

## Qualitätsplanung in der Entwurfsphase magnetgelagerter Systeme

Martin Gronek, Waldrebenweg 4, 04319 Leipzig

Email: M.Gronek@web.de

### Kurzfassung

Die Markteinführung neuer Technologien und Produkte bedarf einer umfangreichen Vorarbeit. Diese beinhaltet einerseits die Entwicklung des Produktes selbst, aber gleichsam bedeutend sind die Maßnahmen zur Absicherung der Produkteigenschaften hinsichtlich der Anforderungen, die es zu erfüllen gilt.

Sonder- und Einzelfertigung machen den wesentlichen Anteil in der Magnetlagertechnik aus, was dem Entwicklungsaufwand und den erforderlichen Komponenten geschuldet ist. Erreicht eine Magnetlagerentwicklung die Serienreife, so muss in den überwiegenden Fällen von einer anwendungsspezifischen Kleinserie gesprochen werden. Eine tatsächliche Standardisierung, die mit konventionellen Lagerungsarten vergleichbar wäre, gibt es nicht.

Der Beitrag widmet sich dem Thema der Anforderungsanalyse einerseits aus systemtechnischer Sicht und weiter gefasst auf Anforderungen vom Anwender an das Produkt Magnetlager. Es werden die Aspekte der Qualitätsplanung und Risikominimierung für sicherheitsrelevante Maschinenbaugruppen erörtert.

### 1 Einführung

Das Qualitätsmanagement ist seit vielen Jahren fester Bestandteil industrieller Unternehmen und immer stärker auch auf dem Dienstleistungssektor für erfolgreiche Geschäftsbeziehungen ausschlaggebend. Eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001 durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle ist zum einen als marketingtaugliche Firmenauszeichnung zu verstehen, jedoch noch wichtiger ist das hierdurch empfundene Vertrauen, welches der Kunde dem Lieferanten entgegenbringt. Die ISO 9001 in der aktuellen Ausgabe von 2008 (eine neue Ausgabe ist derzeit in Begutachtung) definiert die Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem. Sie geht über mehrere aktualisierte Ausgaben aus der DIN ISO 9001:1987-05: „Qualitätssicherungssysteme; Qualitätssicherungsnachweisstufe für Entwicklung und Konstruktion, Produktion, Montage und Kundendienst“ hervor [Beuth 2013].

Das Qualitätsmanagement selbst erfasst alle Prozesse eines Unternehmens zur Produktentwicklung, Materialbeschaffung, Fertigung und zum Vertrieb der Produkte. Voranstehend fordert die ISO 9001:2008, dass das Unternehmen die Anforderungen

des Kunden an das Produkt ermittelt. Weiter werden in Bezug auf Entwicklungen deren Planung und folgende Festlegungen gefordert, nach [ISO 9001:2008]:

- Definition der Entwicklungsphasen
- Bewertung, Verifizierung und Analyse jeder Entwicklungsphase (bzw. deren Ergebnisse)

Nach [ISO 9000:2005] ist Qualität der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale [...] Anforderungen [...] erfüllt“, Anforderungen wiederum sind Erwartungen an das Produkt und gehen als Eingabe in den Entwicklungsprozess ein.

Zusammenfassend sei hier zunächst festgehalten, dass Qualität planbar ist. Anforderungen an ein Produkt, sowie potentielle Risiken sind bereits in der Entwurfsphase zu analysieren. In der Branche der Automobilindustrie, welche ein Vorreiter bzgl. des Vorbildcharakters ist, sind bereits zahlreiche Methoden für verschiedenste Funktionsbereiche definiert, siehe [VDA 4:2010]. Mit Blick auf ein mechatronisches Produkt, wie es eine aktive Magnetlagerung im klassischen Sinne ist, wird dies nachfolgend weiter betrachtet.

## 2 Entwurf aktiver magnetischer Lagerungen

Das Grundprinzip einer aktiven magnetischen Lagerung ist für einen einzelnen Freiheitsgrad am Modell einer schwebenden Kugel der Abbildung 1 nachzuempfinden, vgl. auch [Gronek 2011].

Charakterisierend, und damit auch wissenschaftlich anspruchsvoll, sind u.a. die Abhängigkeiten zwischen geometrischen,

elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Aktoren. Regelungstechnisch stellen Nichtlinearitäten im System besondere Herausforderungen dar. Die hier aufgeführten Gründe sind auch bisher noch die Hemmnis eines breiten Einsatzfeldes dieser besonderen Technologie, da sie einer wälzlagerähnlichen Katalogisierung und Serientauglichkeit entgegenstehen.

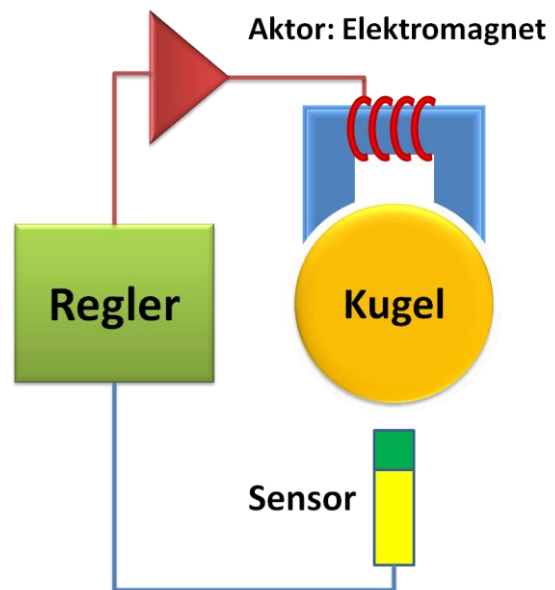
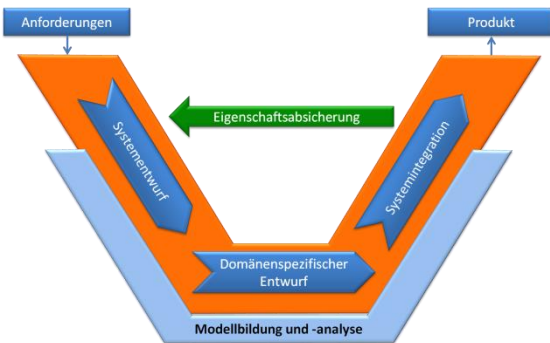


Abbildung 1: Magnetlagermodell „schwebende Kugel“

Der Entwurfsprozess von aktiven Magnetlagern sollte sich, wie der von anderen mechatronischen Systemen auch, unbedingt nach der in [VDI 2206:2004] beschriebenen Methodik richten. Das Vorgehen wird dort nach dem V-Modell entsprechend der Abbildung 2 vollzogen.

Ausgangspunkt für die Entwicklungsaufgabe sind die **Anforderungen** an das spätere Produkt, die aktive magnetische Lagerung, welche ein Teilsystem eines spezifischen Gesamtsystems ist. Auf die Klassifizierung und Analyse von Anforderungen wird im Abschnitt 3 weiter eingegangen.



**Abbildung 2: V-Modell nach [VDI 2206:2004]**

Im Ablauf des methodischen Vorgehens nach dem V-Modell folgt der **Systementwurf**. In diesem Entwicklungsschritt wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept festgelegt, welches bereits die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zu entwickelnden Produktes beschreibt. Als Domäne bezeichnet die [VDI 2206:2004] eine der drei wissenschaftlichen Disziplinen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informationstechnik. Die Hauptaufgabe des Systementwurfes ist es jedoch, die Gesamtfunktion des zu entwickelnden Produktes in einzelne Teilfunktionen zu untergliedern. Für diese Aufgabe ist eine Funktionsanalyse durchzuführen, welche auch Schnittstelle zur Risikoanalyse ist, vgl. Abschnitt 5.2 Die FMEA.

Am bereits verwendeten Beispiel der aktiven Magnetlagerung sei die Teilfunktion „Bestimmung des Luftspaltes im Lagerbereich“ genannt. Zur Erfüllung dieser Teilfunktion sind diverse messtechnische Lösungen möglich. Die Auswahl und Dimensionierung erfolgt im nächsten Schritt des V-Modells, dem **domänenspezifischen Entwurf**.

Die **Systemintegration** fasst die Ergebnisse der fachspezifischen Entwürfe zu einem Gesamtsystem zusammen. Hiernach gilt

es, das Zusammenwirken der einzelnen Bausteine im Gesamtsystem zu untersuchen.

Die **Eigenschaftsabsicherung** bedient sich diverser Methoden zur Verifikation und Validierung über den gesamten Entwurfsfortschritt hinweg. Es wird als qualitätssichernde Maßnahme – wenn auch entwicklerseitig nicht so benannt – dahingehend zur Überprüfung genutzt, dass die tatsächlichen Systemeigenschaften mit den gewünschten übereinstimmen.

Im Qualitätsmanagement wird das Ergebnis eines Prozesses, welcher in einer Abfolge von Tätigkeiten seine Eingaben verarbeitet, als **Produkt** bezeichnet, vgl. [ISO 9000:2005]. Dies ist im V-Modell formal identisch, da der Durchlauf der oben genannten Abfolge von Entwicklungstätigkeiten als Entwurfs- respektive Entwicklungsprozess dargestellt ist.

Das Vorgehensmodell ist mit diesen einzelnen Teilschrittbeschreibungen hinreichend festgelegt. Weitergehend weist die [VDI 2206:2004] auf die CAE-Werkzeuge hin, die beginnend beim Systementwurf, über die domänenspezifischen Entwicklungstätigkeiten bis hin zur Systemintegration den Entwickler bei seinen Aufgaben unterstützen. Dies ist in der **Modellbildung und Modellanalyse** zusammengefasst. Die Modellbildung im Entwurfsprozess aktiver Magnetlager wird entsprechend [Gronek 2011] und [VDI 2206:2004] neben anderen eingesetzt um:

- Geometrische Modelle des Rotorsystems und der Rotorkomponenten der Magnetlagerung zu generieren,

- Topologische Modelle (Anordnung der mechanischen Komponenten) der Lagereinheiten gemäß einsatzspezifischer Restriktionen der Maschine/Anwendung zu erstellen
- Prozessmodelle der Betriebs- und Belastungsfälle aufzustellen, und
- FE-Modelle der Statoren für
  - Magnetfeldsimulationen und
  - Festigkeitsnachweise zu erzeugen.

All diese Modelle erzeugen wiederum die Eingangsdaten für Simulationsberechnungen des dynamischen Verhaltens der magnetgelagerten Rotorsysteme.

### 3 Anforderungsanalyse

#### 3.1 Systemtechnische Anforderungsanalyse

In der Entwurfsphase von mechatronischen Systemen werden die Anforderungen an das zu entwickelnde mechatronische Produkt zusammengetragen, klassifiziert und analysiert. Eine mögliche Klassifikation kann sein:

- mechanische Anforderungen,
- elektrische- /elektronische Anforderungen,
- informationstechnische Anforderungen.

Die Klassifikation kann aber auch viel stärker in den Detaillierungsgrad hinein stattfinden. Die Anforderungsanalyse hat unter systemtechnischer Betrachtung als Ergebnis eine funktionale Beschreibung des Systems [Masing 2007]. Das heißt, die Funktionen welche das System ausführen soll

sind festgelegt, ebenso die Wirkstrukturen, Abhängigkeiten und Verbindungen, vgl. auch [VDI 2206:2004].

#### 3.2 Anforderungen vom Anwender, der eigenen Organisation und Dritter

Der allgemeinere Ansatz der Anforderungsanalyse geht über den Aspekt der technischen Parameter hinaus. Wie einleitend erwähnt, wird in der [ISO 9001:2008] explizit die Ermittlung der Kundenanforderungen an das Produkt gefordert.

Grundlegend sind Anforderungen von drei Anforderungsquellen zu berücksichtigen, was die Abbildung 3 sinnbildlich verdeutlicht.

Die **Anforderungen vom Kunden**, bzw. Anwender, sind zunächst die ausschlaggebenden. Im realen Geschäftsleben stellt sich jedoch die Anforderungsanalyse an dieser Stelle meist problematisch dar, was auch in [Linß 2005] bestätigt wird. In vielen Fällen sind die Anforderungen an das Produkt unbekannt oder unpräzise spezifiziert. Mit als Gründe sind hierfür speziell in Bezug auf hochkomplexe technische Systeme die fehlende Fachkenntnis der vertragsverhandelnden Beteiligten aufzuführen, jedoch nicht vorzuwerfen.

**Externe Anforderungen Dritter** können durch Gesetzgebung und Gesellschaft gestellt sein. Es liegt in der Verantwortung der mit der Entwicklung beauftragten Organisation, diese Anforderungen zu berücksichtigen und ggf. zunächst zu recherchieren, sofern der Auftraggeber auf solche Anforderungen nicht verwiesen hat.

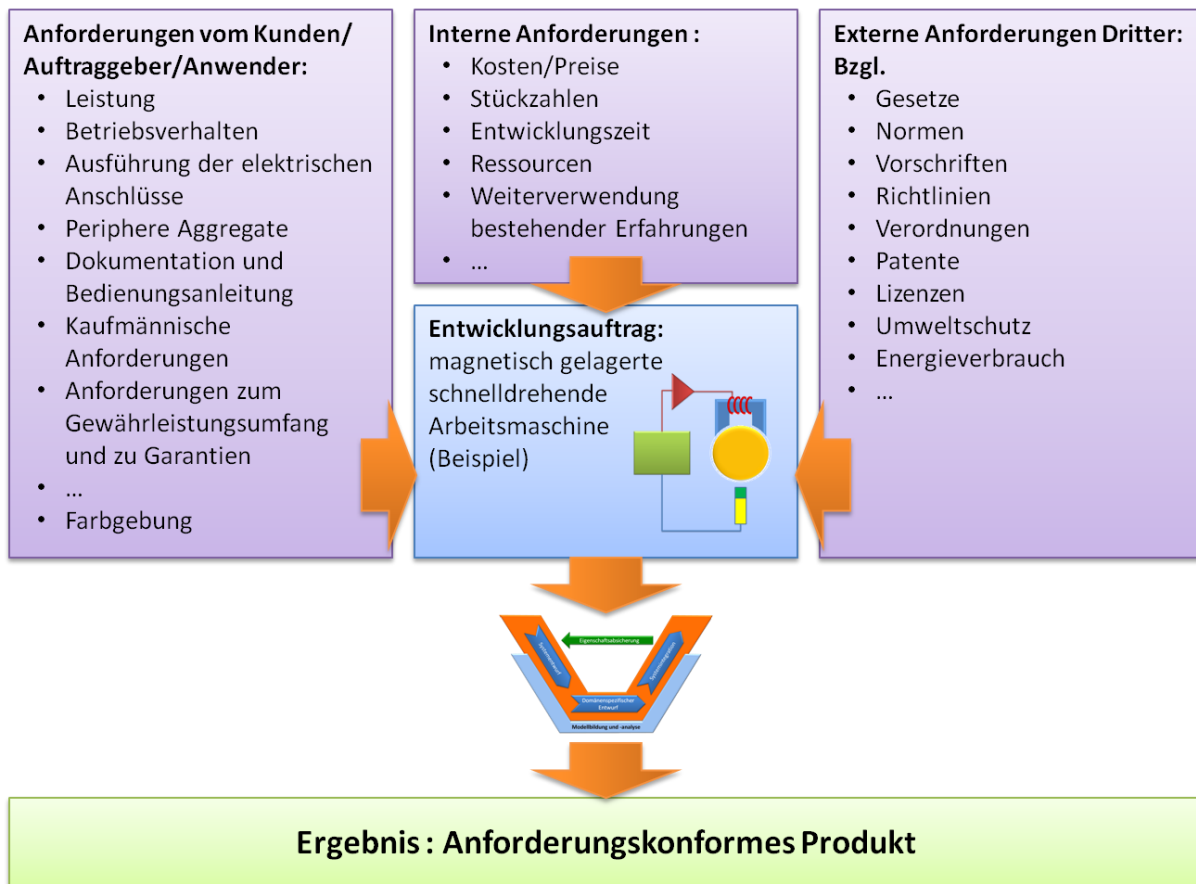


Abbildung 3: Anforderungen als Eingabe in den Entwicklungsprozess

Die **internen Anforderungen** der produktentwickelnden Organisation selbst sind meist vorrangig ökonomischer Natur. Entsprechend dem Stand der Technik und den eigenen Erfahrungen sollten die Ergebnisse früherer Entwicklungen, soweit möglich, in den neuen Entwurfsprozess mit einfließen, vgl. [VDI 2206:2004].

Entwickelt ein Unternehmen ein neues Produkt aus eigenem Engagement heraus, so erfolgt die Ermittlung der Anforderungen zusätzlich durch Marktbeobachtungen, Trendanalysen und Benchmarking [Linß 2005].

Die Summe aller Anforderungen wird im Lastenheft festgehalten. Voraussetzung für dessen Erstellung sind bei der Anforderungs-

ungsanalyse zum Einsatz kommende qualitätssichernde Maßnahmen [Linß 2005].

#### 4 Qualitätsplanung

Die Qualitätsplanung ist ein wesentliches Element des Qualitätsmanagements. Sie dient der strategischen Vermeidung von Fehlern in der Entwicklung, und damit am späteren Produkt, aber auch in der Planung der Produktionsprozesse [Masing 2007]. Zeitlich ist der Beginn der Qualitätsplanung mit Start des Entwurfsprozesses anzusetzen. In Ihrem Umfang stehen zahlreiche Methoden und Werkzeuge mit diversen Zielen zur Verfügung. Diese sind beispielsweise zur strukturierten Analyse der Anforderungen an das zu entwickelnde

de Produkt, vgl. Abschnitt 3, wie es mit der **Quality Function Deployment** (QFD) Methodik der Fall ist. Diese vier Phasen umfassende Methodik ist u.a. in [Linß 2005] und auch in [Kaminske 2008] ausführlich beschrieben. Die Phasen sind:

- Phase I: Produktplanung
- Phase II: Komponentenplanung
- Phase III: Prozessplanung
- Phase IV: Produktionsplanung

Abgrenzend auf die Entwurfsphase magnetgelagerter Systeme sei nur zur Produktplanung erwähnt, dass hierin die kritischen Qualitätsmerkmale (Critical To Quality, CTQ) identifiziert werden (WIE-Kriterien), sowie die dazugehörigen Werte (Zielgrößen) definiert. Die oben erwähnten Herausforderungen zur Bereitstellung der konkretisierten Anforderungen werden mit Verweis auf weitere Literatur in [Linß 2005] als Phase 0 der QFD bezeichnet.

Weitere Methoden der Qualitätsplanung sind beispielsweise die **Advanced Product Quality Planning and Control Plan** (APQP) und die **Prüfplanung**, welche mit Verweis auf die Fachliteratur bzw. DIN-Norm hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt seien. Eine weitere Vertiefung soll hingegen den Methoden zur Risikoreduzierung gelten, da diese wiederum einen rückführenden Einfluss auf die zuvor genannten Methoden haben.

## 5 Methoden zur Risikoreduzierung

### 5.1 Übersicht

Die Fehlerbaumanalyse (**Fault Tree Analysis**, FTA) ist eine der gebräuchlichsten Risi-

koanalysen. Sie ist in der DIN 25424-1 in der Ausgabe von 1981 [Beuth 2013] aktuell. Zweck der FTA ist die Ermittlung unerwünschter Ereignisse auf Grund von Komponenten- oder Baugruppenausfällen. Grundlage sind die logischen Verknüpfungen der Systemelemente, die graphisch in einer Baumstruktur abgebildet werden, vgl. u.a. [VDA 4:2010].

Die **SWOT-Analyse** (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats) betrachtet die eigenen Stärken und Schwächen, sowie die Chancen und Risiken einer Unternehmung bzw. eines zu entwickelnden Produktes. Im Ergebnis wird der Handlungsbedarf und die strategische Ausrichtung festgehalten, vgl. u.a. [VDA 4:2010].

Die in der Automobilbranche am weitesten verbreitete Methodik ist heutzutage die **Fehler- Möglichkeits- und Einfluss-Analyse** (FMEA). Sie wird gemäß VDA nach Arten unterschieden in [Werdich 2013]:

- Produkt-FMEA – Konzept, System, Design, Maschinen
- Prozess-FMEA – Montage, Fertigung, Logistik

Die FMEA verfolgt das Ziel, das Risiko durch Fehler am Produkt oder im Produktionsprozess auf ein Minimum respektive unter ein definiertes Grenzkrisiko zu senken. Die FMEA folgt hierbei fünf Schritten, die am Beispiel der magnetischen Lagerung angedeutet werden sollen.

### 5.2 Die FMEA im Entwurfsprozess magnetgelagerter Systeme

Im 1. Schritt wird eine **Strukturanalyse** durchgeführt. Hierzu eignet sich im Falle der Produkt-FMEA die Darstellung in Form

von Blockdiagrammen oder Strukturbäumen. Die Werkzeuge der Entwurfsmethodik, vgl. [VDI 2206:2004] sind also ähnlich oder direkt anwendbar. Dem Beispiel wird hier das Modell aus Abbildung 1 dieses Beitrages zugrundegelegt.

Der 2. Schritt ist die **Funktionsanalyse**, welche Funktionen und Merkmale aller betrachteten Elemente erfasst. Die Funktion des Magnetlagers kann aus [Gronek 2011] beschrieben werden:

Positionierung des Rotors an einer geforderten Stelle innerhalb eines vorgegebenen Bereiches unter Beherrschung äußerer und innerer Belastungen (bis zu einer geforderten Grenze) für den spezifizierten Einsatzfall (Betriebsbedingungen).

Teilfunktionen der Magnetlagerung

- Bestimmung des Luftspaltes im Lagerbereich/der Rotorposition
- Bestimmung äußerer und innerer Lasten
- Erzeugung der erforderlichen Kräfte zur Positionierung (Aktuator)
- Ansteuerung des Aktuators
- Bereitstellung der erforderlichen Hilfsenergie
- Mechanische Grundstruktur
- Vorgabe der Sollposition
- Regelung der Position

Im 3. Schritt werden die möglichen **Fehler analysiert**. Diese ergeben sich beispielsweise aus der Nichterfüllung oder nur teilweisen Erfüllung der zuvor erarbeiteten Funktionen. Zum Beispiel kann der mögliche Fehler *„Messwert Luftspalt um Betrag X abweichend gegenüber realem Luftspalt“* die Fehlerursache *„Sensor falsch*

*justiert“* haben. Als Folgefehler kann *„Kugel schwebt nicht“* eintreten.

Daher ist es wichtig, dass im 4. Schritt, der **Maßnahmenanalyse**, das Risiko durch drei voneinander unabhängige Faktoren bewertet wird:

- Bedeutung
- Auftretenswahrscheinlichkeit
- Entdeckungswahrscheinlichkeit

Die Bewertung erfolgt dabei gemeinsam durch das an der FMEA beteiligte Team.

Der 5. und letzte Schritt ist die **Optimierung**, bei der je nach Risikoeinstufung über weitere Maßnahmen entschieden werden muss [Werdich 2013].

Misst man dem Fehler *„Messwert Luftspalt um Betrag X abweichend gegenüber realem Luftspalt“* eine hohe Bedeutung bei, so ist dieser Faktor je nach Bewertungskatalog bspw. mit  $B=8$  anzusetzen. Schätzt man des Weiteren die Auftretenswahrscheinlichkeit als sehr Wahrscheinlich ( $A=7$ ) ein, bei einer günstigen Entdeckungswahrscheinlichkeit ( $E=3$ ), dann erhält man eine Risikoprioritätszahl von  $RPZ=168$ . Diese allein ist jedoch nicht als Grundlage für weitere Gegenmaßnahmen geeignet [VDA 4:2010]. Eine sich derzeit etablierende Gesamtbewertungsmethode ist der Ampelfaktor nach [Werdich 2013], auf den an dieser Stelle hingewiesen sei. Im Ergebnis der FMEA für den betrachteten potentiellen Fehler ist als Maßnahme eine Kalibrierung und Justierung der Luftspaltsensoren vor Inbetriebnahme des magnetgelagerten Systems vorzusehen.

Für die definierten Aufgaben und Maßnahmen aus der FMEA heraus sind im Weiteren Verantwortlichkeiten und Abschlussstermin verbindlich festzulegen.

## 6 Zusammenfassung

Mit der Qualitätsplanung als Element des Qualitätsmanagements ist bereits in der Entwurfsphase technischer Produkte zu beginnen. Mit ihren zahlreichen Methoden unterstützt sie den technologischen Entwicklungsablauf gemäß der Methodik zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Mögliche Risiken können somit früh erkannt und Gegenmaßnahmen definiert werden, die schon in der Produktentwicklung, aber auch in der Entwicklung des späteren Fertigungsablaufes mit einfließen.

Durch eine systematische Nutzung der hier vorgestellten Methoden können Fehler schon frühzeitig erkannt und vermieden werden. Gerade in Bezug auf Sonderentwicklungen wie dem Magnetlager und den für den Einsatzfall geltenden Bedingungen sind die Risiken unter sicherheitsrelevanten Aspekten sehr detailliert zu untersuchen.

### Quellen:

**[Beuth 2013]:** Beuth Verlag GmbH: <http://www.beuth.de/de/>, Internetauftritt der Beuth Verlag GmbH, Berlin 2013, Recherchestand: 09.07.2013

**[Gronek 2011]:** Gronek, M.: Entwicklung der Methodik zur Auslegung aktiver Magnetlager, Fachvortrag, Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meß-

technik der Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau 2011

**[ISO 9000:2005]:** Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 9000, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, Deutsche Norm, Berlin 2005

**[ISO 9001:2008]:** Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 9001, Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen, Deutsche Norm, Berlin 2008

**[Kaminske 2008]:** Kaminske, G. F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008

**[Linß 2005]:** Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure, 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München Wien, 2005

**[Masing 2007]:** Pfeifer, T. (Hrsg.); Schmitt, R. (Hrsg.): Masing – Handbuch Qualitätsmanagement, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2007

**[VDA 4:2010]:** Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA); Qualitätsmanagement Center (QMC): VDA-Band 4, Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, Ringbuch Auflage 2009, Berlin 2010

**[VDI 2206:2004]:** Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI-Richtlinie, Düsseldorf 2004

**[Werdich 2013]:** Werdich, M.: Effizientes Risiko-Management mittels der modernen FMEA, Fachvortrag, Babtec-Q.Fokus: FMEA / Chemnitz, 10.07.2013