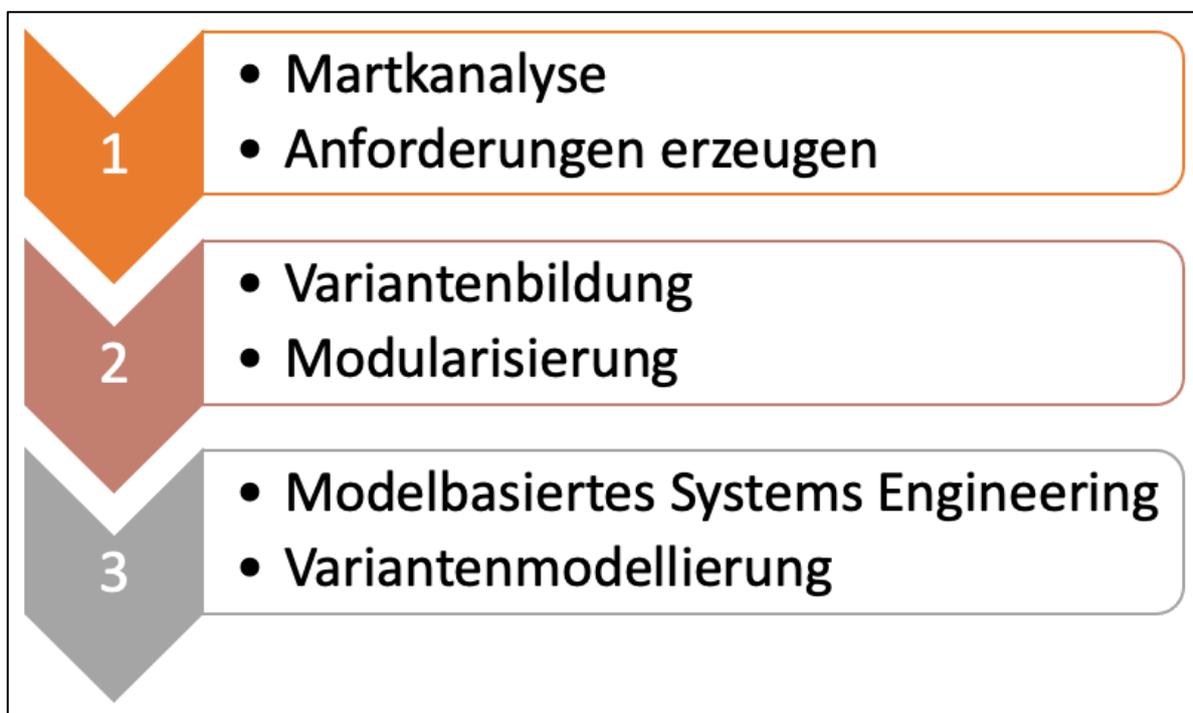


Abbildung 47: Vorgehensweise der Modellierung, Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 47 ersichtlich, besteht der erste und auch einer der wichtigsten Schritte der Produktentwicklung in der Analyse des Marktes sowie der Mitbewerber und Mitbewerberinnen. Dies ist von Relevanz, um das richtige Produkt mit den richtigen Spezifikationen zu entwickeln. Die Marktanalyse gibt auch Aufschluss darüber, ob Produktvarianten gefordert sind oder gegebenenfalls Zubehör benötigt wird, um gewisse Funktionen erfüllen zu können.

Im zweiten Schritt werden die Varianten gebildet und modularisiert, um möglichst viele gleiche Module und Komponenten zu verwenden.

Wurden die Varianten gebildet, wird mit dem Systems Engineering gestartet und es werden die Varianten modelliert sowie deren Abhängigkeiten und Anforderungen dargestellt.

## 6.1 Marktanalyse prozessintegrierte Partikelmesstechnik

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Markt der prozessintegrierten Partikelanalyse analysiert, um in weiterer Folge das richtige Portfolio mit den richtigen Systemvarianten entwickeln und schließlich vertreiben zu können. Hier ist es essenziell, zu verstehen, dass modellbasierte Methoden nicht beim kreativen Variantenbildungsprozess unterstützen, sondern eher als Dokumentationstool für Anforderungen, Use Cases und schließlich Systemarchitektur zu sehen sind.

Die Analyse der Konkurrenz und der Produkte wurde mithilfe einer detaillierten Recherche durchgeführt, um im nächsten Schritt die Systemanforderungen sowie die Anwendungsfälle definieren zu können.

Aus der Marktanalyse sind die Hersteller Sympatec, Microtrac und Malvern hervorgegangen, die bereits etablierte Produkte am Markt haben. Nachdem die Hersteller bekannt waren, wurden folgende Merkmale bei den jeweiligen Herstellern recherchiert:

- Technologie: Welche Sensortechnologien werden verwendet?
- Sensorinformation: Welche Anforderungen erfüllt der Sensor?
- Prozessintegrationsart: Wie werden die Technologien im Prozess integriert?
- Aggregatzustand: Welchen Zustand hat die Probe bei der Messung?
- Messbereich: In welchem Größenbereich können Proben gemessen werden?
- Probennahme: Wie wird die Probe genommen und in die Messeinrichtung transportiert?
- Schnittstellen zum Leitsystem: Wie wird die Messeinrichtung in das Leitsystem integriert?

In Tabelle 6 ist die Marktanalyse der dynamischen Bildanalyse zusammengefasst.

<b>Hersteller</b>	Sympatec, Microtrac
<b>Technologie</b>	Dynamische Bildanalyse
<b>Sensorinformation</b>	4,2-Megapixel-Kamera, 300 Bilder pro Sekunde
<b>Prozessintegrationsart</b>	Online, Atline
<b>Aggregatzustand</b>	Fest, Flüssig
<b>Messbereich</b>	Fest: 1,8 µm–3500 µm, 22 µm–35000 µm Flüssig: 1 µm–5000 µm
<b>Probennahme</b>	Fest: Dynamisch und kontinuierlich durch Unterdruck des Analysesystems Flüssig: Durchflussküvette mit Bypass-Leitung
<b>Schnittstellen</b>	TCP/IP, Modbus, Profibus, OPC, RS232, RS485

Tabelle 6: Ergebnisse der Marktanalyse der dynamischen Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung

Die Analyse ergab, dass es grundsätzlich die gleichen Hersteller sind, die auch bereits Labormessgeräte in diesem Segment produzieren und entwickeln. Es gibt also keine Mitbewerber, die komplett neu sind und sich nur auf die Prozessmesstechnik in der Partikelanalyse fixiert haben, da die Technologie der Messung sehr komplex ist.

Zusätzlich wurde erkannt, dass in der dynamischen Bildanalyse nur Online und Atline von Interesse sind, während die Prozessintegrationsarten Inline und Offline nicht relevant sind oder eine mögliche Marktlücke darstellen. Ähnlich interessant ist, dass gasförmige Proben keine Rolle spielen und nur feste und flüssige Proben in Prozessen vermessen werden.

Der aktuelle Markt der Laserbeuger-Messeinrichtungen ist in Tabelle 7 abgebildet. Ähnlich wie bei der dynamischen Bildanalyse sind auch bei der prozessintegrierten Laserbeuger-Technologie die Hersteller, die aktuell den Markt kontrollieren, aus der Labormesstechnik bekannt.

Hinsichtlich der Arten der Prozessintegration werden beim Laserbeuger alle vier Arten, also Online, Inline, Atline und Offline, von den Herstellern angeboten, jedoch auch nur für die Aggregatzustände flüssig und fest und nicht für gasförmige Proben.

Die Probenahme ist beim Hersteller Sympatec bei der Bildanalyse und dem Laserbeuger gleich aufgebaut, was bedeutet, dass der Fokus in der Entwicklung stark auf dem Variantenmanagement lag, um möglichst viele Gleichteile zu nutzen.

<b>Hersteller</b>	Sympatec, Malvern
<b>Technologie</b>	Laserbeuger
<b>Sensorinformation</b>	-
<b>Prozessintegrationsart</b>	Online, Inline, Atline, Offline
<b>Aggregatzustand</b>	Fest, Flüssig
<b>Messbereich</b>	Fest: 0,1 µm–1000 µm, 0,25 µm–35000 µm Flüssig: 0,1 µm–1000 µm
<b>Probennahme</b>	Fest: Primäre Schnecken- oder Rinnenprobennehmer entnehmen eine Teilprobe aus der Hauptprozessleitung Flüssig: Durchflussküvette mit Bypass-Leitung, Direkt im Prozess
<b>Schnittstellen</b>	TCP/IP, Modbus, Profibus, OPC, RS232, RS485

Tabelle 7: Ergebnisse der Marktanalyse der Laserbeuger, Quelle: Eigene Darstellung

Die Schnittstellen für die Integration in die Anlage sind bei beiden Technologien und bei allen Herstellern ähnlich und der Markt fordert, dass möglichst viele Schnittstellen unterstützt werden, um die Analysesysteme möglichst flexibel einsetzen zu können.

Eine weitere Erkenntnis der Analyse ist, dass die Technologie der dynamischen Lichtstreuung (siehe Unterkapitel 2.3) keine Anwendung in der prozessintegrierten Partikelanalyse hat und auch von keinem Hersteller angeboten wird. Dies könnte den Grund haben, dass der Größenbereich der dynamischen Lichtstreuung in der Prozessanalyse nicht relevant ist, da hauptsächlich Proben vermessen werden, die im Mikrometerbereich liegen und bis in den Millimeterbereich reichen.

Diese Erkenntnis ist von großer Bedeutung, da somit einige Varianten im Entwicklungsprozess wegfallen und die Komplexität der Anforderungen abnimmt.

Zusammengefasst können die folgenden Aussagen getroffen werden, die sich in den Anforderungen widerspiegeln werden:

- Dynamische Lichtstreuung in der prozessintegrierten Partikelanalyse nicht verbreitet bzw. nicht benötigt
- Anwendung hauptsächlich bei festen und flüssigen Proben
- Keine Inline-Integration bei der dynamischen Bildanalyse
- Größenbereich von niedrigem Mikrometerbereich bis zum niedrigen Millimeterbereich
- Hohe Flexibilität bei den Schnittstellen gefordert
- Online hat das größte Potential und ist aktuell am weitesten verbreitet

Aus der Analyse geht auch hervor, dass der Hersteller Sympatec das größte Portfolio besitzt und den Anforderungen sowie dem Marktanteil zufolge als Benchmark-Instrument gesehen werden kann. In Abbildung 48 ist ein Laserbeuger mit Probennahme dargestellt.

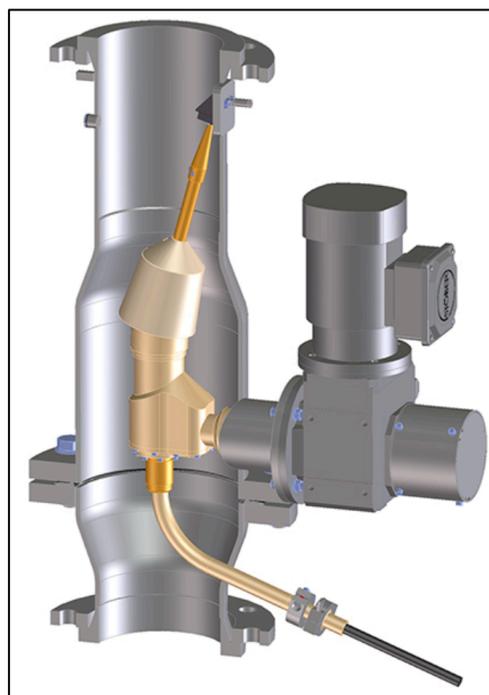


Abbildung 48: Sympatec Mytos mit Twister, Quelle: Sympatec (2022), Online-Quelle [9.November.2022]

Mit dieser Variante können feste Proben gemessen werden. Die Probe wird mittels Unterdruck abgesaugt und zur Messeinrichtung transportiert, wo der Sensor positioniert ist. Solche Bypass-Systeme sind in der Online-Messtechnik weit verbreitet.

## 6.2 Variantenmanagement und Modularisierung

Um in weiterer Folge von der Marktanalyse ausgehend die Varianten des Messsystems festzulegen, gibt es verschiedene Methodiken, mit denen Zusammenhänge erkannt werden können. Auch dieser Prozess kann nicht gänzlich von einem Systems-Engineering-Werkzeug übernommen werden, da es sich hierbei um einen kreativen Prozess handelt und das Werkzeug zur Modellierung die Varianten dokumentiert sowie die Abhängigkeiten der einzelnen Systeme darstellt.

Eine der Methoden ist in Abbildung 49 dargestellt. Mit dieser Methode lassen sich Systeme modularisieren. Dies bedeutet, dass die Baugruppen zunächst aufgeteilt werden, danach Komponenten zugewiesen werden und diesen wiederum Module. Jene Module werden in das modularisierte Produkt integriert. Mit dieser Methode werden nun die prozessintegrierten Messsysteme dargestellt und in Module aufgeteilt.

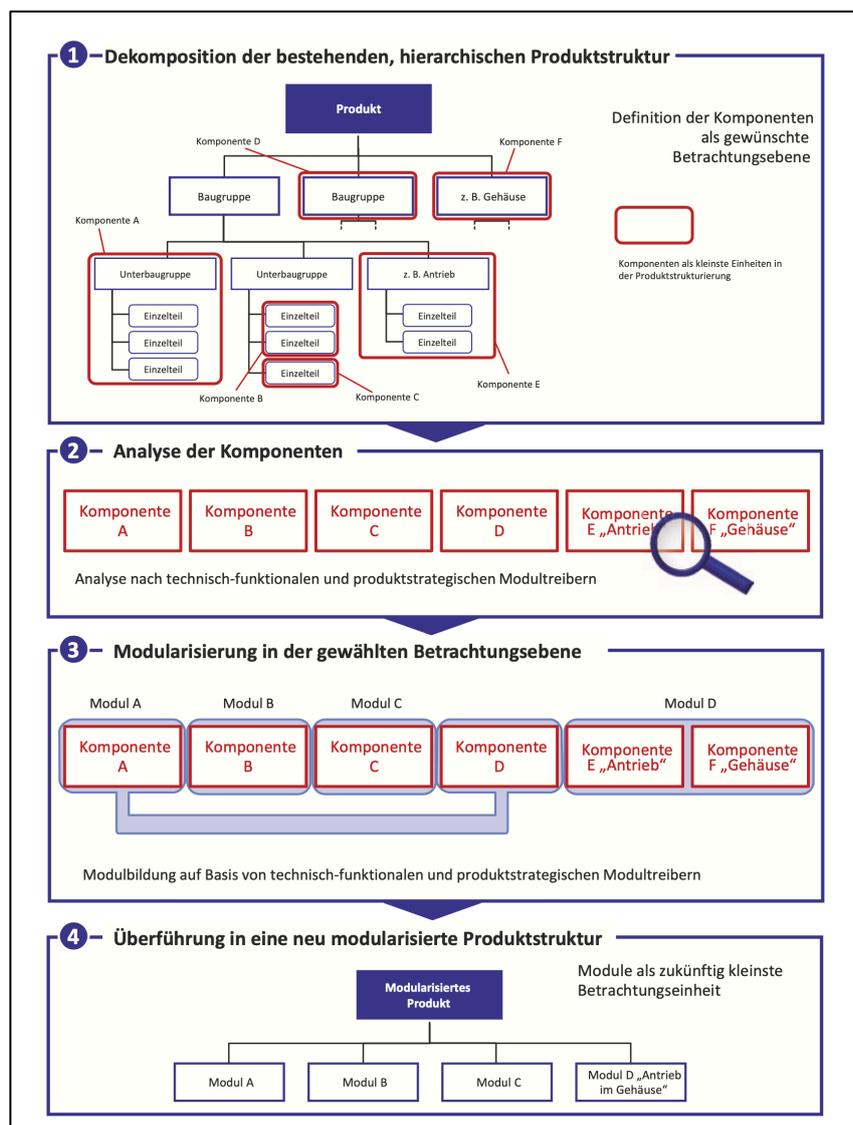


Abbildung 49: Vorgehen bei der Modularisierung, Quelle: Krause/Gebhardt (2018), S. 130.

### 6.2.1 Erster Schritt: Dekomposition der hierarchischen Produktstruktur

Der erste Schritt in der in Abbildung 49 abgebildeten Vorgehensweise ist die Dekomposition der hierarchischen Produktstruktur. Um eine Produktstruktur erstellen zu können, müssen in einem ersten Schritt die Produkte definiert werden, wobei darüber nachgedacht werden muss, welche Produkte es geben wird, um das gesamte Portfolio abdecken zu können. Alle möglichen Varianten sind in Abbildung 50 dargestellt. Wenn nun jede dieser Varianten ein eigenes Produkt werden würde, müsste mit hohen Herstellkosten, hohen Vertriebskosten, hohen Lagerkosten, mehr Fehlerquellen in der Produktion, einem erhöhten Service- und Schulungsaufwand sowie einer geringeren Akzeptanz dieses Produkts am Markt gerechnet werden. Daher werden die Gemeinsamkeiten gesucht und zu Produkten zusammengefasst.

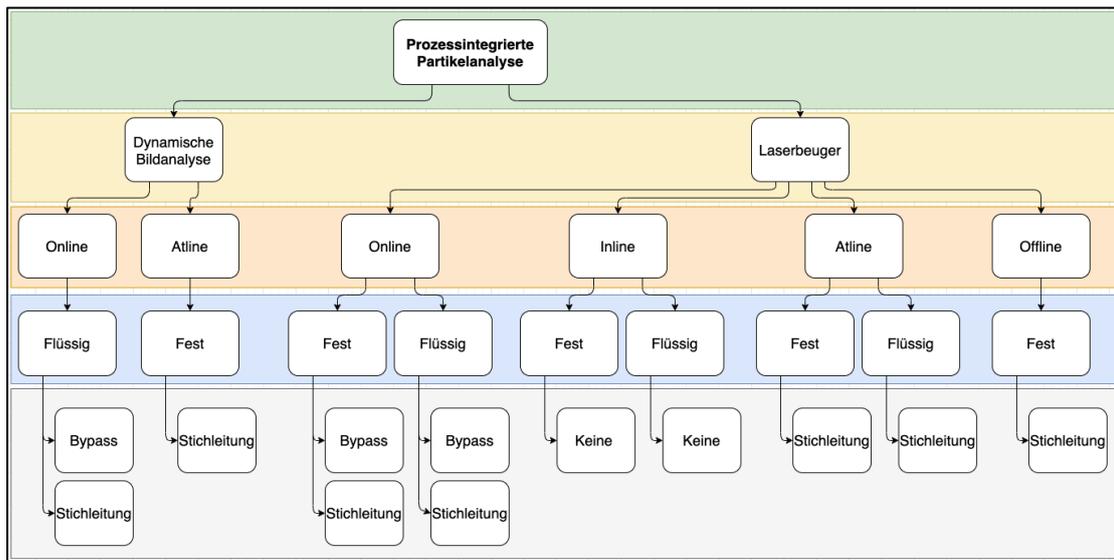


Abbildung 50: Übersicht der Varianten, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 51 wurde zum ersten Produkt die Probennahme bei flüssigen Proben zusammengefasst, da diese grundsätzlich immer gleich abläuft, für Online und Atline mit Stichleitung funktioniert und somit zusammengefasst werden kann.

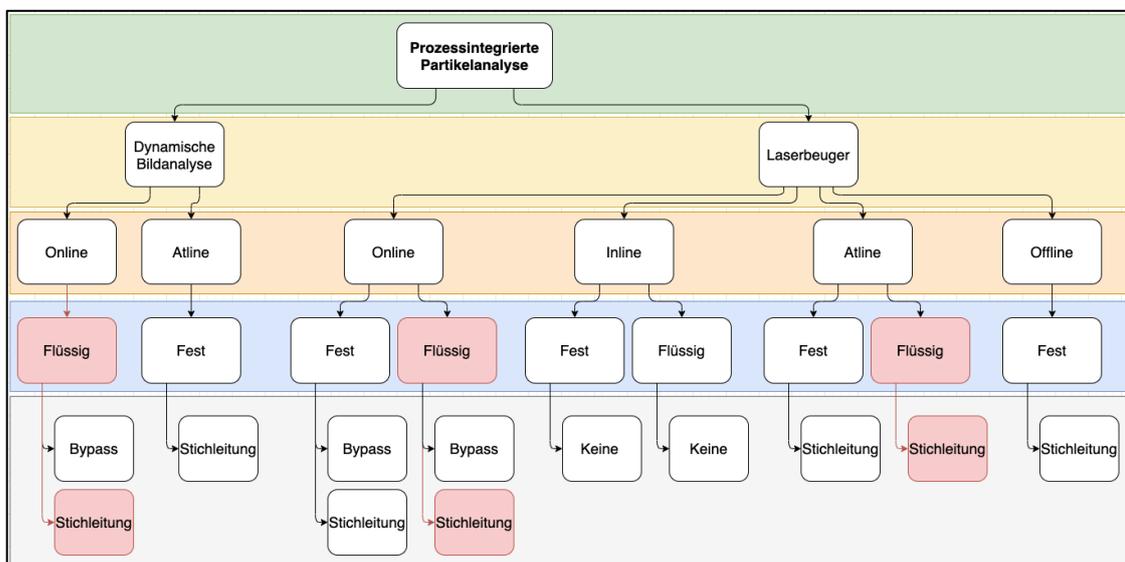


Abbildung 51: Probennahme flüssiger Proben mit Stichleitung, Quelle: Eigene Darstellung

Die nächste Funktion, die mehrmals vorkommt und somit zusammengefasst werden kann, ist die Probenahme beziehungsweise in diesem Fall die Abzweigung der Probe mittels eines Bypass-Systems bei flüssigen Proben (siehe Abbildung 52). Das Produkt wird bei Online-Messungen eingesetzt und kann bei verschiedenen Technologien, also bei der dynamischen Bildanalyse und der Laserbeugung, eingesetzt werden.

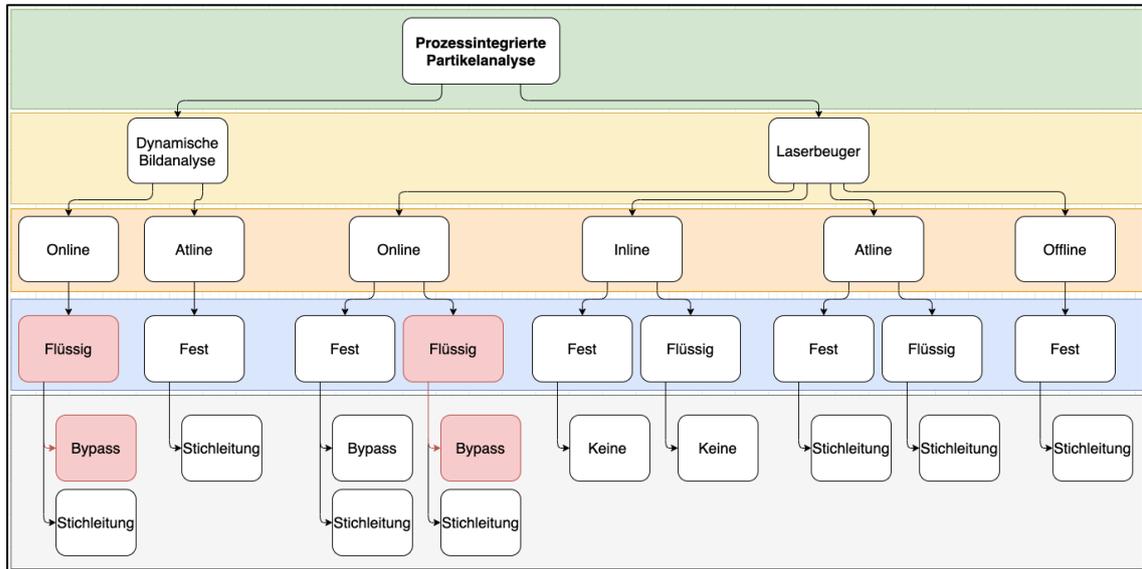


Abbildung 52: Probennahme flüssiger Proben mit Bypass, Quelle: Eigene Darstellung

Neben der Probennahme bei flüssigen Proben gibt es das Äquivalent dazu auch für feste Proben. Da die Anforderungen zwischen flüssigem und festem Aggregatzustand trotzdem andere sind, können hier nicht beide Aggregatzustände zu einem Produkt zusammengefügt werden. Bei flüssigen Proben kann es sein, dass die Beständigkeit der Komponenten anders sein muss, bei festen Proben kann der Fall eintreten, dass das Design gänzlich anders sein muss. Bei festen Proben ist auch die Zuführung der Probe zur Messeinrichtung per Stichleitung möglich und wird beim Online-, Atline- und Offline-Verfahren sowie bei beiden Messtechnologien eingesetzt (siehe Abbildung 53).

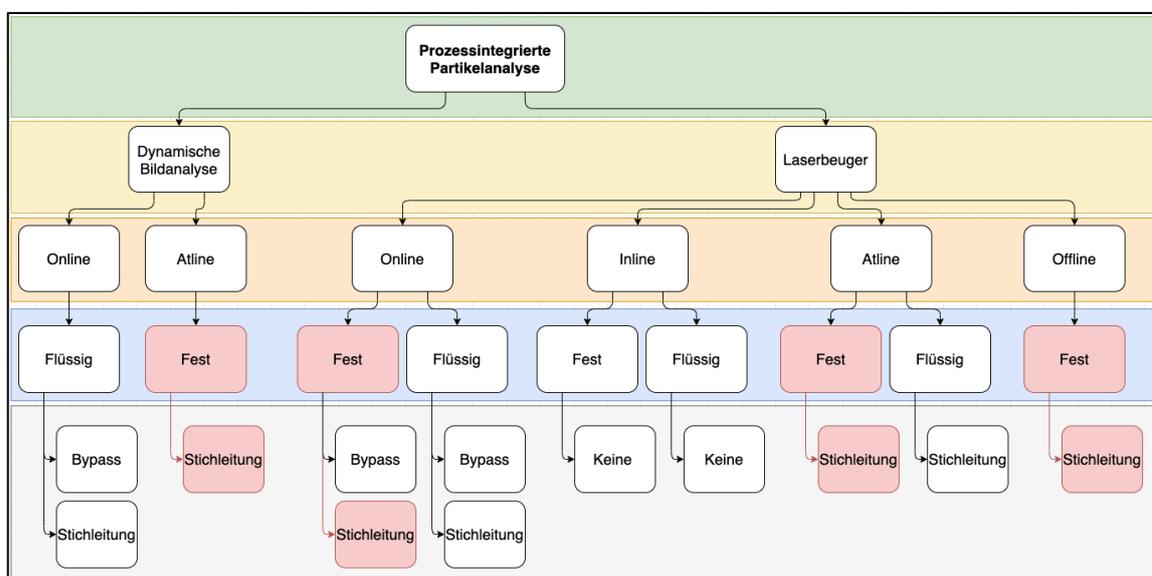


Abbildung 53: Probennahme fester Proben mit Stichleitung, Quelle: Eigene Darstellung

Bei festen Proben ist auch die Probennahme per Bypass-Leitung möglich, wie in Abbildung 54 zu erkennen. Die Analyse ergab zwar, dass diese Methode der Probennahme aktuell nur bei der Laserbeuger-Technologie und bei Online-Verfahren eingesetzt wird, jedoch könnte das Bypass-System bei festen Proben in Zukunft auch für andere Technologien eingesetzt werden, weshalb daraus ebenfalls ein Produkt generiert wird.

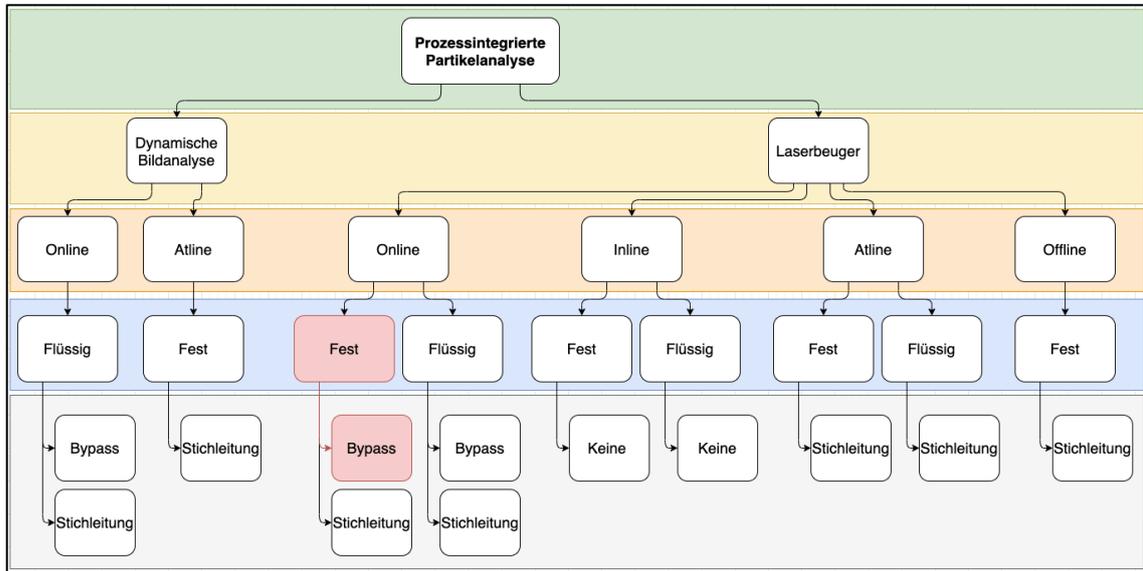


Abbildung 54: Probennahme fester Proben mit Bypass, Quelle: Eigene Darstellung

Neben den Arten der Probennahme können auch die Sensortechnologien bei den Prozessarten vereint werden. Wie in Abbildung 55 dargestellt, wird der Sensor zusammengefasst, da sich dieser bei den Prozessarten nur minimal unterscheidet.

Es kann konstatiert werden, dass der Sensor nicht verändert, sondern nur die Integration per se angepasst werden muss; jedoch ist dies bei Nachrüstungen in einer fertigen Anlage immer kundenspezifisch und individuell zu entscheiden.

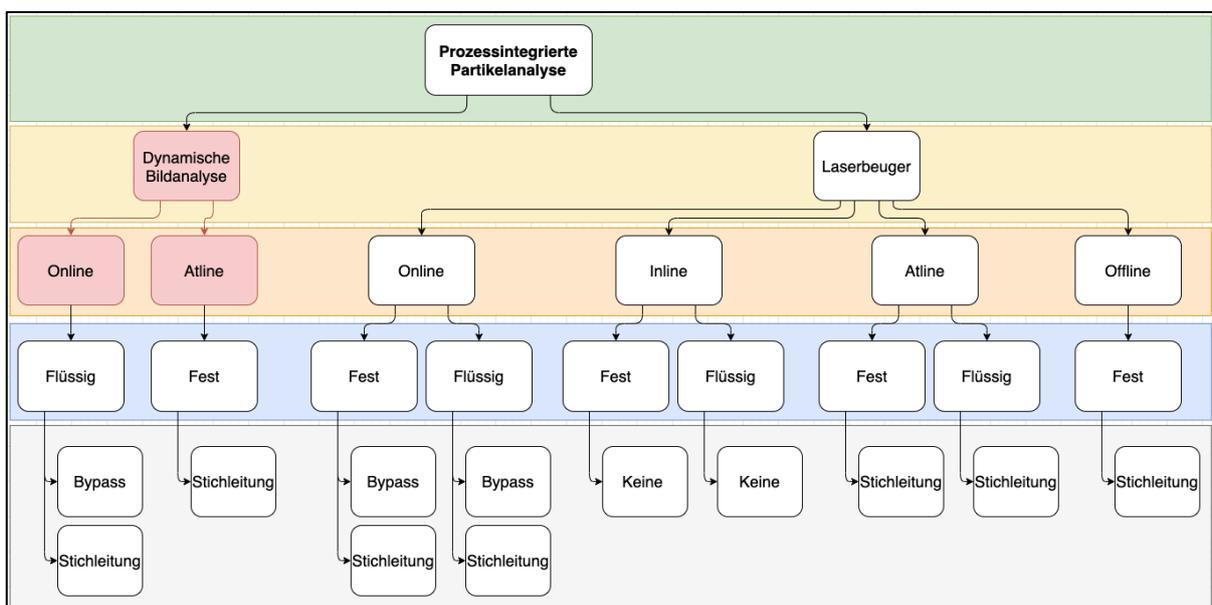


Abbildung 55: Sensor der dynamischen Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung

Gleich wie bei der Bildanalyse werden beim Laserbeuger die Prozessarten vereint und es wird nicht für jede Art ein eigener Sensor entwickelt, sondern ein Sensor für Online, Inline, Offline und Atline (siehe Abbildung 56 in Rot dargestellt).

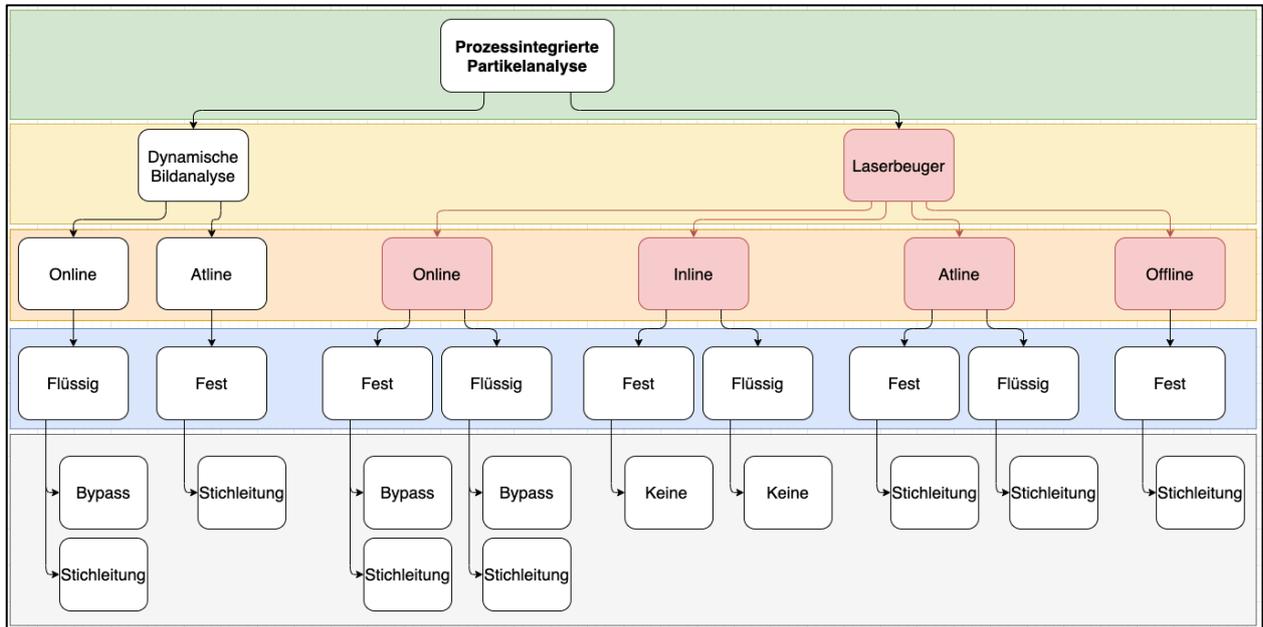


Abbildung 56: Sensor des Laserbeugers, Quelle: Eigene Darstellung

Zusammengefasst gibt es demnach sechs verschiedene Produkte, die so designt werden müssen, dass sie kombinierbar eingesetzt und nahtlos integriert werden können. Nun werden die Produkte in ihre Funktionen unterteilt, um Gemeinsamkeiten auf funktionaler Eben zu finden und diese, wenn möglich, in Modulen vereinen zu können.

Folgende verschiedene Produkte gibt es nun:

- Probennahme flüssiger Proben mit Stichleitung
- Probennahme flüssiger Proben mit Bypass
- Probennahme fester Proben mit Stichleitung
- Probennahme fester Proben mit Bypass
- Sensor für dynamische Bildanalyse
- Sensor für Laserbeugung

Diese sechs Produkte werden im nächsten Schritt (siehe Unterkapitel 6.2.2) in ihre Systemkomponenten unterteilt.

## 6.2.2 Zweiter Schritt: Analyse der Komponenten

Das erste zusammengefasste System, das in Komponenten unterteilt wird, ist die Probennahme per Stichleitung bei flüssigen Proben (siehe Abbildung 57). Grundsätzlich setzt sich das System aus einer Bypass-Leitung, also der Abzweigung vom Prozess, und der Stichleitung, der Zuführung zur Messeinrichtung, zusammen.

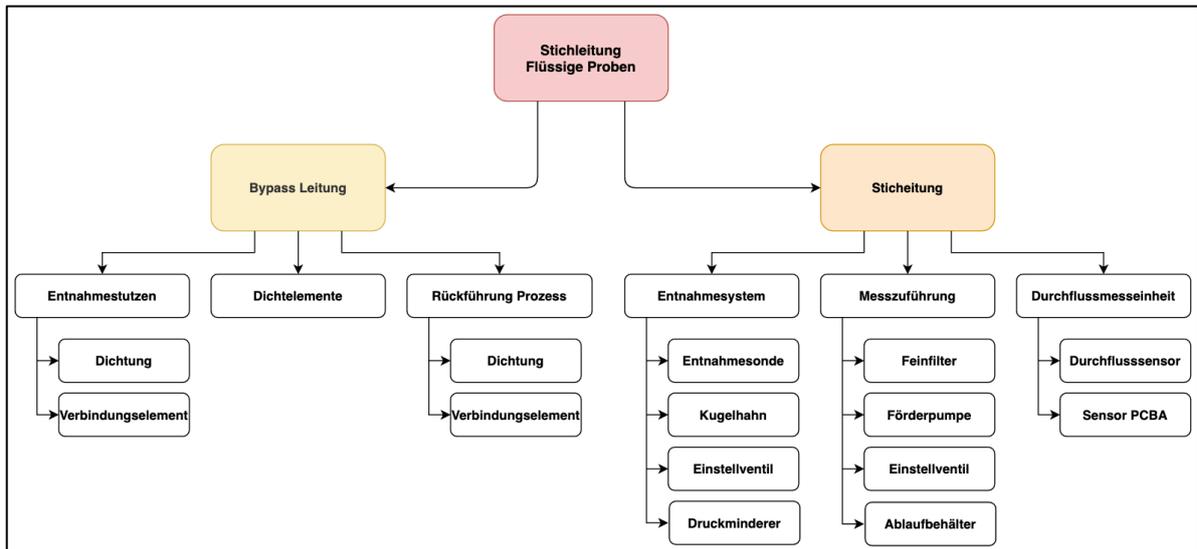


Abbildung 57: System Stichleitung für flüssige Proben, Quelle: Eigene Darstellung

Ähnlich wie bei flüssigen Proben besteht bei festen Proben auch die Möglichkeit, per Stichleitung die benötigte Probe abzuzweigen, die für die Analyse notwendig ist, wie in Abbildung 58 als System mit dessen Komponenten abgebildet ist. Bei festen Proben ist ein Anwendungsfall, dass die Probe auf einem Förderband transportiert, mit einem Entnahmesystem vom Hauptfluss getrennt und per Fallschacht und Rüttler der Messeinrichtung zugeführt wird. Der Begriff *Stichleitung* ist somit nicht ganz treffend, wird jedoch verwendet, um ähnliche und gleiche Begrifflichkeiten zu nutzen.

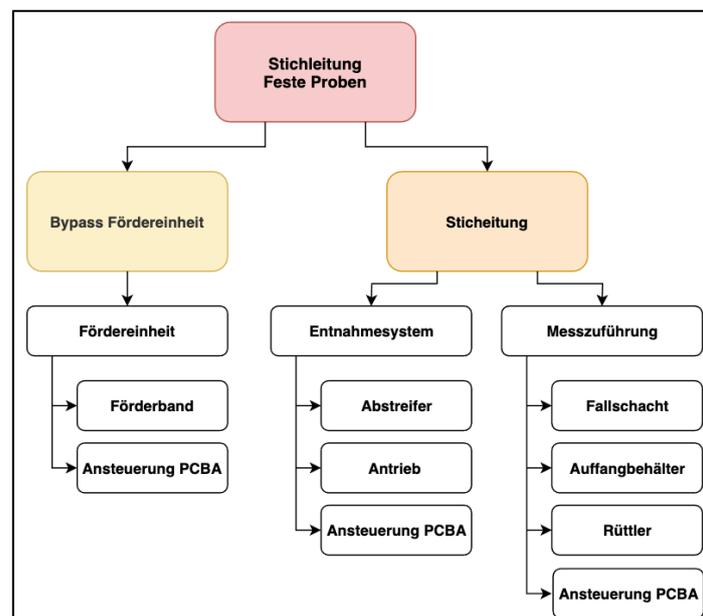


Abbildung 58: System Stichleitung für feste Proben, Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 59 ersichtlich, gibt es neben der Stichleitung das Bypass-System, bei dem die Probe dem Prozess nach der Analyse wieder zugeführt wird. Bei flüssigen Proben wird dies mit einer Durchflussmesszelle realisiert, die parallel zum Prozess positioniert ist und von der Probe aus dem Prozess durchflossen wird. Die Bypass-Leitung wird an der Prozessleitung montiert und versorgt die Messzelle. Von der Messzelle fließt die Probe wieder in den Prozess. Während der Messung wird die Prozessleitung entweder teilweise oder komplett abgesperrt, damit die Probe über die Messzelle befördert wird.

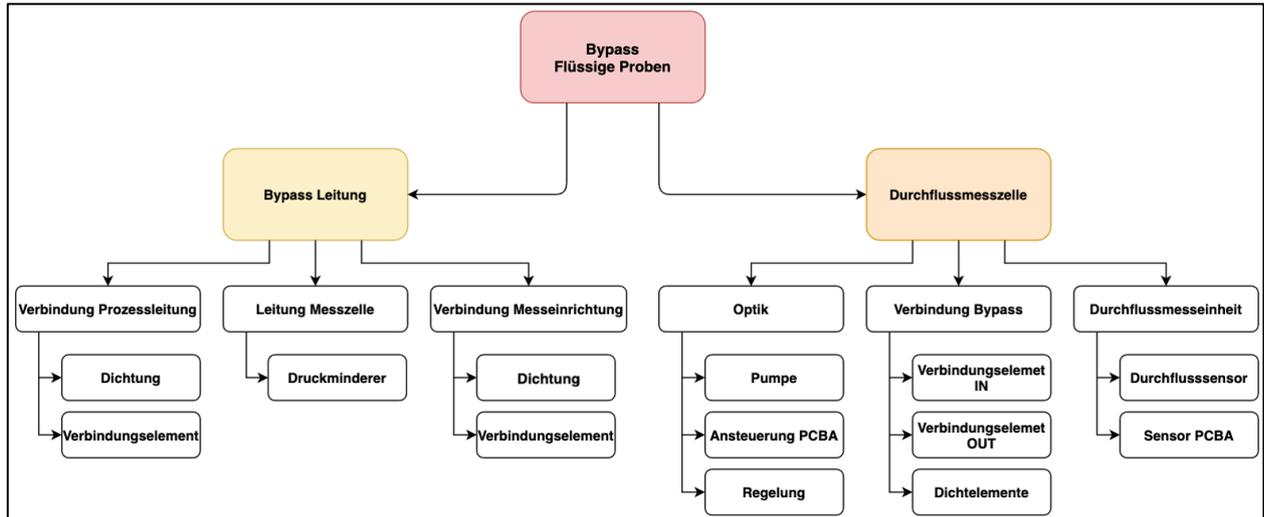


Abbildung 59: System Bypass für flüssige Proben, Quelle: Eigene Darstellung

Grundsätzlich ähnlich aufgebaut gibt es das Bypass-System auch bei festen Proben. Die Bypass-Leitung ist hier jedoch nicht eine Abzweigung, sondern eher die Integration in den Hauptprozess. Die Probenahme kann mittels eines Unterdrucksystems realisiert werden. Dazu wird eine Düse in die Prozessleitung integriert, wo die Probe per Unterdruck abgesaugt und dem Messsystem zugeführt wird. Um möglichst alle Partikelgrößen bei einer Messung zu analysieren, wird die Düse mittels Schrittmotor in der Prozessleitung rotiert. Das System ist in Abbildung 60 dargestellt.

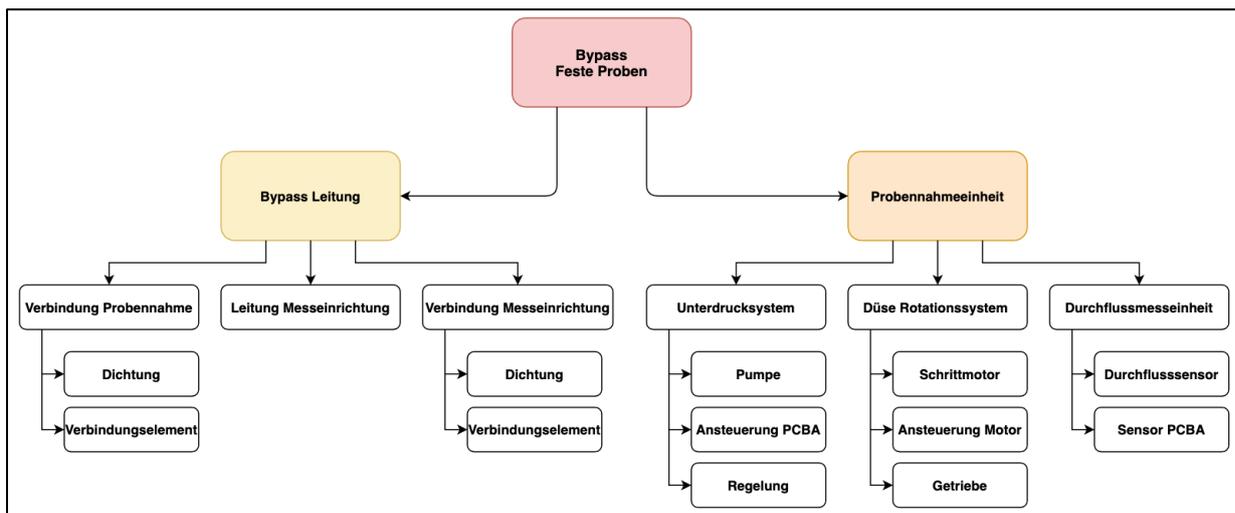


Abbildung 60: System Bypass für feste Proben, Quelle: Eigene Darstellung

Neben den Systemen zur Probennahme gibt es auch die Systeme der Sensoren. Eines davon ist der in Abbildung 61 dargestellte Laserbeuger.

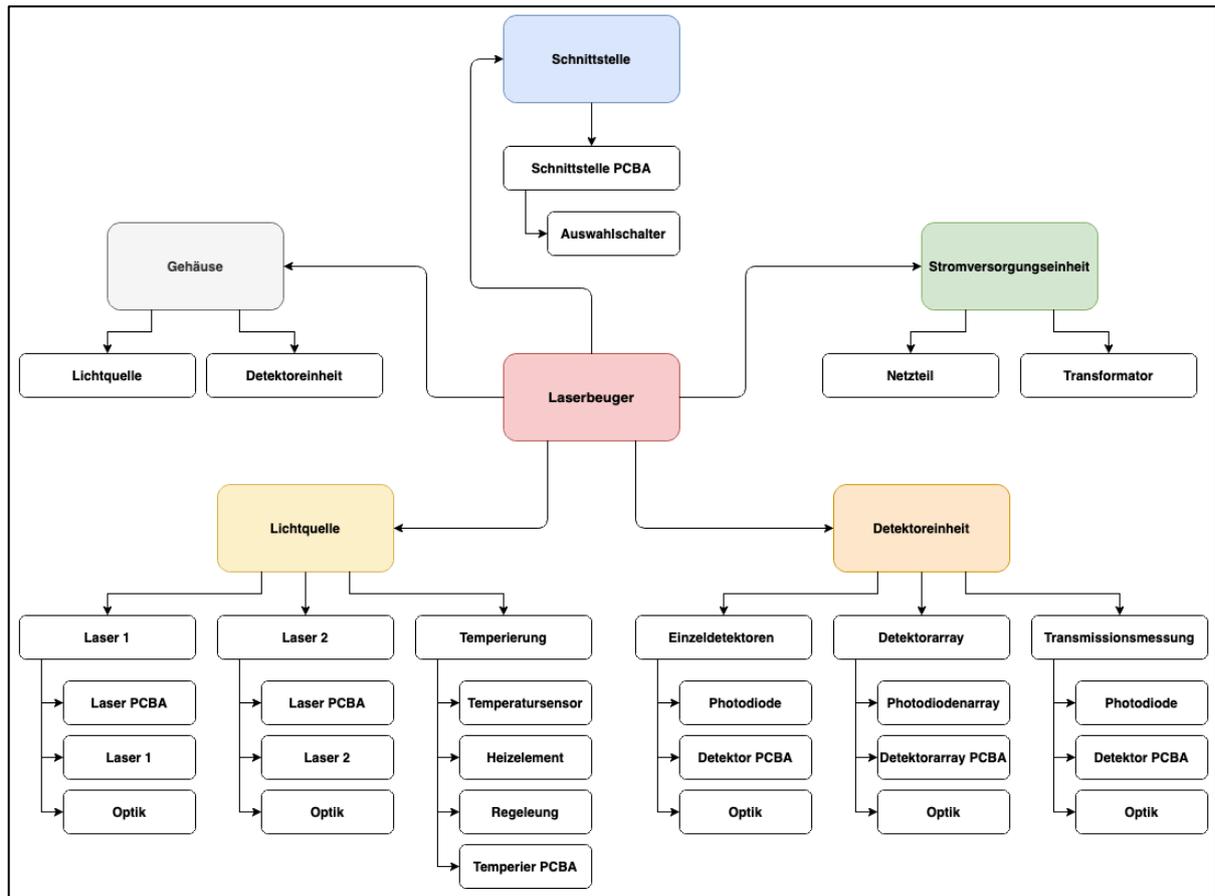


Abbildung 61: System Laserbeuger, Quelle: Eigene Darstellung

Der Laserbeuger besteht grundsätzlich aus der Lichtquelle, der Detektoreinheit, dem Gehäuse, der Stromversorgung der Schnittstelle zum Leitsystem und der Auswerteeinheit (siehe Abbildung 62).

Die Probe wird mit dem Laser der Lichtquelle bestrahlt und das Streumuster wird von den Photodioden in der Detektoreinheit aufgenommen. In weiterer Folge wird dieses ausgewertet, wobei die Partikelgröße errechnet wird. In der Lichtquelle befindet sich neben dem Laser auch eine Temperierung, da die Qualität und die Leistung des Lasers sehr temperaturabhängig sind.

Das System setzt sich aus den Baugruppen Beleuchtungseinheit, Detektoreinheit, Gehäuse, Stromversorgungseinheit und der Schnittstelle zusammen. Die Beleuchtungseinheit beleuchtet die Probe, um in weiterer Folge von der Kamera in der Detektoreinheit aufgenommen zu werden. Ähnlich wie beim Laserbeuger ist in der Beleuchtungseinheit auch eine Temperierung angebracht.

In der Detektoreinheit werden Objektive mit unterschiedlichem Vergrößerungsfaktor positioniert, um auch kleinere Partikel messen zu können.

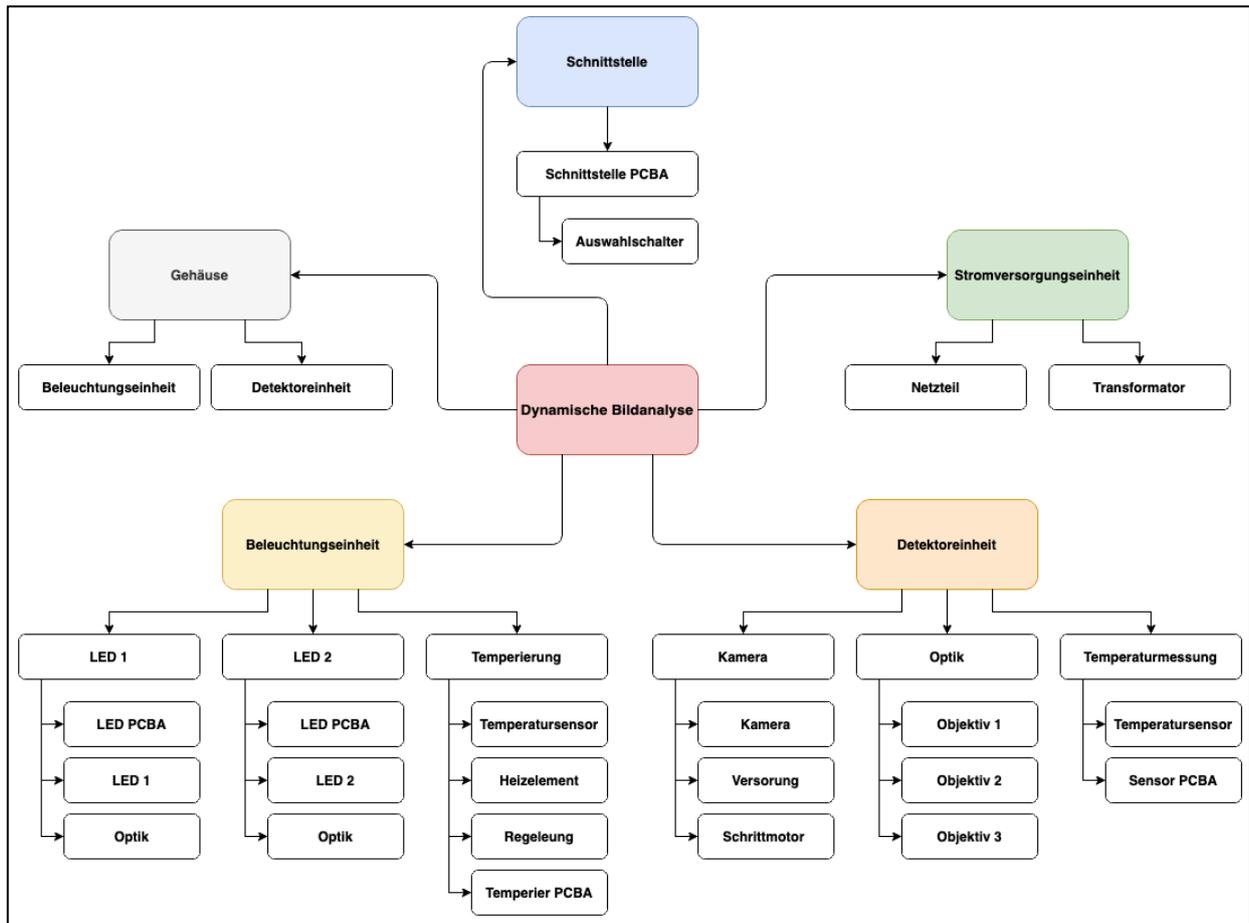


Abbildung 62: System dynamische Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung

Die Schnittstelleneinheit stellt die Verbindung zum übergeordneten Leitsystem und die Schnittstelle zur Auswerteeinheit dar, wo die Analyse der Partikel durchgeführt wird, und verschiedene Parameter berechnet werden. Auf der Schnittstellen-PCBA kann die benötigte Schnittstelle wie zum Beispiel ModBus, TCP/IP oder Profibus ausgewählt werden. Die Stromversorgung versorgt alle Komponenten und stellt somit die Funktion sicher.

### 6.2.3 Dritter Schritt: Modularisierung

Der nächste Schritt besteht darin, gleiche Komponenten und Baugruppen ausfindig zu machen, um somit weniger Varianten in der Entwicklung zu haben und Komponenten mehrfach verwenden zu können.

Beim Gerät für die dynamische Bildanalyse ist in der Beleuchtungseinheit die Leuchtdioden-Baugruppe für die Variantenfertigung prädestiniert (siehe Abbildung 63). Das heißt, es werden zwar unterschiedliche Leuchtdioden (kurz LED) verwendet, jedoch wird die bestückte Leiterplatte (PCBA) so designt, dass mehrere Typen verwendet werden können und somit nur eine Platine für verschiedenste Leuchtdioden benötigt wird. Dieses Modul kann demnach mehrfach verwendet werden, mit dem einzigen Unterschied der LED. Diese muss individuell auf die Anwendung abgestimmt werden.

Anforderungen an das Modul:

- Leuchtdioden mit verschiedenen Bauformen können verwendet werden
- Leistung der Leuchtdiode kann variabel sein
- Definierte Wellenlängen der Leuchtdiode werden unterstützt
- Verschiedene Montagemöglichkeiten an weiterführende Systeme

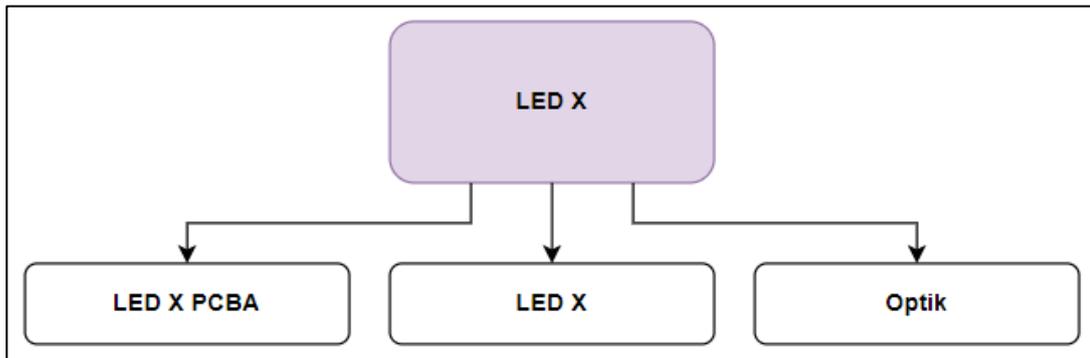


Abbildung 63: LED-X-Modul, Quelle: Eigene Darstellung

Ähnlich wie bei der Leuchtdiode wird auch der Laser beim Laserbeuger als Modul entwickelt, damit mehrere Laserdioden mit einer Platine angesteuert, geregelt und somit verwendet werden können. Auf diese Weise wird erreicht, dass einerseits die Aufwände in der Entwicklung niedriger sind und andererseits Ressourcen in der Produktion und im Lagerhaushalt eingespart werden. Das Modul ist in Abbildung 64 ersichtlich.

Anforderungen an das Modul:

- Verschiedenen Bauformen von Laserdioden können verwendet werden
- Anwendungsübliche Leistungen und Wellenlängen können betrieben werden
- Mehrere Befestigungsmöglichkeiten an Systemen

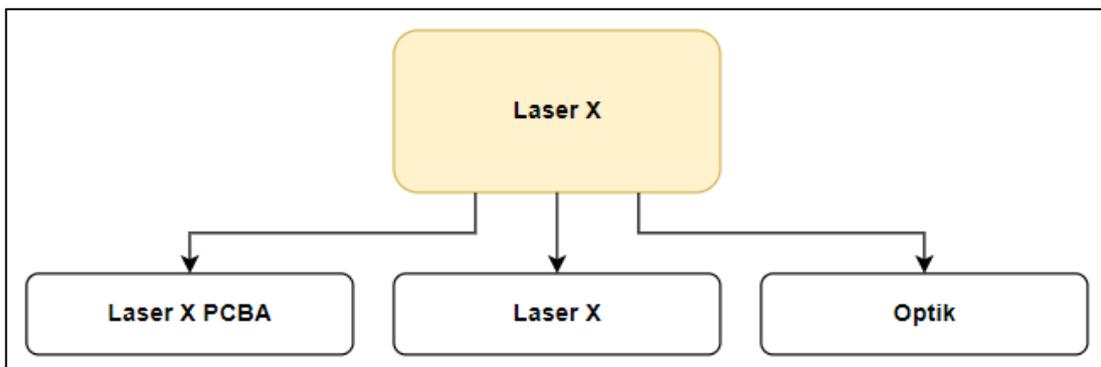


Abbildung 64: Laser-X-Modul, Quelle: Eigene Darstellung

Da es sich zum Großteil um sehr temperaturempfindliche Systeme handelt und die Messperformance von der Stabilität des Sensors abhängig ist, muss die Temperatur einerseits gemessen und andererseits auch geregelt werden.

Ein weiteres Modul zur Temperaturmessung ist in Abbildung 65 dargestellt. Es dient zur Messung und Kontrolle der Temperatur und eignet sich daher gut zur Bildung eines Moduls, da es die Komplexität zulässt.

Anforderungen an das Modul:

- Temperaturmessung mittels NTC oder Pt-100
- Mehrere Möglichkeiten zur Montage
- Temperaturbereich zwischen 5 °C und 80 °C
- Genauigkeit von 0,1 °C

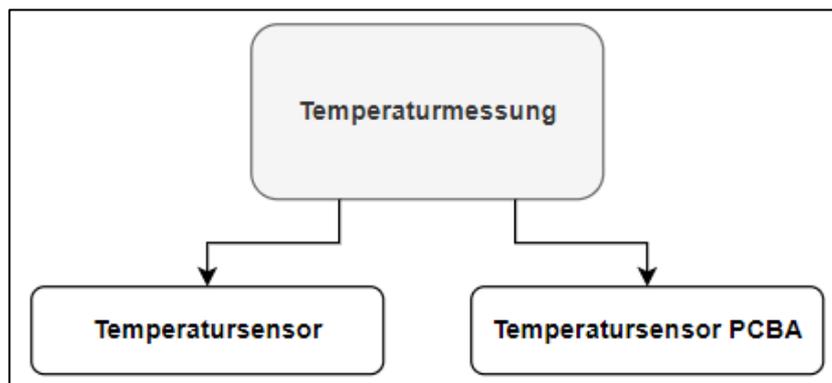


Abbildung 65: Modul Temperaturmessung, Quelle: Eigene Darstellung

Neben der Messung ist es außerdem relevant, Gegenstände zu temperieren, damit die Stabilität gegeben ist. Als Beispiel eignet sich das Lasermodul im Laserbeuger. Hier ist es essenziell, dass die Temperatur stabil ist, um die Genauigkeit bei der Messung zu gewährleisten. Das Modul ist in Abbildung 66 dargestellt.

Anforderungen an das Modul:

- Temperierung mittels Peltier-Element
- Mehrere Größen von Peltier-Elementen verwendbar
- Genauigkeit von 0,2 °C
- Temperatursicherung einfach austauschbar

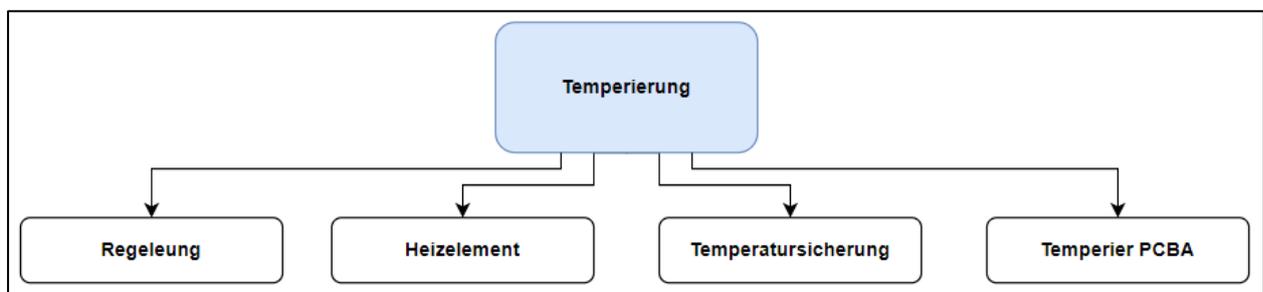


Abbildung 66: Modul Temperierung, Quelle: Eigene Darstellung

Auch in der Messeinrichtung, in der der Sensor positioniert ist, werden eine Stromversorgung und eine Schnittstelle zum übergeordneten Leitsystem benötigt.

Die Stromversorgung ist bei beiden Sensorsystemen gleich aufgebaut und somit als Modul darstellbar (siehe Abbildung 67). Das System soll mittels verschiedener Spannungshöhen versorgt werden können und länderspezifisch einsetzbar sein. Neben der Spannungsversorgung ist zudem sicherzustellen, dass das Stromversorgungsmodul andere Module mit Niederspannung versorgen kann.

Anforderungen an das Modul:

- Eingangsspannung zwischen 100 VAC und 250 VAC
- Folgende Ausgangsspannungen: 5 VDC, 12 VDC und 24 VDC
- Montage per Einschub, um Service zu gewährleisten

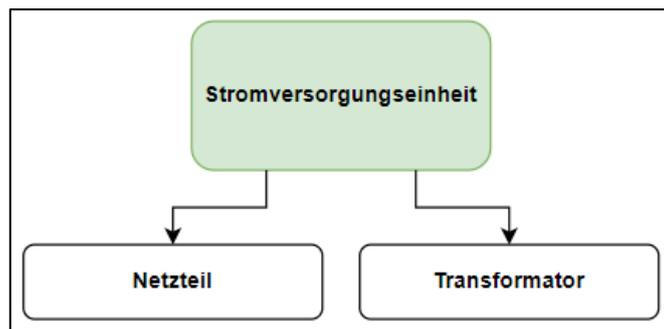


Abbildung 67: Modul Stromversorgungseinheit, Quelle: Eigene Darstellung

Die Anbindung des Messsystems an das Leitsystem, also die Kommunikation mit der Auswerteeinheit und dem Ort, an dem die Ergebnisse angezeigt werden, wird mittels Schnittstellen realisiert, die in der Automatisierung üblich und verbreitet sind. Das Modul ist in Abbildung 68 dargestellt.

Anforderungen an das Modul:

- Auswahlschalter zwischen den verschiedenen Schnittstellen
- Unterstützte Schnittstellen: Profibus, ModBus, TCP/IP
- Ausführung als Einschub

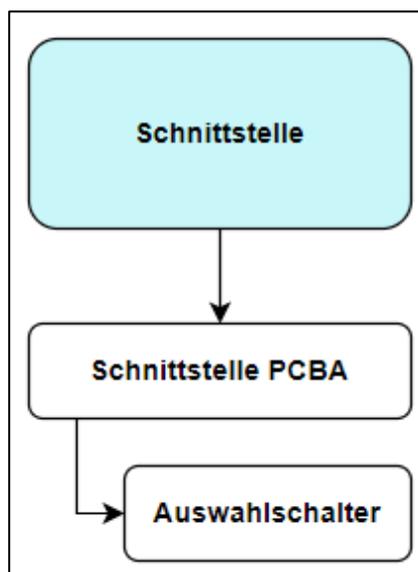


Abbildung 68: Modul Schnittstelle, Quelle: Eigene Darstellung

Die Modularisierung des Messsystems ist somit abgeschlossen. Alle anderen Komponenten wären zu speziell, um sie per Modul zusammenzufassen. Jedoch gibt es bei der Probennahme, also der Anbindung an den Prozess, die Durchflussmeseinheit und die Bypass-Leitung, bei denen es sinnvoll wäre, die Modularisierung anzuwenden.

Da der Durchfluss einen hohen Einfluss auf die Messqualität hat, muss dieser gemessen werden, damit ein kontinuierlicher und gleichbleibender Durchfluss erreicht wird- siehe Abbildung 69.

Anforderungen an das Modul:

- Durchflussmessung für flüssige und gasförmige Medien
- Von 0,1 Milliliter pro Minute bis 50 Liter pro Minute

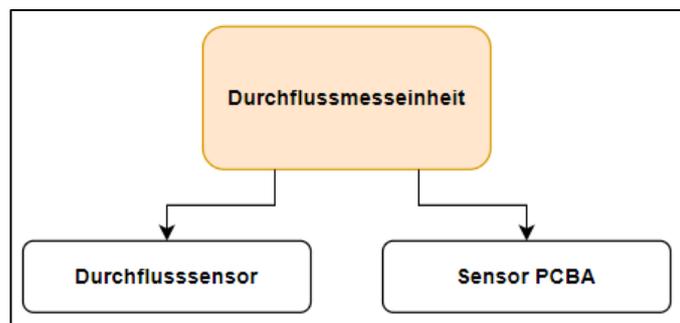


Abbildung 69: Modul Durchflussmeseinheit, Quelle: Eigene Darstellung

Die Bypass-Leitung (siehe Abbildung 70) ist die Verbindung vom Prozess zur Messeinrichtung und trägt maßgeblich zur Messung bei. Neben den Verbindungselementen ist auch ein Druckminderer integriert, um den Druck des Mediums konstant zu halten, um wiederum die Vergleichbarkeit und Qualität der Messungen zu steigern.

Anforderungen an das Modul:

- Alle Verbindungselemente und Leitungen aus Edelstahl
- Dichtelemente aus hochbeständigem Material
- Durchmesser der Leitungen größer als 10 Zentimeter
- Verbindungselemente mit Sicherung gegen Lösen

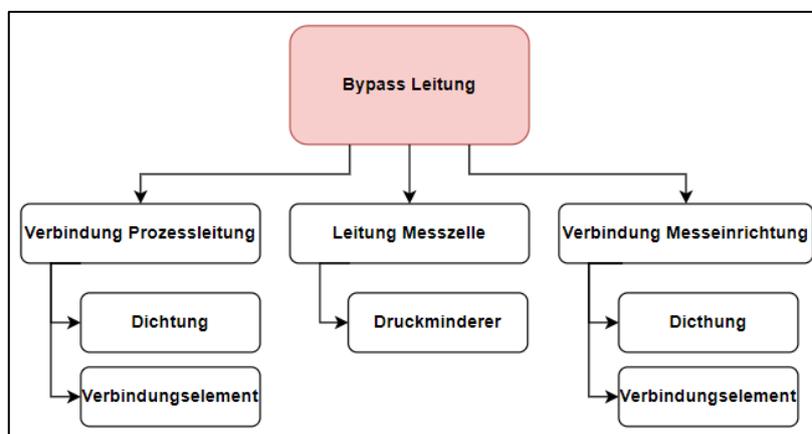


Abbildung 70: Modul Bypass-Leitung, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.2.4 Vierter Schritt: Überführung in modularisierte Produktstruktur

Nach der Bildung von Modulen wurden im nächsten Schritt die modularisierten Baugruppen in die übergeordneten Produkte und Systeme integriert. Diese Systeme werden in weiterer Folge modelliert.

In Abbildung 71 ist der modularisierte Laserbeuger dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass in der Lichtquelle die definierten Module und bei der Stromversorgung sowie der Schnittstelle die entwickelten Module verwendet werden, um die Variantenvielfalt einzugrenzen.

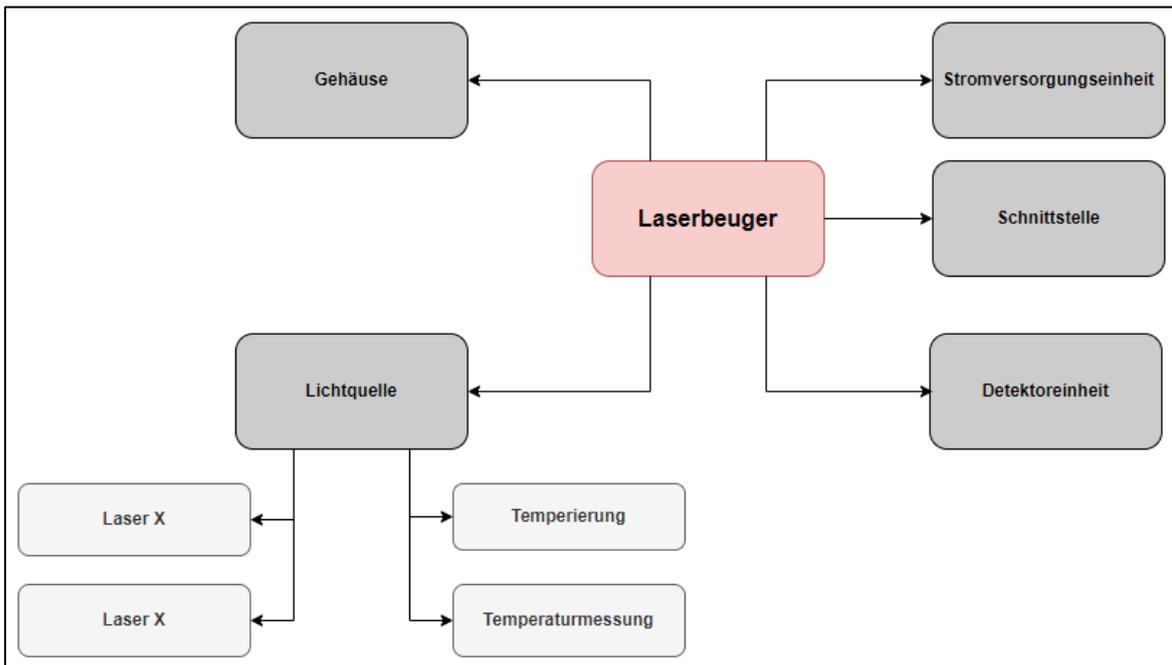


Abbildung 71: Messeinrichtung Laserbeuger nach der Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung

Ähnlich wie beim Laserbeuger werden bei der dynamischen Bildanalyse (Abbildung 72) auch die Module für die Stromversorgung und die Schnittstellen verwendet. In der Beleuchtungseinheit werden ebenso die entworfenen Module verwendet. Das Modul der Temperaturmessung wird bereits zwei Mal genutzt.

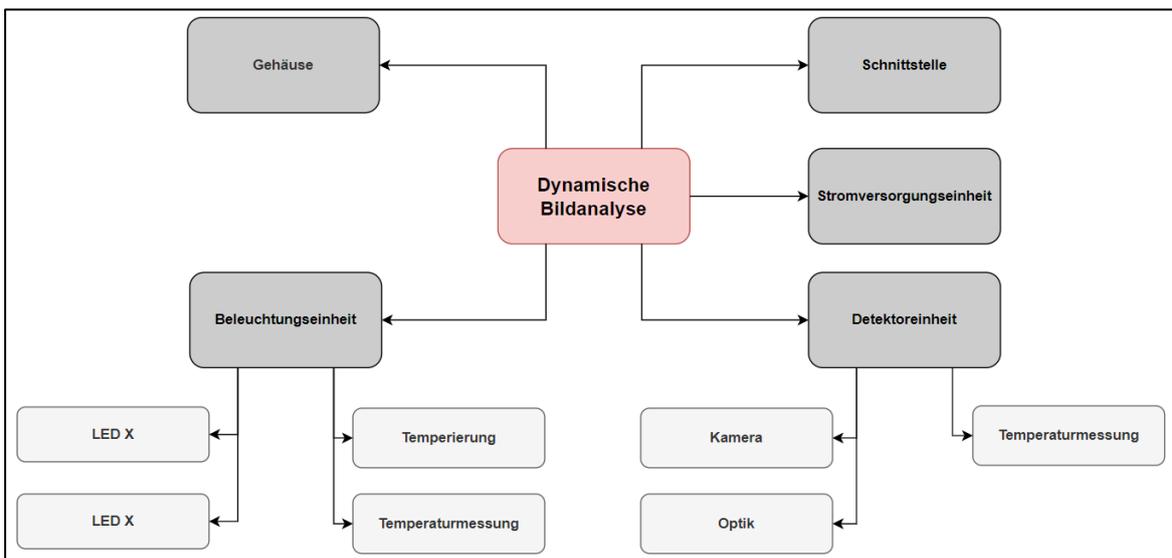


Abbildung 72: Messeinrichtung dynamische Bildanalyse nach der Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung

In den beiden Bypass-Systemen für flüssige und feste Proben wurde die Bypass-Leitung als Modul dargestellt, da sich diese nur minimal unterscheidet (siehe Abbildung 73 und Abbildung 74).

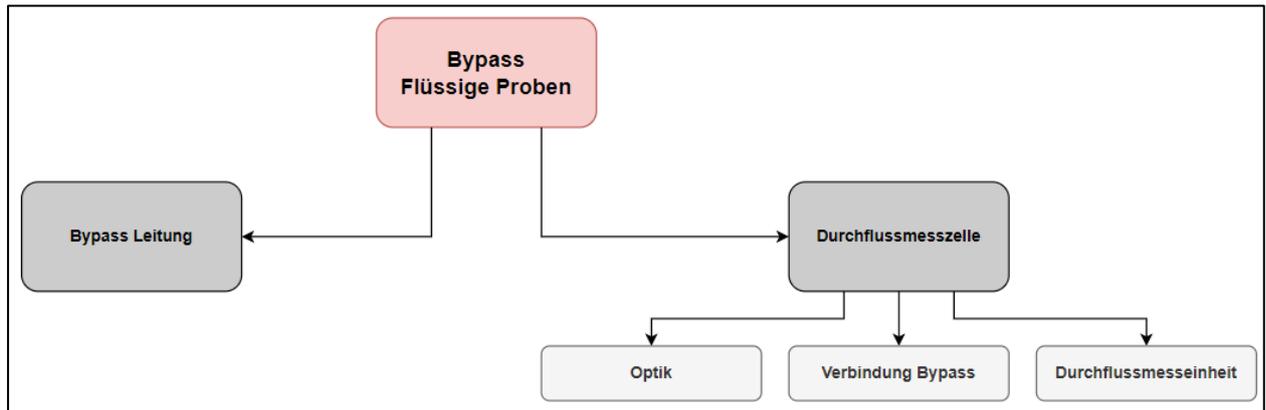


Abbildung 73: Bypass für flüssige Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung

Die Probennahme bei festen Proben sowie die Durchflussmesszelle konnten nicht vereinheitlicht werden, da hier zu große Unterschiede bestehen (siehe Abbildung 74).

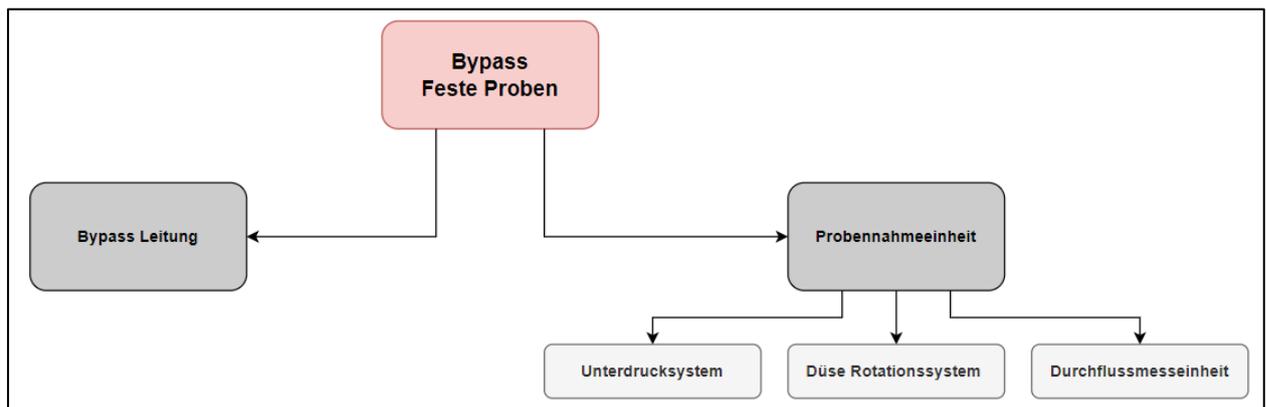


Abbildung 74: Bypass für feste Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung

Da bei der Probennahme per Stichleitung (siehe Abbildung 75) auch eine Bypass-Leitung benötigt wird, wurde auch hier das Modul der Bypass-Leitung angewendet, um Varianten zu sparen.

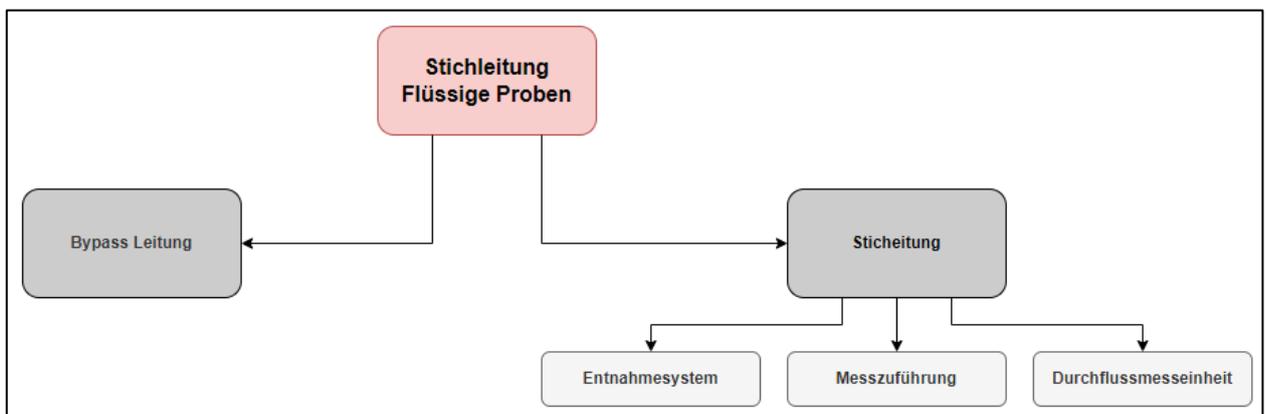


Abbildung 75: Stichleitung für flüssige Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung

## 6.3 Systemmodellierung

In der Systemmodellierung werden die erarbeiteten Anforderungen und die modularisierten Systeme grafisch dargestellt. Dazu werden das definierte Werkzeug Enterprise Architect von Sparx sowie die ausgewählte Sprache SysML verwendet. In Unterkapitel 6.3.1 wird erläutert, wie sich die beiden Messeinrichtungen Laserbeuger und dynamische Bildanalyse mit modellbasierten Systems-Engineering-Herangehensweisen darstellen lassen, da auf der Messeinrichtung der Fokus liegt und diese in der prozessintegrierten Umgebung das komplexeste System ist. Da die Modellierung grundsätzlich ähnlich aufgebaut ist, liegt der Fokus bei der Dokumentation der Ergebnisse auf dem Laserbeuger und dessen Varianten. Neben der Sprache und dem Werkzeug wird das Modell angelehnt an der VAMOS-Methode aufgebaut, da sich diese Methode sehr gut für die Variantenmodellierung eignet. Die Methode VAMOS eignet sich für die Modellierung komplexer Systeme, bei denen Variantenmanagement benötigt wird.

### 6.3.1 Gesamtsystem: Modellierung vom Core nach VAMOS

Zu Beginn der Modellierung wird das Projekt aufgesetzt und die Struktur erstellt. Wie bereits erwähnt, gibt es bei der VAMOS-Methode die übergeordneten Pakete *Core*, *Variations* und *Configurations*. Im Core sind die Diagramme *Behavior* (Verhalten des Systems), *Context* (Umfeld und Komponenten des Systems), *Domain* (Wissen des Systems), *Product Architecture* (Architektur des Systems mit Sub-Systemen), *Requirements* (Anforderungen an das System) und *Use Cases* (Anwendungsfälle des Systems) enthalten. In Abbildung 76 ist der Aufbau ersichtlich.

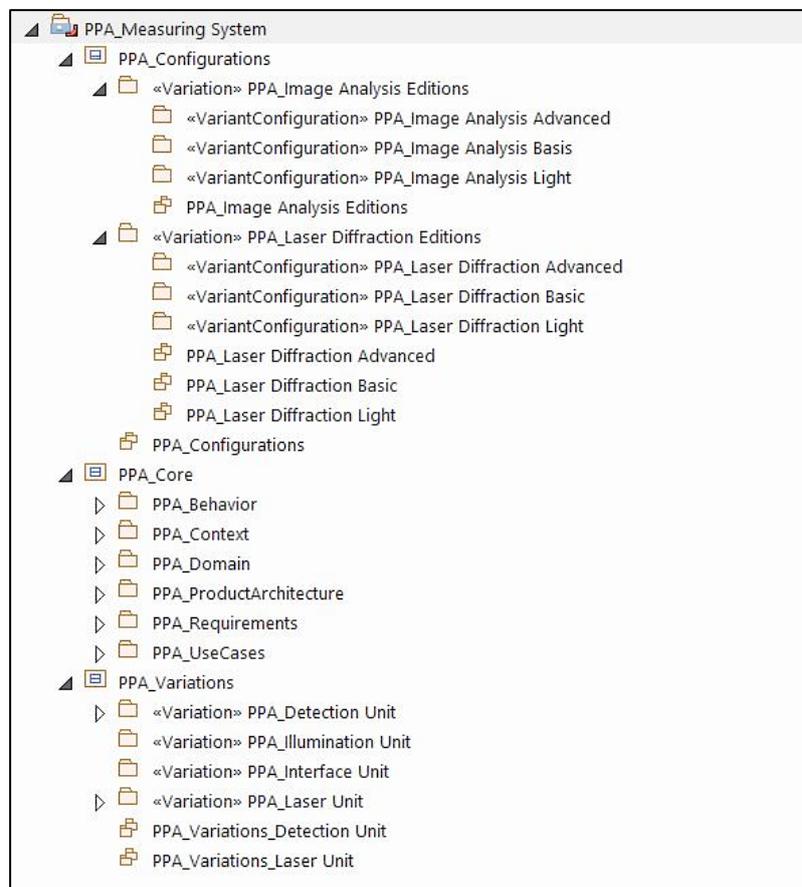


Abbildung 76: Aufbau des Modells nach VAMOS, Quelle: Eigene Darstellung

Die Struktur im *Core* kann jedoch beliebig je nach System gewählt werden, da sie unabhängig von der Variantenmodellierung ist. In den *Variations* sind alle Module modelliert, wobei es verschiedene Varianten gibt.

Eine Variante ist ein Paket mit dem Stereotyp *Variation*. In der modellierten Anwendung gibt es Varianten bei der *Detection Unit*, der *Illumination Unit*, der *Interface Unit* und der *Laser Unit*. Aus diesen Varianten werden in weiterer Folge im Bereich *Configurations* die definierten Produktkonfigurationen zusammengestellt.

Da der schematische Aufbau bereits in Unterkapitel 6.2 erarbeitet wurde, umfasst der erste Schritt im Systems Engineering die Modellierung der Architektur des Produkts beziehungsweise des Systems. Hier sind die äußeren Einflussfaktoren wie zum Beispiel Umwelteinflüsse, bereits installierte Systeme oder die Produktionsstätte selbst angegeben. Ebenso wird hier bereits die große Systemstruktur dargestellt (siehe Abbildung 77).

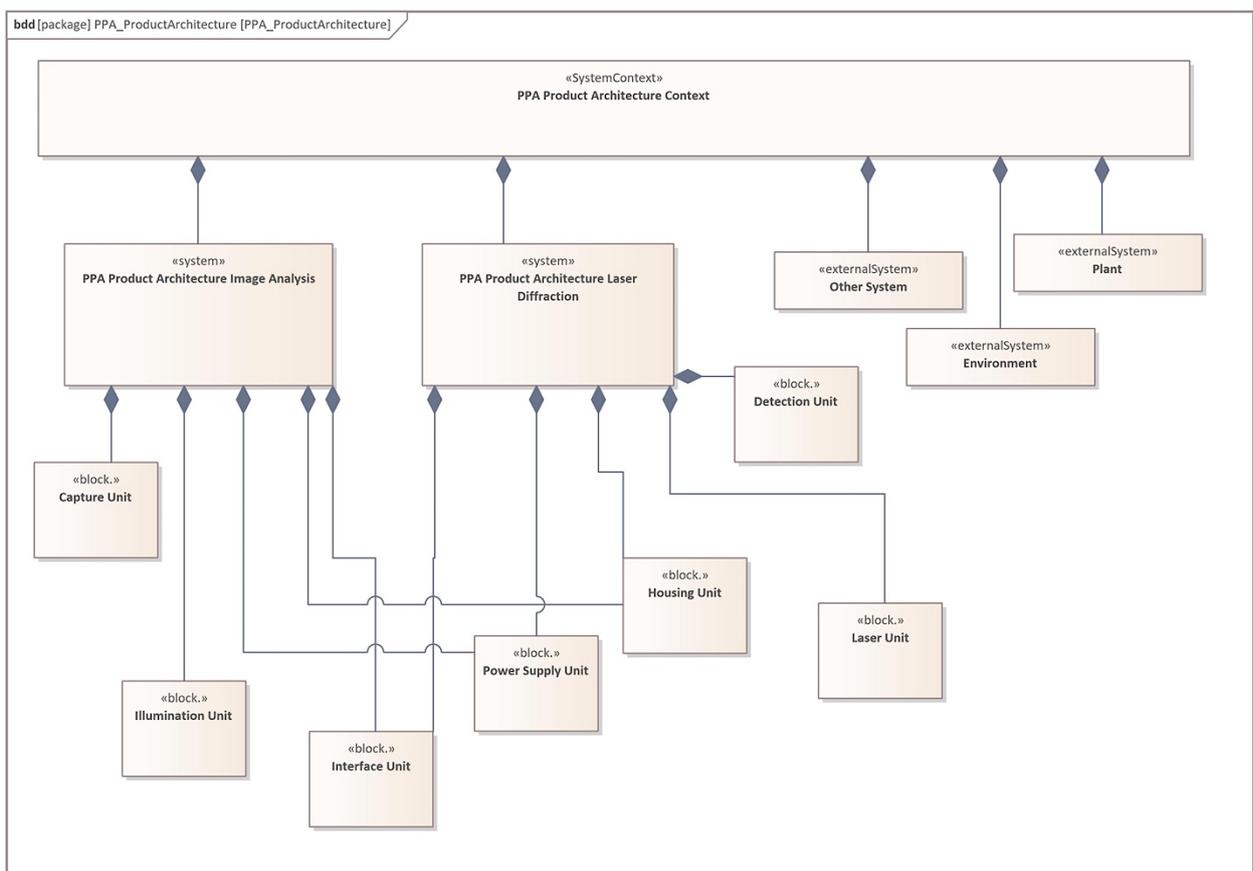


Abbildung 77: Architektur vom Produkt, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 78 sind die Stakeholder, also all jene Personen, die das Produkt beeinflussen oder durch dieses beeinflusst werden, dargestellt. Dies ist von Relevanz, um in der Entwicklung zu wissen, wer welche Anforderungen stellt.

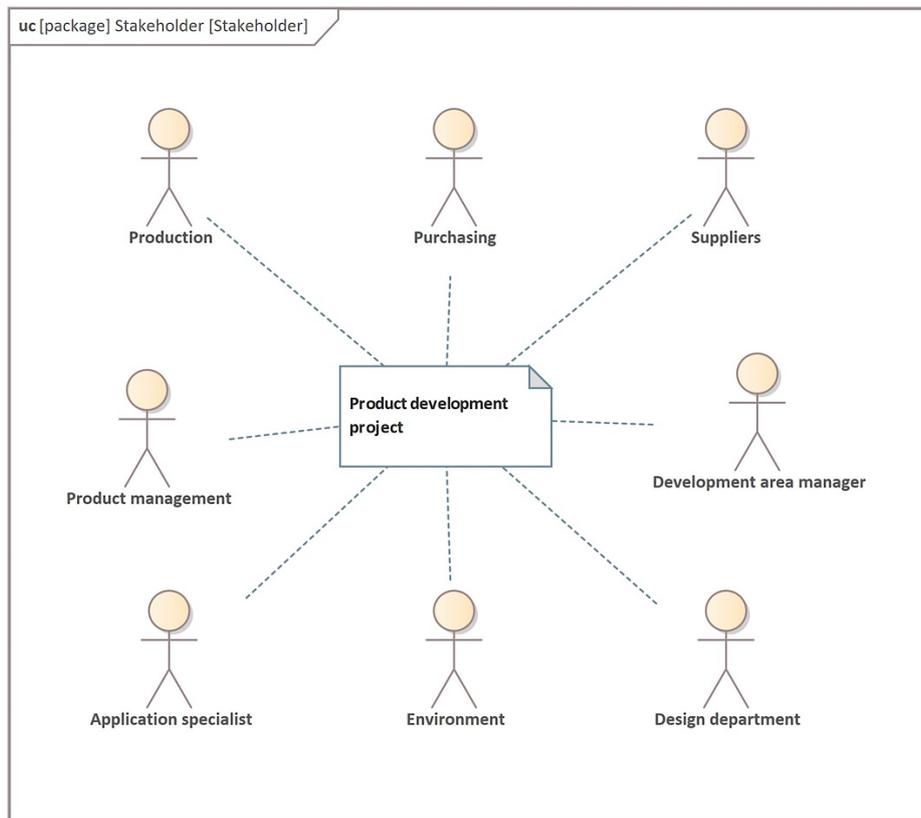


Abbildung 78: Stakeholder, Quelle: Eigene Darstellung

Gerade bei neuen Entwicklungen bestehen Risiken, die zum Teil bekannt sind und zum anderen Teil während der Entwicklung oder erst im Vertrieb auftreten. Die Bewertung der Risiken basiert grundsätzlich auf einer Risikobewertung, wobei zwischen Produkt-, Entwicklungs- und Prozessrisiken unterschieden wird. Ein Produktrisiko ist zum Beispiel die Situation, wenn der Verkaufspreis zu hoch oder der Wiedererkennungswert nicht gegeben ist. Alle technischen Risiken im Rahmen der Entwicklung sind in den Entwicklungsrisiken enthalten und besitzen gerade bei neuen Technologien einen hohen Stellenwert.

Alle Risiken, die aus der Produktion und aus neuen Prozessen entstehen, sind in der Prozessrisikoanalyse abgebildet. Es besteht die Möglichkeit, Risiken auch im Modell abzubilden, wie in Abbildung 79 ersichtlich.

Name	Status	Type	Modified
Price too high in comparison to other suppliers	Proposed	Risk	24/11/2022
Product labling is not prestigious enough	Proposed	Risk	24/11/2022
Measured particle size is not accurate enough	Proposed	Risk	28/01/2023
System is not stable	Implemented	Risk	28/01/2023
Measuring takes too long	Approved	Risk	28/01/2023

Abbildung 79: Darstellung von Risiken, Quelle: Eigene Darstellung

Eines der wichtigsten Diagramme und Modelle ist jenes der Anforderungen an das Produkt oder System. Einige Anforderungen sind in Abbildung 80 dargestellt. Das Darstellen aller Anforderungen würde den Rahmen überschreiten und hätte keinen Mehrwert für die Arbeit.

Die Anforderungen werden in Kombination mit den Stakeholdern und dem Systems Engineering Mitarbeiter oder der Systems Engineering Mitarbeiterin erstellt. Oft ist es auch üblich, dass es zu jeder Anforderung auch einen Test-Case gibt, mit dem die Anforderung validiert und verifiziert wird.

Der Schritt, wo der Test-Case erstellt wird, sollte im Zuge der Erstellung der Anforderung gemeinsam mit dem Verifikation- oder Validierungsteam durchgeführt werden. Sollte dies nicht der Fall sein und man den Test-Case zu einem späteren Zeitpunkt definiert, steigt das Risiko, dass die Definition an Qualität (die Testspezifikationen werden an das Ergebnis angepasst) verliert oder nicht beziehungsweise nur bedingt durchgeführt wird.

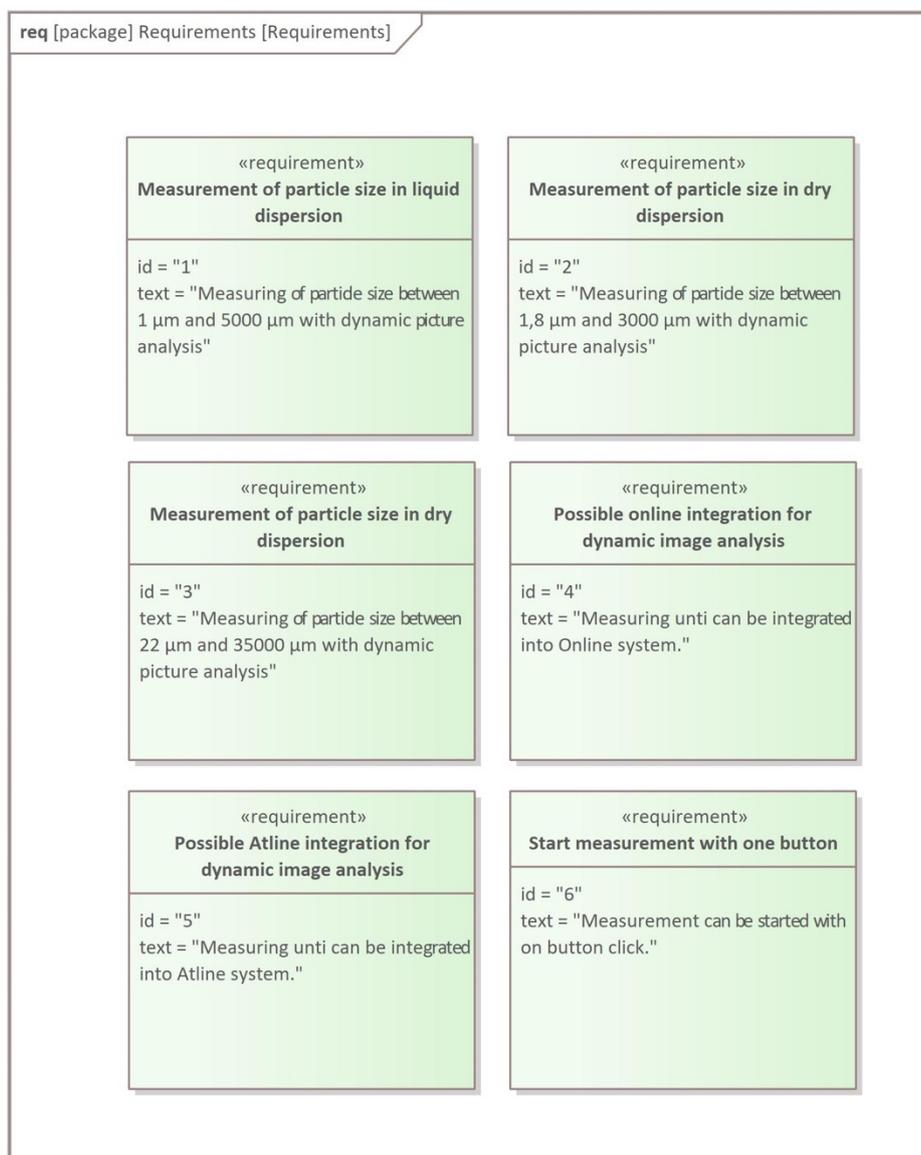


Abbildung 80: Darstellung von Anforderungen, Quelle: Eigene Darstellung

Neben den Anforderungen gibt es auch Use Cases, also ein Anwendungsmodell, wie in Abbildung 81 zu erkennen. Hier werden konkrete Anwendungen, die vom Benutzer oder von der Benutzerin ausgeführt werden können, dargestellt.

Im Falle von Partikelanalytoren wurden Use Cases wie das Starten der Messung oder das Analysieren der Ergebnisse abgebildet. Hierbei handelt es sich indes nur um einen Bruchteil der Anwendungen. Die Anwendungsfälle können bei Bedarf auch mit den Anforderungen in Beziehung stehen.

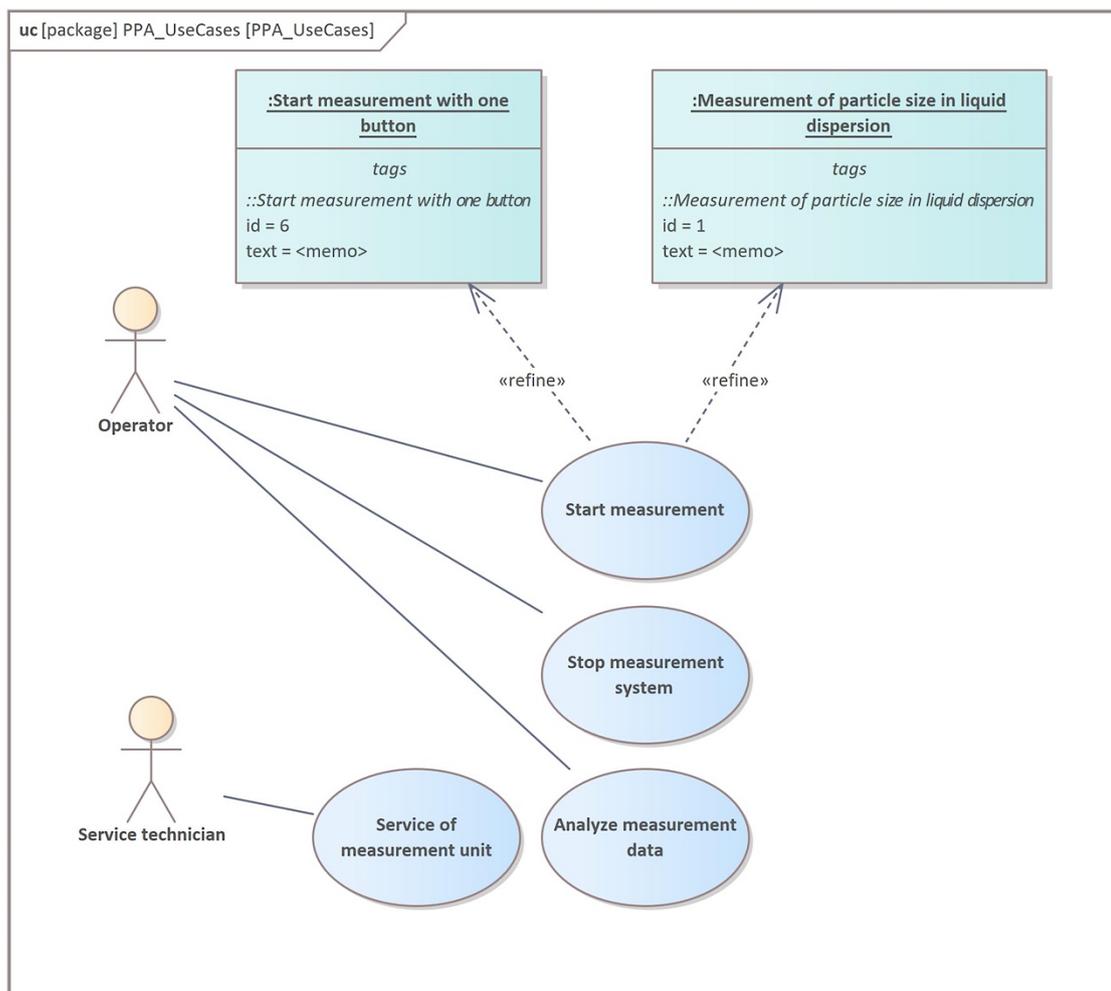


Abbildung 81: Use-Case-Modell, Quelle: Eigene Darstellung

Die Modelle und Diagramme, die bis hierhin präsentiert wurden, sind grundsätzlich unabhängig von der Modellierungsmethode und auch überall ähnlich aufgebaut. Das Variantenmanagement und dessen Modellierung wird nachfolgend näher beschrieben.

Zu Beginn werden die Varianten der einzelnen definierten Module modelliert, um im weiteren Verlauf daraus die Konfigurationen abzuleiten. Die einzelnen Varianten können in mehreren Konfigurationen vorkommen und müssen in der Entwicklung so designt werden, dass sie vielseitig und kombinierbar einsetzbar sind.

In dieser Arbeit werden die Varianten des Laserbeugers beschrieben, da eine Beschreibung aller Varianten und Konfigurationen zu umfangreich wäre.

### 6.3.2 Gesamtsystem: Modellierung der Varianten nach VAMOS

In den *Variations* werden die verschiedenen Variationen der Module abgebildet. Die Detektoreinheit dient zur Detektion des Streulichts beim Laserbeuger und ist somit eines der essenziellen Module des Sensors.

Es gibt Varianten beim Einzeldetektor, da hier verschiedene Winkel existieren, die das Streulicht von sehr kleinen oder sehr großen Partikel aufnehmen können und den Messbereich erweitern. Ähnliches gilt beim Array aus Photoelementen. Je mehr Elemente das Streulicht erfassen kann, umso genauer ist die Messung.

Da neben dem Streulicht auch die Intensität vom Laser ohne Probe gemessen werden muss, um in weiterer Folge mit Probe die Probenmenge im System zu bestimmen muss es möglich sein die Intensität vom Laser zu messen. Dies wird in den meisten Fällen durch eine Öffnung im Detektorarray durchgeführt. Damit bei diesem Schritt kein Messfehler entsteht, ist die Funktionalität einer Justage des Arrays von relevant. Dieser Schritt kann Manuel, durch den Mitarbeiter oder der Mitarbeiterin, oder automatisch mittels Schrittmotoren durchgeführt werden.

In den Komponenten des Moduls wird deklariert, wie viele mindestens und maximal verwendet werden müssen beziehungsweise dürfen. Ersichtlich sind diese genannten Varianten in Abbildung 82.

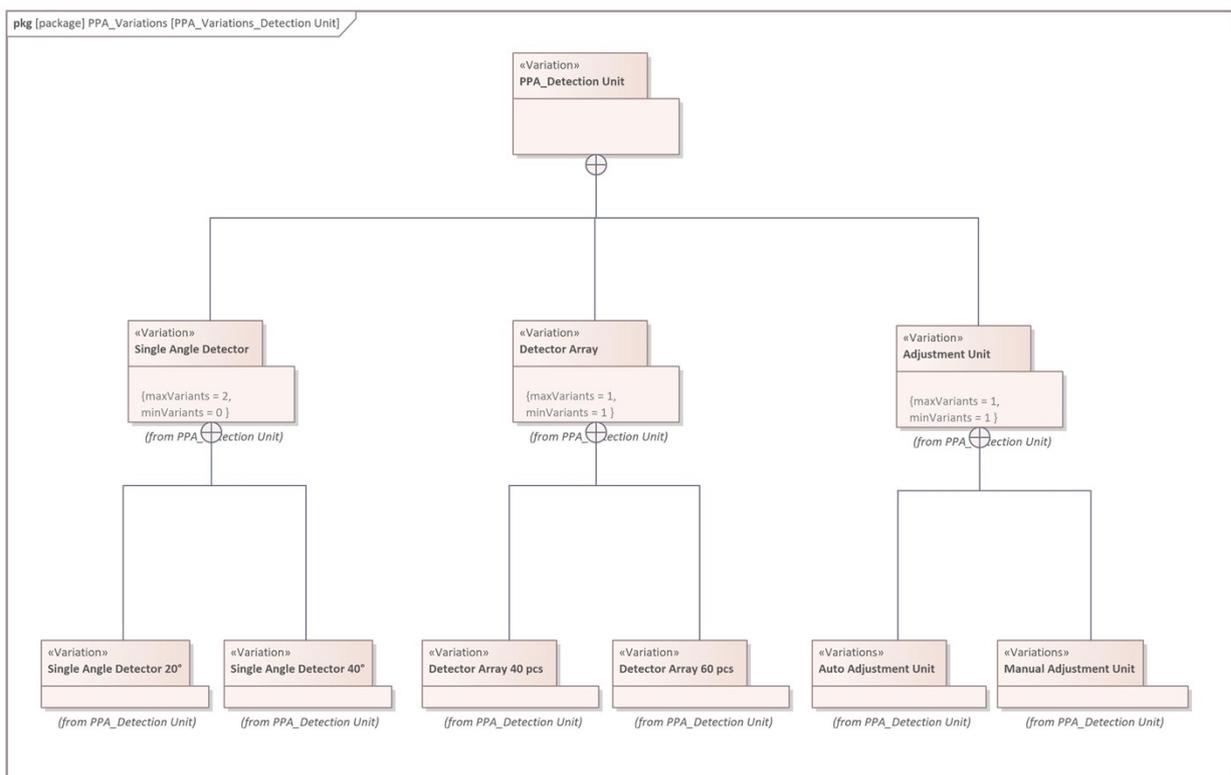


Abbildung 82: Variationen der Detektoreinheit, Quelle: Eigene Darstellung

Das Modul der Lasereinheit dient zur Erzeugung des Laserlichts, das auf die Probe trifft und aus dem das Streulicht resultiert. Mit verschiedenen Wellenlängen lassen sich verschiedene Partikel analysieren. Daher liegen hier verschiedene Varianten der Lasereinheit vor wie in Abbildung 83 abgebildet.

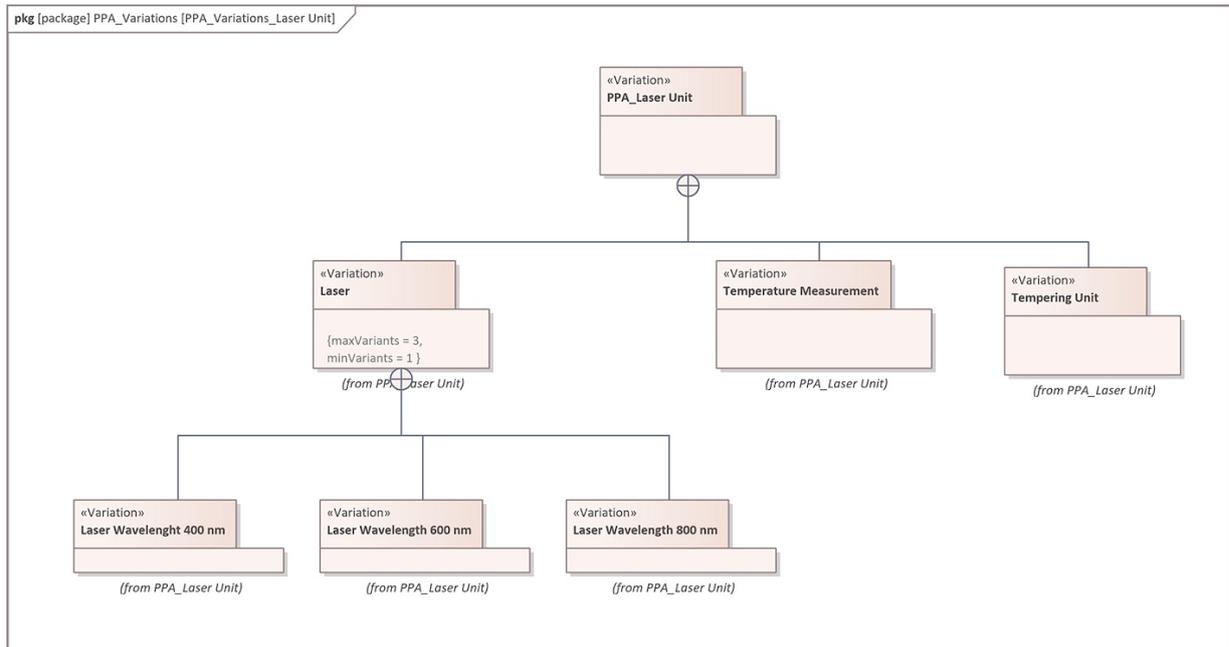


Abbildung 83: Variations der Lasereinheit, Quelle: Eigene Darstellung

Nach den *Variations* werden die *Configurations* erstellt. Beim Laserbeuger gibt es drei verschiedene Konfigurationen (siehe Abbildung 84), die mit verschiedener Hardware ausgestattet sind und somit unterschiedliche Messbereiche erfüllen.

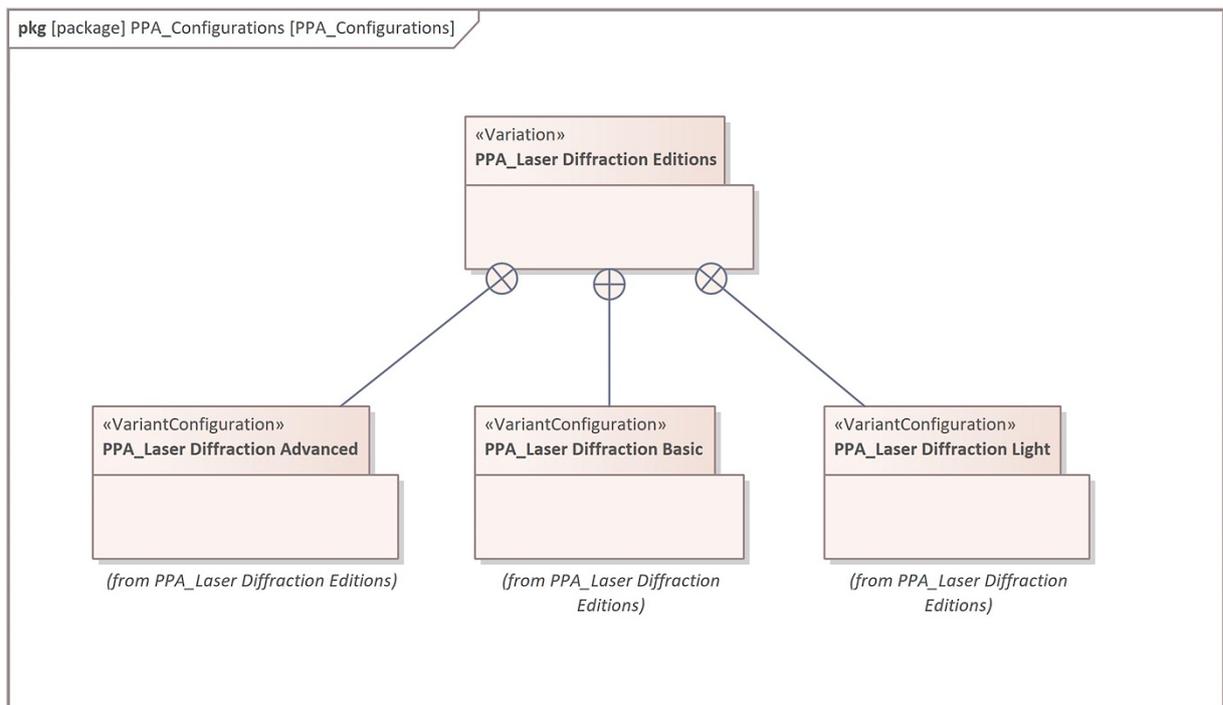


Abbildung 84: Konfigurationsübersicht des Laserbeugers, Quelle: Eigene Darstellung

Es werden ein *Advanced*-, ein *Basis*- und ein *Light*-Laserbeuger entwickelt. Die Konfigurationen sind im Paket mit dem Akronym *VariantConfiguration* gekennzeichnet. Die erste Konfiguration, der Laserbeuger *Advanced*, ist in Abbildung 85 dargestellt und setzt sich aus den Variationen der Module zusammen.

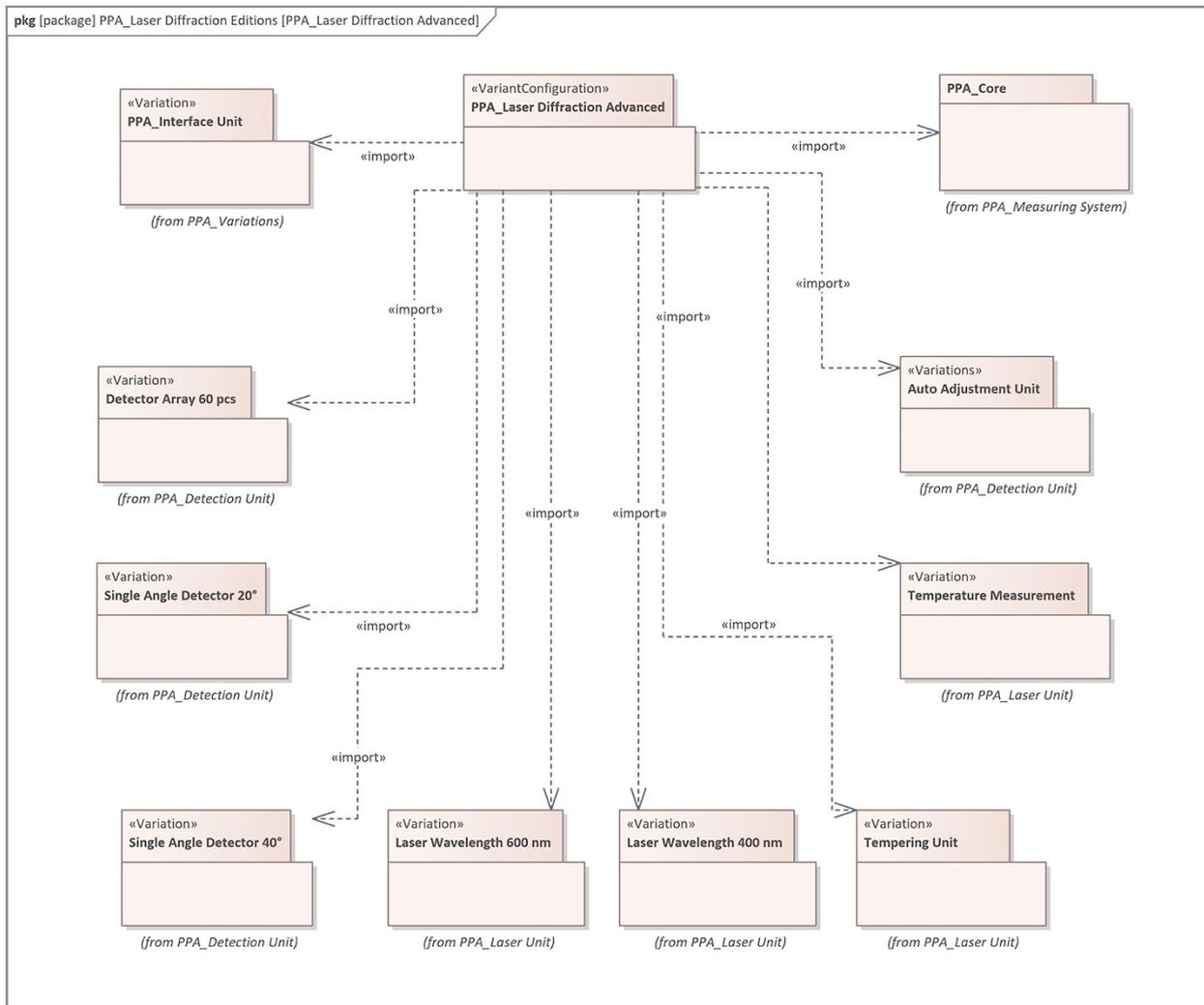


Abbildung 85: Laserbeuger Advanced, Quelle: Eigene Darstellung

Die *Advanced*-Konfiguration ist das High-End-Produkt für Kunden mit hohen Ansprüchen an Messgenauigkeit und Messbereich. Bei der Detektoreinheit und der Lasereinheit sind jene Variationen verbaut, die dazu beitragen mehr Streulicht zu detektieren und somit einen größeren Messbereich von der Partikelgröße zu erreichen.

Dazu werden die Varianten mittels der *Import*-Beziehung an die *VariantConfiguration* gebunden und die Konfiguration wiederum in dem *Core* vom Modell fließt. Grundsätzlich ist jede Konfiguration nach diesem Schema aufgebaut und kann auch in einer Matrix dargestellt werden.

Die nächste Konfiguration ist in Abbildung 86 ersichtlich und bildet die Basis-Version des Laserbeugers. Dieser befindet sich zwischen der Advanced- und der Light-Version und hat somit die größte Zielgruppe. Die Basis-Konfiguration besitzt zwei Laser und abgesehen vom Detektorarray die gleiche Anzahl an Detektoren.

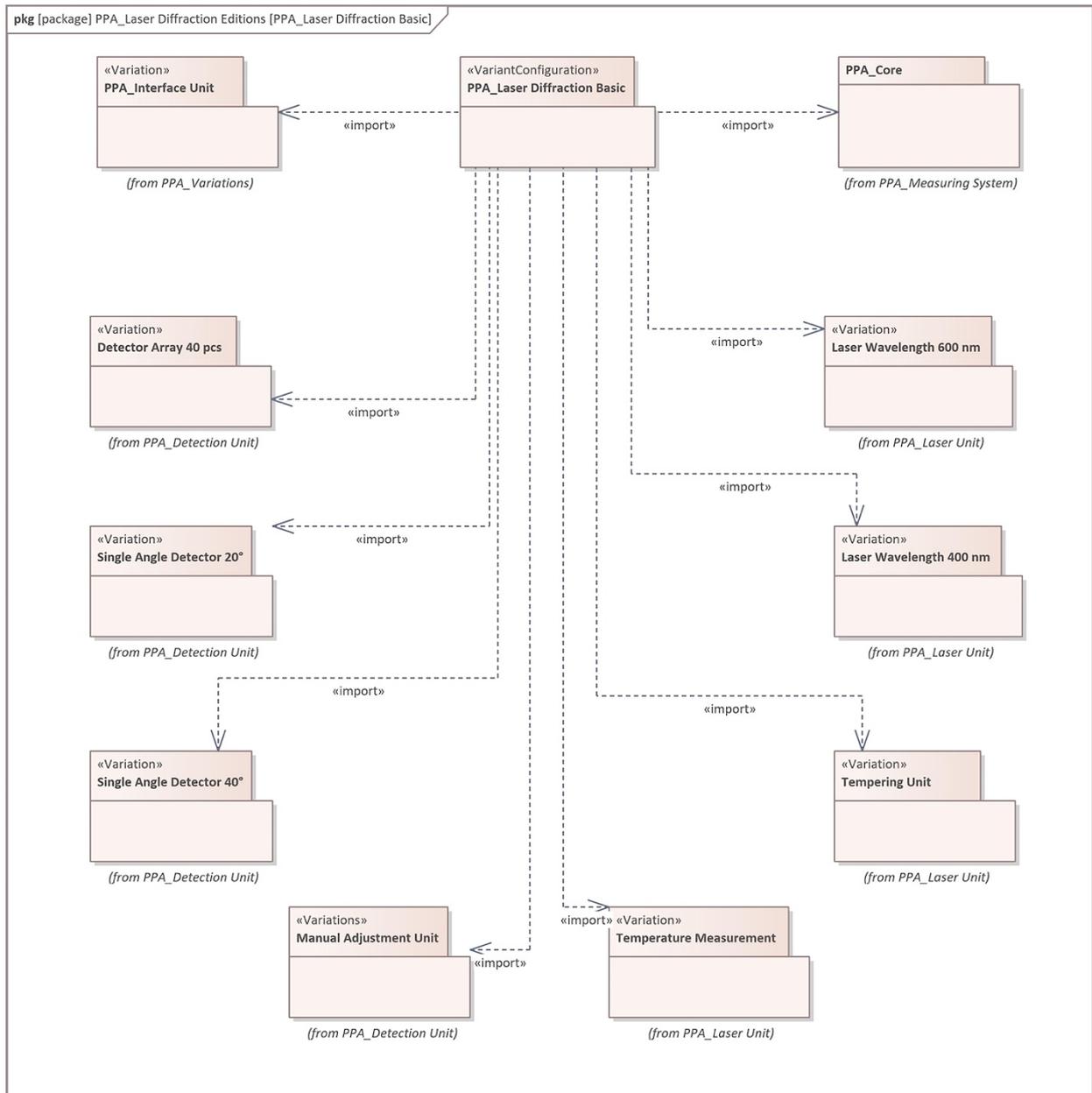


Abbildung 86: Laserbeuger Basic, Quelle: Eigene Darstellung

Das Einstiegsmodell ist die Light-Version und für Kunden und Kundinnen konzipiert, die keine speziellen Anforderungen an Genauigkeit und Messbereich haben.

Wie bereits beschrieben, ist die Light-Version des Laserbeugers die Konfiguration mit den wenigsten Detektoren und nur einem Laser. Die Konfiguration ist in Abbildung 87 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass weniger Detektoren in der Konfiguration sind und somit weniger Streulicht vom Sensor detektiert wird. Daher fließen weniger Daten und Informationen über die Probe in die Auswertung sowie der Analyse der Partikelgröße. Daher ist der Messbereich kleiner und die Messgenauigkeit niedriger.

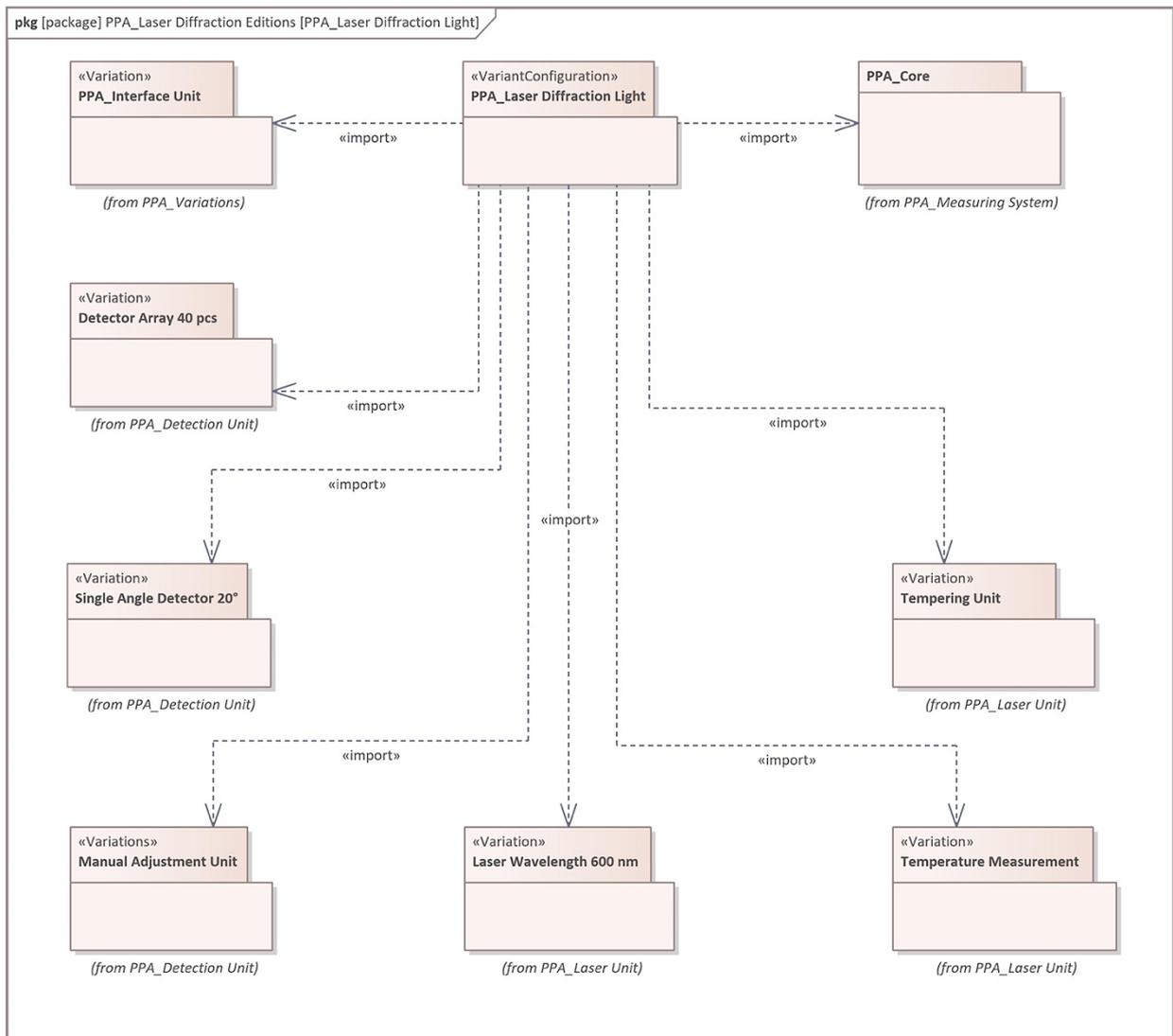


Abbildung 87: Laserbeuger Light, Quelle: Eigene Darstellung

Eine weitere Variantenmodellierung würde ähnlich aufgebaut werden. Die Methode eignet sich sehr gut zur Modellierung von Varianten im Systems-Engineering-Kontext und kann für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden. Da das Modell von großen Systemen schnell unübersichtlich werden kann, ist es auch möglich einzelnen Module in einem separaten Modell abzubilden. Dies ist auch üblich da Module unabhängig von übergeordneten Produkten entwickelt werden. Ein Muster wäre zum Beispiel das Modell zur Temperierung. Hier wäre es üblicher, dass übergeordnet Produkt an das Modul anzupassen.

## 6.4 Mehrwertanalyse durch Risikoreduktion

Da der Mehrwert von modellbasiertem Systems Engineering gegenüber klassischen Herangehensweisen nur schwer quantifizierbar ist, werden in diesem Abschnitt die Risiken bewertet, die im Zuge der Produktentwicklung aufgrund von unzureichendem Anforderungsmanagement, fehlendem Variantenmanagement und mehrfacher Entwicklung gleicher Module entstehen können.

Jene Risiken können durch modellbasiertes Systems Engineering verringert und zum Teil eliminiert werden. Hierin liegt der Mehrwert dieser Herangehensweisen auf Basis der Risikoreduktion. Als Methode für die Risikobewertung wurde die Risikomatrix angewendet, die in Tabelle 8 dargestellt ist.

Risikomatrix											
Wahrscheinlichkeit	10	4	4	3	3	2	1	1	1	1	1
	9	4	4	3	3	2	1	1	1	1	1
	8	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
	7	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
	6	4	4	3	3	2	2	2	1	1	1
	5	4	4	3	3	2	2	2	1	1	1
	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1
	3	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1
	2	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1
	1	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Schweregrad									

Tabelle 8: Risikomatrix, Quelle: Eigene Darstellung

Das Risiko setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit des Eintretens und dem Schweregrad zusammen. Beide Bewertungskennzahlen bewegen sich zwischen null und zehn, wobei zehn das höchste Risiko und null das geringste Risiko in der jeweiligen Kategorie darstellt.

Das Risiko kann zwischen einem sehr hohen Risiko und einem geringen Risiko verortet werden und es gibt für jedes Risiko Handlungsempfehlungen (siehe Tabelle 9).

Risikobeschreibung		
1	<b>Sehr hohes Risiko</b>	Sehr hohes Risiko für das Projekt und Maßnahme notwendig
2	<b>Signifikantes Risiko</b>	Hohes Risiko für das Projekt und Maßnahme empfohlen
3	<b>Moderates Risiko</b>	Mittleres Risiko für das Projekt und muss beobachtet werden
4	<b>Geringes Risiko</b>	Geringes Risiko auf das Projekt und das weitere Beobachten ist empfohlen

Tabelle 9: Risikobeschreibung, Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund des Risikos werden die Mehrkosten und die Verzögerung für das Projekt abgeschätzt und gewichtet dargestellt. Das Projekt und die Projektziele, angenommen aus der Marktanalyse in Unterkapitel 6.1, wurden gemeinsam mit der Entwicklungsabteilung bewertet und die Projektkosten sowie die Projektlaufzeit beurteilt. Die Projektkosten wurden mit 1.500.000 € und die Projektlaufzeit mit 18 Monaten bewertet; beide dienen als Bewertungsgrundlage der folgenden Risikoanalyse und wurden gemeinsam mit dem Entwicklungsteam angenommen.

Die tatsächlich abgeschätzten Mehrkosten sowie die Verzögerung in Monaten werden mit der Wahrscheinlichkeit gewichtet, da es das Risiko zwar gibt, aber nicht jedes Risiko die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit hat und somit die potenzielle Auswirkung auf das Projekt falsch dargestellt würde. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die Mehrkosten und die Verzögerung hat. Mehrkosten setzen sich aus Mehraufwänden bezüglich der einzelnen Disziplinen wie Projektleitung, Hardware, Konstruktion, Firmware und Software zusammen. Die Verzögerung wird in Monaten ausgedrückt und betrifft jene Zeit, die für die Korrektur beziehungsweise den Mehraufwand benötigt wird. In Tabelle 10 sind vier mögliche Risiken abgebildet, die durch modellbasierte Entwicklungsmethoden abgewendet oder reduziert werden können.

Beschreibung vom Risiko und dessen Auswirkung	Risiko	Schweregrad	Wahrscheinlichkeit	Mehrkosten	Verzögerung in Monaten
				<b>410.800 €</b>	<b>16</b>
<b>Risiko 1: Modul zur Temperierung wird mehrfach entwickelt</b> <b>Hintergrund:</b> Wenn Module mit gleichen Anforderungrnen und Spezifikationen mehrfach entwickelt werden in der Entwicklung mehr Ressourcen benötigt. Das Risiko behandelt den Mehraufwand in der Entwicklung und den Effekt auf den Zeitplan vom Projekt. <b>Effekt:</b> Erhöhung der Aufwände in der Hardware, Konstruktion und Firmware.	2	6	6	31.200 €	2
<b>Risiko 2: Änderung der Anforderungen und Spezifikationen</b> <b>Hintergrund:</b> Zu Beginn werden die Anforderungen und die Spezifikationen definiert. Werden diese im Projektverlauf geändert oder neue hinzugefügt hat dies einen Einfluss auf die Projektkosten und den Proejktzeitplan. Zusätzlich dazu werden Ressourcen in der Entwicklung benötigt um die Änderungen umzusetzen. <b>Effekt:</b> Erhöhung der Aufwände in der Entwicklung und Einfluss auf Produktrelease.	2	5	8	124.800 €	5
<b>Risiko 3: Fehlendes Variantenmanagement und daher zu viele Varianten</b> <b>Hintergrund:</b> Durch fehlendes und frühzeitiges definieren der Varianten werden zu viele Varianten entwickelt die vom Markt nicht gefordert und in weiterer Folge auch nicht verkauft werden. <b>Effekt:</b> Ressourcen in Entwicklung falsch eingesetzt und Einfluss Projektkosten sowie Projektzeitplan.	1	8	6	140.400 €	5
<b>Risiko 4: Anforderungen und Spezifikationen falsch umgesetzt</b> <b>Hintergrund:</b> Die Anforderungen und Spezifikationen wurden zu Beginn nicht ordentlich definiert und es wurden auch keine Verifikations- und Validierungstests festgelegt. Zusätzlich dazu gibt es keine ausreichende und verständliche Kommunikation zu den einzelnen Disziplinen in der Entwicklung. <b>Effekt:</b> Ressourcen in Entwicklung falsch eingesetzt und falsches Produkt entwickelt.	1	9	4	114.400 €	4

Tabelle 10: Risikobewertung und Auswirkungen

Die Risiken aus Tabelle 10 wurden aus einem Workshop in der Entwicklungsabteilung, an dem aus jeder Disziplin ein Vertreter bzw. eine Vertreterin teilnahm, erarbeitet und bewertet. Es wurden jene vier Risiken gewählt, deren Auswirkungen mit modellbasiertem Systems Engineering entweder begrenzt oder gänzlich vermieden werden könnten.

Als das erste Risiko wird die Mehrfachentwicklung von Modulen wie Temperierung mit gleichen Anforderungen beschrieben.

Der Effekt auf das Projekt bestünde darin, dass verschiedene Abteilungen an gleichen Modulen arbeiten, sodass Ressourcen verschwendet werden. Die Verzögerung für das Projekt wird mit zwei Monaten bewertet und es würden Mehrkosten von über 30.000 € entstehen. Diese Zahlen beziehen sich auf die Entwicklung einer Temperatureinheit und wären demnach bei komplexeren Modulen wesentlich höher.

In Bezug auf das zweite Risiko wird das Ändern von Anforderungen und Spezifikationen im laufenden Entwicklungsprozess erläutert und bewertet. Das Risiko entsteht, wenn kein Prozess für sogenannte *Change Requests* vorhanden ist. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist sehr hoch, da es immer Änderungen bezüglich der Anforderungen geben wird. Im Rahmen der Bewertung wird das Risiko festgestellt, das besteht, wenn es keinen Prozess für diese Änderungen gibt. Die Verzögerung des Projekts wird auf fünf Monate und die Mehrkosten werden auf knapp 125.000 € geschätzt.

Das dritte Risiko betrifft ein fehlendes Variantenmanagement, das mit einer Projektverzögerung von fünf Monaten und Mehrkosten von 140.000 € bewertet wird. Die Mehraufwände entstehen, wenn Varianten entwickelt werden, die im späteren Verkauf nicht benötigt werden und am Markt auch nicht gefordert sind. Mit modellbasierten Ansätzen und den in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten Methoden kann dem entgegengewirkt und das Risiko erheblich minimiert werden.

Das vierte und letzte Risiko betrifft eine fehlende und fehlerhafte Kommunikation der Anforderungen und Spezifikationen gegenüber den Entwicklungsabteilungen sowie den einzelnen Disziplinen. Der Schweregrad für das Projekt ist sehr hoch, da erhebliche Ressourcen verschwendet werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist eher gering, da dieser Fall auch mit klassischen Methoden verhindert werden kann. Jedoch können das System und dessen Anforderungen mit modellbasierten Methoden noch übersichtlicher dargestellt werden, um die Entwicklungsziele an jede Disziplin verständlich und einfach kommunizieren zu können.

Insgesamt können durch diese vier Risiken Mehrkosten in Höhe von mehr als 400.000 € und eine mögliche Projektverzögerung von mehr als einem Jahr entstehen. Diese Kosten können mit modellbasiertem Systems Engineering erheblich reduziert werden und somit präsentiert sich hier auch der Mehrwert dieser modellbasierten Methoden gegenüber klassischen Herangehensweisen. Die Einflüsse für die Bewertung der potenziellen Risiken hängen vom Projektumfang ab und müssen für jedes Projekt individuell bewertet werden. Anhand der Bewertung soll veranschaulicht werden, dass modellbasiertes Systems Engineering seine Berechtigung im Produktentstehungsprozess hat und dass der Mehrwert durch Risiken quantifizierbar ist.

## 7 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Der Bereich der prozessintegrierten Partikelanalyse ist ein Markt, der stark wächst und aufgrund der Variantenvielfalt für die Entwicklung solcher Produkte eine große Herausforderung darstellt. Daher bedarf es innovativer und neuer Ansätze in der Produktentwicklung und im Variantenmanagement. Aus der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Marktanalyse ging hervor, dass am Markt der prozessintegrierten Messtechnik bereits viele Mitbewerber etabliert sind, die eine breite Produktpalette anbieten. Zusätzlich wurde erkannt, dass nicht alle Sensortechnologien in der Prozessmesstechnik der Partikelanalyse eingesetzt werden und dass diese bei der Entwicklung zu Beginn somit nicht berücksichtigt werden müssen.

Im Zusammenhang mit der Variantenbildung wurde herausgefunden, dass modellbasiertes Systems Engineering nicht bei der kreativen Variantenfindung unterstützt, sondern als Dokumentation auf Modellbasis zu sehen ist. Bezüglich der Modellierung mit dem definierten Werkzeug sowie der Sprache und Methode wurde festgestellt, dass die Werkzeuge sehr umfangreich sind und gegenüber Dokumenten das Modell eines Systems übersichtlicher und einfacher darstellen. Dennoch ist zu konstatieren, dass viel Erfahrung mit dem Werkzeug und der Sprache erforderlich ist, um komplexe Systeme zu modellieren. Ebenso sollte bewertet werden, ob der Mehrwert auch bei trivialen Systemen gegeben ist.

In Zukunft wird versucht, einen modellbasierten Ansatz bezüglich Systems Engineering im Unternehmen zu verankern und gerade im Anforderungsmanagement und im Variantenmanagement verstärkt einzusetzen. Dazu sollte jedoch vorher noch mehr Kompetenz aufgebaut werden, um das ganze Potenzial dieser Methodik nutzen zu können. Des Weiteren müssen in Zukunft zwei Themen bearbeitet werden. Das erste ist die Darstellung des Mehrwerts, um dem Management und dem Projektteam aufzuzeigen, dass sich zwar die Projektkosten und die Projektlaufzeit durch den initialen Mehraufwand zu Projektstart sowie die laufende Betreuung erhöhen, aber Produkt-, Entwicklungs- und Produktionsrisiken erheblich eingegrenzt werden können und gerade bei großen Entwicklungsprojekten ihre Berechtigung haben. Das zweite Thema betrifft die Integration in den Entwicklungsprozess und das Ausrollen des neuen Prozesses über das gesamte Unternehmen.

Der nächste Schritt besteht darin, die erarbeiteten Methoden und Ansätze in einem Entwicklungsprojekt, bei dem es mehrere Varianten gibt, zu evaluieren und die Erkenntnisse aus der Praxis sowie die Rückmeldungen seitens des Projektteams in den modellbasierten Systems-Engineering-Prozess einfließen zu lassen, damit die Anwendung im ganzen Unternehmen umgesetzt werden kann. Dies ist jedoch ein Prozess, der viel Zeit in Anspruch nimmt, da einerseits die neuen Methoden in der Produktentwicklung akzeptiert werden müssen und andererseits der aktuelle Produktentstehungsprozess angepasst werden muss.

## LITERATURVERZEICHNIS

### Gedruckte Werke (25)

Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022): *Anton Paar Firmenpräsentation Allgemein*, 1. Auflage

Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022): *Anton Paar Marketing Allgemein*, 1. Auflage

Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022): *Verfahren zur Partikelgrößenbestimmung*, Graz

Bellmann, C.; Caspari, A.; Moitzi, C.; Babick, F. (2020): *Dynamische und elektrophoretische Lichtstreuung*, 2. Auflage

Bohnet, Matthias (2004): *Mechanische Verfahrenstechnik*, 1. Auflage

Eigner, Martin; Koch, Walter; Muggeo, Christian (2017): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*, Springer Vieweg

Eigner, Martin; Stelzer, Ralph (2008): *Product Lifecycle Management*, 2. Auflage

Friedenthal, Sanford; Moore, Alan; Steiner, Rick (2015): *A Practical Guide to SysML*, 3. Auflage

Hertzog, Erik; Pop, Adrian (2009): *Tutorial on SysML, Modelica, Eclipse and ModelicaML*

ISO (Hrsg.) (2006): *ISO13322-2: Particle size analysis — Image analysis methods*, 1. Auflage

ISO (Hrsg.) (2006): *Particle size analysis — Image analysis methods (ISO 13322-2)*

ISO (Hrsg.) (2009): *ISO 13320:2009 Particle size analysis — Laser diffraction methods*, 1. Auflage

ISO (Hrsg.) (2022): *ISO 13320:2022 Particle size analysis — Laser diffraction methods*, 2. Auflage

Kessler, Rudolf (2006): *Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.

Koch, Karl (1997): *Industrielle Prozeßanalytik*, 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Kossiakoff, Alexander; Sweet, William; Seymour, Samuel; Biemer, Steven (2011): *Systems Engineering principles and practice*, 2 Auflage

Krause, Dieter; Gebhardt, Nicolas (2018): *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*, Springer

Kunster, Jürg; Bachmann, Christian; Huber, Eugen; Hubmann, Mike; Lippmann, Robert; Schneider, Emil; Schneider, Patrick; Witschi, Urs; Wüst, Roger (2018): *Handbuch Projektmanagement*, 4. Auflage, Springer Gabeler

Lindemann, Udo; Reichwald, Ralf; Zäh, Michael (2006): *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*, Springer

Stieß, Matthias (2009): *Mechanische Verfahrenstechnik- Partikeltechnologie 1*, Springer

Vraetz, Tobias (2018): *Entwicklung und Anwendung eines innovativen Konzepts zur Inline-Charakterisierung von Stoffgemischen in kontinuierlichen Massenströmen mittels der Acoustic Emission Technologie*, 1. Auflage, Verlag R. Zillekens

Weilkiens, Tim (2006): *Systems Engineering with SysML/UML*

Weilkiens, Tim (2016): *Variant Modeling with SysML*, 1. Auflage

Weilkiens, Tim (2020): *SYSMOD- The Systems Modeling Toolbox*, 3. Auflage

Weilkiens, Tim; Lamm, Jesko; Roth, Stephan; Walker, Markus (2022): *Model-based System Architecture*, 2. Auflage

#### **Wissenschaftliche Artikel (4)**

Cooper, Robert (2014): *What'sNext?: AfterStage-Gate*, S. 20-31

Gausemeier, Jürgen; Moehringer, Stefan (2003): *NEW GUIDELINE VDI 2206 – A FLEXIBLE PROCEDURE MODEL FOR THE DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEMS*

Gräßler, Iris; Roesmann, Daniel; Thiele, Henrik (2021): *V-model based development of cyber-physical systems and cyber-physical production systems*

VDI (2021): *VDI/VDE 2206:2021: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme"*

#### **Online-Quellen (8)**

Catia (2022): [www.docs.nomagic.com](http://www.docs.nomagic.com)

<https://docs.nomagic.com/display/MD2022x/Understanding+the+user+interface> [Stand: 9.November.2022]

EclipseSource (2022): [www.eclipsesource.com](http://www.eclipsesource.com)

<https://eclipsesource.com/de/technologie/eclipse-papyrus/> [Stand: 8.November.2022]

IDEF (2022): [www.idef.com](http://www.idef.com)

[https://www.idef.com/idefo-function\\_modeling\\_method/](https://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/) [Stand: 5.November.2022]

Object Management Group (2017): [www.omg.org](http://www.omg.org)

<https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/PDF> [Stand: 20.Januar.2023]

Object Management Group (2022): [www.omg.org](http://www.omg.org)

<https://www.omg.org/spec/SysML/1.7/PDF> [Stand: 20.Januar.2023]

OpenModelica (2013): [www.openmodelica.org](http://www.openmodelica.org)

[https://www.ida.liu.se/labs/pelab/modelica/OpenModelica/MDT/ModelicaML/doc/ModelicaML\\_description\\_profile\\_version\\_1\\_3\\_2.html](https://www.ida.liu.se/labs/pelab/modelica/OpenModelica/MDT/ModelicaML/doc/ModelicaML_description_profile_version_1_3_2.html) [Stand: 20.Januar.2023]

Sparx (2019): [www.sparxsystems.de](http://www.sparxsystems.de)

[https://www.sparxsystems.de/fileadmin/user\\_upload/pdfs/EAReviewersGuide\\_EA-15-DE.pdf](https://www.sparxsystems.de/fileadmin/user_upload/pdfs/EAReviewersGuide_EA-15-DE.pdf) [Stand: 8.November.2022]

Sympatec (2022): [www.sympatec.com](http://www.sympatec.com)

<https://www.sympatec.com/de/partikelmesstechnik/sensoren/laserbeugung/mytos/mytos-twister-on-line/> [Stand: 9.November.2022]

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Anton Paar Headquarter, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022) .....	1
Abbildung 2: Produktportfolio Anton Paar, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022).....	2
Abbildung 3: Darstellungsarten von Einzelpartikeln, Quelle: Bohnet (2004), S. 17. ....	5
Abbildung 4: Schematische Bildanalyse, Quelle: ISO (Hrsg.) (2006), S. 3. ....	6
Abbildung 5: Messprinzip der dynamischen Lichtstreuung, Quelle: Bellmann/Caspari/Moitzi/Babick (2020), S. 54. ....	8
Abbildung 6: Messprinzip der Laserbeugung, Quelle: ISO (Hrsg.) (2022), S. 9. ....	9
Abbildung 7: Vergleich zwei verschiedener Größenklassen, Quelle: ISO (Hrsg.) (2009), S. 6.....	10
Abbildung 8: Arten der Prozessanalytik, Quelle: Vraetz (2018), S. 8.....	13
Abbildung 9: Prinzip der Probennahme bei gasförmigen Medien, Quelle: Koch (1997), S. 20.....	14
Abbildung 10: Schema der Probenentnahme bei gasförmigen Proben, Quelle: Koch (1997), S. 21.....	15
Abbildung 11: Schema der Probenentnahme bei flüssigen Proben, Quelle: Koch (1997), S. 42. ....	16
Abbildung 12: Schema für Inline-Analyse, Quelle: S. ISO (Hrsg.) (2006), S.16. ....	16
Abbildung 13: Beispiel Online-Probenentnahme, Quelle: Koch (1997), S. 68. ....	17
Abbildung 14: Beispiele dynamische Bildanalyse im Inline-System, Quelle: ISO (Hrsg.) (2006), S. 21 f. .	17
Abbildung 15: Beispiel Phasenkonzept, Quelle: Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 23. ....	18
Abbildung 16: Agiles Projektmanagement, Quelle: Kunster/Bachmann/Huber/Hubmann/Lippmann/Schneider/Schneider/Witschi/Wüst (2018), S. 65. ....	19
Abbildung 17: Methoden des Produktentstehungsprozesses, Quelle: Eigner/Stelzer (2008), S. 19. ....	20
Abbildung 18: Stage-Gate-Modelle, Quelle: Cooper (2014), S. 23. ....	21
Abbildung 19: V-Modell nach VDI 2206, Quelle: VDI (2021), S. 4. ....	22
Abbildung 20: V-Modell-Prozess, Quelle: Gausemeier/Moehringer (2003), S. 7.....	23
Abbildung 21: Zeitleiste Variantenvielfalt, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 227. ....	24
Abbildung 22: Bereich der optimalen Variantenvielfalt, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 228. .....	24
Abbildung 23: Kreation der Varianten, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 230. ....	25
Abbildung 24: Variantenbewertung Audi, Quelle: Lindemann/Reichwald/Zäh (2006), S. 233. ....	25
Abbildung 25: Vereinfachter Systems-Engineering-Prozess, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 4. ....	26

Abbildung 26: Beispiel eines Systems-Engineering-Teams, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 10. ....	27
Abbildung 27: Beispiel Systemmodell, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 17. ....	28
Abbildung 28: Spezifizierung der Komponenten mit Systemmodell, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 18. ....	29
Abbildung 29: Übersicht modellbasiertes Systems Engineering, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 508. ....	29
Abbildung 30: Verknüpfung von Werkzeug, Tool und Sprache, Quelle: Weilkiens (2016), S. 7. ....	30
Abbildung 31: SysML Übersicht der Diagramme, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 32. ....	33
Abbildung 32: UML und SysML, Quelle: Weilkiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 350. ....	33
Abbildung 33: ModelicaML-Diagrammarten, Quelle: Hertzog/Pop (2009), S. 142. ....	34
Abbildung 34: Paarvergleichsmethode Sprache, Quelle: Eigene Darstellung ....	36
Abbildung 35: Nutzwertanalyse Sprache, Quelle: Eigene Darstellung ....	37
Abbildung 36: Sparx Enterprise Architect, Quelle: Eigene Darstellung. ....	38
Abbildung 37: Dassault Systemes NoMagic Benutzeroberfläche, Quelle: Catia (2022), Online-Quelle [9.November.2022]. ....	39
Abbildung 38: Eclipse Papyrus Benutzeroberfläche, Quelle: EclipseSource (2022), Online-Quelle [8.November.2022]. ....	40
Abbildung 39: Paarvergleichsmethode Werkzeug, Quelle: Eigene Darstellung ....	41
Abbildung 40: Nutzwertanalyse Werkzeug, Quelle: Eigene Darstellung. ....	42
Abbildung 41: Vorgehensweise für SYSMOD, Quelle: Weilkiens (2006), S. 26. ....	43
Abbildung 42: Übersicht VAMOS-Methode, Quelle: Weilkiens (2016), S. 4. ....	44
Abbildung 43: Überblick FAS-Methode, Quelle: Weilkiens/Lamm/Roth/Walker (2022), S. 216. ....	45
Abbildung 45: Übersicht OOSEM-Methode, Quelle: Friedenthal/Moore/Steiner (2015), S. 423. ....	46
Abbildung 45: Paarvergleichsmethode Methode, Quelle: Eigene Darstellung. ....	48
Abbildung 46: Nutzwertanalyse Methode, Quelle: Eigene Darstellung. ....	49
Abbildung 47: Vorgehensweise der Modellierung, Quelle: Eigene Darstellung ....	50
Abbildung 48: Sympatec Mytos mit Twister, Quelle: Sympatec (2022), Online-Quelle [9.November.2022] ....	53
Abbildung 49: Vorgehen bei der Modularisierung, Quelle: Krause/Gebhardt (2018), S. 130. ....	54
Abbildung 50: Übersicht der Varianten, Quelle: Eigene Darstellung. ....	55
Abbildung 51: Probennahme flüssiger Proben mit Stichleitung, Quelle: Eigene Darstellung ....	55

Abbildung 52: Probennahme flüssiger Proben mit Bypass, Quelle: Eigene Darstellung .....	56
Abbildung 53: Probennahme fester Proben mit Stichleitung, Quelle: Eigene Darstellung.....	56
Abbildung 54: Probennahme fester Proben mit Bypass, Quelle: Eigene Darstellung.....	57
Abbildung 55: Sensor der dynamischen Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung .....	57
Abbildung 56: Sensor des Laserbeugers, Quelle: Eigene Darstellung .....	58
Abbildung 57: System Stichleitung für flüssige Proben, Quelle: Eigene Darstellung.....	59
Abbildung 58: System Stichleitung für feste Proben, Quelle: Eigene Darstellung .....	59
Abbildung 59: System Bypass für flüssige Proben, Quelle: Eigene Darstellung.....	60
Abbildung 60: System Bypass für feste Proben, Quelle: Eigene Darstellung .....	60
Abbildung 61: System Laserbeuger, Quelle: Eigene Darstellung .....	61
Abbildung 62: System dynamische Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung.....	62
Abbildung 63: LED-X-Modul, Quelle: Eigene Darstellung .....	63
Abbildung 64: Laser-X-Modul, Quelle: Eigene Darstellung.....	63
Abbildung 65: Modul Temperaturmessung, Quelle: Eigene Darstellung .....	64
Abbildung 66: Modul Temperierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	64
Abbildung 67: Modul Stromversorgungseinheit, Quelle: Eigene Darstellung.....	65
Abbildung 68: Modul Schnittstelle, Quelle: Eigene Darstellung .....	65
Abbildung 69: Modul Durchflussmesseinheit, Quelle: Eigene Darstellung .....	66
Abbildung 70: Modul Bypass-Leitung, Quelle: Eigene Darstellung.....	66
Abbildung 71: Messeinrichtung Laserbeuger nach der Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	67
Abbildung 72: Messeinrichtung dynamische Bildanalyse nach der Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	67
Abbildung 73: Bypass für flüssige Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	68
Abbildung 74: Bypass für feste Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung.....	68
Abbildung 75: Stichleitung für flüssige Proben nach Modularisierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	68
Abbildung 76: Aufbau des Modells nach VAMOS, Quelle: Eigene Darstellung .....	69
Abbildung 77: Architektur vom Produkt, Quelle: Eigene Darstellung .....	70
Abbildung 78: Stakeholder, Quelle: Eigene Darstellung .....	71
Abbildung 79: Darstellung von Risiken, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Abbildung 80: Darstellung von Anforderungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	72
Abbildung 81: Use-Case-Modell, Quelle: Eigene Darstellung.....	73

Abbildung 82: Variationen der Detektoreinheit, Quelle: Eigene Darstellung .....	74
Abbildung 83: Variations der Lasereinheit, Quelle: Eigene Darstellung.....	75
Abbildung 84: Konfigurationsübersicht des Laserbeugers, Quelle: Eigene Darstellung .....	75
Abbildung 85: Laserbeuger Advanced, Quelle: Eigene Darstellung .....	76
Abbildung 86: Laserbeuger Basic, Quelle: Eigene Darstellung .....	77
Abbildung 87: Laserbeuger Light, Quelle: Eigene Darstellung .....	78

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Partikelgröße in der dispersen Phase, Quelle: Stieß (2009), S. 9.....	4
Tabelle 2: Aufteilung der Messverfahren, Quelle: Anton Paar GmbH (Hrsg.) (2022), S. 4.....	5
Tabelle 3: Prozessanalytik-Methoden Vor- und Nachteile, Quelle: Eigene Darstellung .....	14
Tabelle 4: Paarvergleichsmethode Bewertung, Quelle: Eigene Darstellung.....	31
Tabelle 5: Mitwirkende Bereiche in der Analyse und Bewertung, Quelle: Eigene Darstellung .....	31
Tabelle 6: Ergebnisse der Marktanalyse der dynamischen Bildanalyse, Quelle: Eigene Darstellung .....	51
Tabelle 7: Ergebnisse der Marktanalyse der Laserbeuger, Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Tabelle 8: Risikomatrix, Quelle: Eigene Darstellung .....	79
Tabelle 9: Risikobeschreibung, Quelle: Eigene Darstellung .....	79
Tabelle 10: Risikobewertung und Auswirkungen .....	80

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

PSA	Particle Size Analyser
LED	Light-Emitting Diode
CCD	Charge-coupled device
CEE	Cross Enterprise Engineering
SYSMOD	Systems Modeling Process
VAMOS	Variant Modeling Systems Modeling Process
FAS	Functional Analysis System Technique
OOSEM	Object-Oriented Systems Engineering Method
IDEF	Integrated Definition
PCBA	Printed Circuit Board Assembly
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
NTC	Negative Temperature Coefficient Thermistor
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
OMG	Object Management Group
UML	Unified Modeling Language