

Technische Universität München
Lehrstuhl für Technische Elektronik
Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik

Qualitätsmanagement im universitären Umfeld am Beispiel eines Halbleiter-Labors

Linda Maria Christine Nowack

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Walter Hansch
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Schwesinger

Die Dissertation wurde am 07.01.2008 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik am 08.05.2008 angenommen.

Zusammenfassung

Qualitätsmanagement ist ein zentraler Bestandteil industrieller Produktion und wird mittlerweile in praktisch allen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt. Dazu zählen nicht nur die Automobilindustrie, sondern auch Softwarehersteller, Textilunternehmen und die Halbleiterindustrie.

Im universitären Umfeld ist die Anwendung von Qualitätsmanagement-Methoden bisher noch nicht etabliert, da sich die Voraussetzungen im Vergleich zur Industrie deutlich unterscheiden. Im universitären Umfeld existieren lediglich zwei Produkte: Forschung und Lehre, die nicht in „Serienproduktion“ hergestellt werden können. Forschung und Lehre werden von ständig wechselndem Personal getragen, d.h. es wird ständig Einarbeitungszeit benötigt. Doktoranden wechseln nach drei bis sechs Jahren, Studierende nach drei bis sechs Monaten. Ein weiterer Unterschied zur Industrie ist, dass keine klassischen Kunden existieren. Im universitären Umfeld sind Kunden meist abstrakte Interessen wie Wissensvermittlung oder neue Forschungsergebnisse, die erreicht werden sollen. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Evaluierung, ob und in welchem Umfang Qualitätsmanagement-Methoden in einem universitären Halbleiterlabor zur Verbesserung der Produkte Lehre und Forschung und zu Wissenserhaltung und -transfer sinnvoll eingesetzt werden können.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen und Voraussetzungen beleuchtet, die für die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems im universitären Labor gelten. Im Anschluss daran werden Methoden vorgestellt, die zur Anwendung geeignet sind, deren Umsetzung und Ergebnisse präsentiert sowie das implementierte System zum Wissenstransfer vorgestellt.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass für ein universitäres Halbleiterlabor unter Berücksichtigung seiner Eigenheiten ein Qualitätsmanagementsystem eingeführt werden kann und sollte, da eine nachhaltige Verbesserung der wissenschaftlichen Arbeiten damit erreicht werden kann.

Dies wird vor allem durch den Einsatz von Kontroll-Methoden wie der Statistischen Prozesskontrolle, also Qualitätsregelkarten und Fähigkeitsuntersuchungen, erreicht. Aber auch Methoden, die zur Fehlervermeidung und zu besserer und engerer Teamarbeit führen, sind ein wichtiges Hilfsmittel.

Für Wissenserhaltung und -transfer bei stark fluktuierendem Personal wurde ein flexibles System basierend auf dem Content Management System *plone* eingeführt, das sowohl Dokumentenmanagement zur Verfügung stellt, als auch kreatives Arbeiten ermöglicht.

Zusätzlich wird eine Verbesserung der Lehre durch ein Qualitätsmanagementsystem erreicht. Bearbeitungszeiten für Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten werden verkürzt und Studierende lernen neue Methoden aus Qualitäts- und Wissensmanagement. Durch diese Verbesserung der Lehre wird für die Studierenden ein Vorsprung für spätere Tätigkeiten in der Wirtschaft geschaffen.

Abstract

Quality Management is an integral part of industrial production and is adopted in almost every business area. This includes not only the automotive industry but also software producers, the textile industry and the semiconductor industry.

In university semiconductor laboratories quality management methods are not yet established because the prerequisites are clearly different compared with industry. At a university only two products exist: education and research, which cannot be mass produced. Constantly changing personnel is in charge for education and research, i.e. a period of vocational adjustment is permanently needed. Doctoral candidates leave after three to six years, student after three to six months. Another difference to industry is that no classical customers exist. At a university customers are mostly abstract interests like knowledge transfer or new research results. On this account this thesis deals with the evaluation how and in which complexity quality management methods for improvement in education and research and for knowledge conservation and transfer can be applied reasonably in a university semiconductor laboratory.

The first part of the thesis treats with fundamentals and preconditions which are necessary for the implementation of a quality management system at a university laboratory. Also methods for appliance are introduced, the implementation as well as the results and the implemented system for knowledge transfer are presented.

Altogether it was shown that a quality management system can and should be established at a university semiconductor laboratory. By taking into account its peculiarities research work can be strongly improved by such a system.

This improvement is mainly reached by applying control methods such as statistical process control, which is quality control charts and capability analyzes. Also methods which lead to closer and better team work and to prevention of mistakes are an essential tool.

Having strongly fluctuating personnel a flexible system was implemented based on the content management system *plone* for knowledge conservation and transfer. This system provides document management as well as the possibility for creative work.

In addition a quality management system improves teaching. The time required for bachelor and master theses is shortened and students learn quality methods as well as knowledge management methods. This improvement of teaching creates an advantage for the students in their later work in industry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Qualitätsmanagement	4
2.1	Grundlagen	4
2.2	Historie	5
2.3	Normierung nach DIN EN ISO 9000ff	9
2.4	Qualitäts-Methoden nach PDCA-Kreis	11
2.5	Dokumentation	14
3	Qualitätsmanagement für das Halbleiterlabor des HPT	15
3.1	Das Halbleiter-Labor am HPT	15
3.2	Organisatorische Voraussetzungen	19
3.3	QM-Methoden	23
3.4	Ungeeignete Methoden	25
3.4.1	QFD	25
3.4.2	Jidoka	26
3.4.3	Andon	27
3.4.4	3 Mu - Muda, Mura, Muri	27
3.4.5	Mitarbeiterzufriedenheit	28
3.4.6	Audit	29
3.4.7	Benchmarking	29
3.4.8	FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse	30
3.4.9	Six-Sigma	31
4	Qualitätsmethoden am HPT	32
4.1	Lasten-/Pflichtenheft	32
4.1.1	Grundsätzliches	32
4.1.2	Umsetzung am HPT	32
4.2	Prüfplanung	33
4.2.1	Grundsätzliches	33
4.2.2	Prüfplanung	34
4.2.3	Prüfmittelauswahl	35
4.2.4	Umsetzung am HPT	36
4.3	MFU/PFU	37
4.3.1	Grundsätzliches	37
4.3.1.1	MFU - Maschinenfähigkeitsuntersuchung	38
4.3.1.2	PFU - Prozessfähigkeitsuntersuchung	39
4.3.1.3	Durchführung von MFU und PFU	39
4.3.1.4	Zusammenfassung MFU und PFU	41
4.3.2	Umsetzung von MFU und PFU am HPT	42

4.4	SPC	43
4.4.1	Grundlagen	43
4.4.2	Arten von QRK für quantitative Merkmale	46
4.4.3	Bewertung von QRK	49
4.4.4	Vorlaufuntersuchung zur Schätzung von μ und σ	50
4.4.5	Umsetzung von QRK am HPT	51
4.4.5.1	Vorüberlegungen	51
4.4.5.2	Erstellung von QRK am Beispiel ATV-Oxid Trockenoxid	54
4.4.5.3	Vorlaufuntersuchung zur Schätzung von μ und σ	54
4.4.5.4	Berechnung der Fähigkeitskennzahlen C_m und C_p	60
4.4.5.5	Berechnung der Mittellinie und der Grenzen	62
4.4.5.6	Führen der QRK	62
4.4.6	Fazit Statistische Prozesskontrolle am HPT	63
4.5	DoE	65
4.5.1	Grundlagen	65
4.5.2	D-Optimale Versuchspläne	68
4.5.3	Umsetzung am HPT	69
4.5.4	Fazit DoE am HPT	72
4.6	Methoden zur Fehlervermeidung	74
4.6.1	Fehlermanagement	74
4.6.2	5 S - Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke	76
4.6.3	Poka Yoke	77
4.6.4	8D - Methode	78
4.7	Qualitätszirkel	80
4.8	Ishikawa	81
4.9	Vorschlagswesen	84
4.10	Kaizen	85
5	Wissensmanagement	99
5.1	Grundlagen	99
5.2	Umsetzung am HPT	99
5.2.1	Ausgangssituation	99
5.2.2	Software	100
5.2.3	Implementierung, Struktur und Aufbau der WB	103
5.3	Fazit	109
6	Resumé Qualitätsmanagement am HPT	111
7	Ausblick	113
A	Ablaufplan für MOSFET Standardprozess	114

B	Beispiele zu Laufzetteln: MOSFET Prozess-Schritt 8.8	116
C	Qualitätsregelkarten für Geräte am HPT - Beispiele	118
D	Test auf Normalverteilung Scheibe 2	120
E	Berechnung der Einsatzspannung	121
F	Konstanten für Mittellinie und Grenzen	122
G	Reinraumklassen nach ISO und US-Standard	124
H	Datentabellen Verbesserung MOSFETs	125
	H.1 Ausbeute (Yield)	125
	H.2 Einsatzspannung V_{th}	126
	H.3 Dekaden I_{on}/I_{off}	127
I	Statistik Zeitverkürzung von Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten	128
J	Zusätzliche Komponenten für die WB	129

1 Einleitung

Qualität wurde schon im Altertum z.B. von Baumeistern abverlangt. Seitdem hat sich der Begriff verändert, wurde erweitert, konkretisiert und auf neue Bereiche angewendet. Aber der Grundgedanke bleibt bis heute erhalten. Qualität bedeutet, dass Arbeit geleistet wird, die mit möglichst wenigen Fehlern in möglichst kurzer Zeit und mit möglichst geringem Kostenaufwand ein Ergebnis liefert, mit dem der Auftraggeber zufrieden ist. Der Anspruch des Auftraggebers muss dabei nicht immer gleich sein. Es kann z.B. eine lange Beständigkeit des Produkts gefordert werden, fehlerfreies Funktionieren oder eine hohe Reproduzierbarkeit.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Begriff Qualität genauer definiert und Methoden entwickelt, um vor allem in der Automobilindustrie die Produktionskosten zu senken. Die Methoden wurden immer weiter entwickelt und bekamen immer neue Bezeichnungen. Begonnen wurde mit den Begriffen Qualitätskontrolle, welche dann auf Qualitätssteuerung, -sicherung, -management bis auf Total Quality Management TQM ab ungefähr dem Jahr 2000 erweitert wurden.

Qualitätsmanagement (QM) ist für die Industrie zu einer unersetzlichen Methode geworden, um dem herrschenden Konkurrenzdruck Stand zu halten. Zu Beginn des QM profitierte vor allem die Automobilindustrie von den neuen Methoden und Gedanken. Im Laufe der Zeit haben auch andere Industriezweige das QM als hilfreiche Methode entdeckt. Mittlerweile gibt es praktisch keinen Industriezweig mehr, der nicht zumindest einige der umfangreichen Methoden, die das QM bereitstellt, nutzt.

Die starke Nachfrage nach einem standardisierten QM wurde schließlich in den 1980er Jahren erfüllt. Es wurden Institute gegründet, die sich ausschließlich mit der Normung, also Standardisierung, von QM-Methoden beschäftigen. Diese Institute gaben Richtlinien für einzelne Länder und weltweite Normen heraus. Das Hauptaugenmerk lag und liegt zwar immer noch auf den Bedürfnissen der Automobilindustrie, aber ein Großteil der Methoden kann und wird auch in anderen Bereichen angewendet.

QM hat sich in den asiatischen Ländern, vor allem in Japan, aufgrund von Ressourcenknappheit und Platzmangel entwickelt und sehr schnell durchgesetzt. In Europa wurde QM sehr zögerlich eingeführt und zählt erst seit etwa 10 Jahren zu dem Standard-Handwerkszeug der Industrie.

Ziel des QM ist es, Kosten in der Produktion zu senken und Produkte zu verbessern. Eine Universität bietet zwei Produkte an: Forschung und Lehre. Die Kunden einer Universität sind Studierende, die von Forschung und Lehre profitieren wollen sowie Geldgeber, die vor allem an Forschung interessiert sind sowie Industrieunternehmen, die hervorragend ausgebildete Nachwuchskräfte suchen und somit an der Qualität von Lehre und Forschung interessiert sind. Auch die Professoren achten auf Qualität von Lehre und Forschung, da sie zum einen in der wissenschaftlichen Welt ihren Ruf auf Forschungsergebnissen aufbauen und zum anderen vom Staat für die Ausbildung von Studierenden, also für die Lehre, bezahlt werden. Es ist zu erkennen, dass Qualität von Lehre und Forschung an Universitäten sehr wichtig ist. QM

ist allerdings in vielen Bereichen noch nicht vertreten bzw. wird erst langsam als wichtig empfunden, da an einer Universität kein so starker Konkurrenz- und damit Preisdruck wie in Industrieunternehmen herrscht. Im Bereich des Maschinenbau wird QM traditionell gelehrt und umgesetzt, da die Anfänge des QM in diesem Bereich liegen, d.h. der Produktionstechnik. Im Bereich der Elektrotechnik stehen an verschiedenen Lehrstühlen Labore zur Verfügung, die sich z.B. mit der Halbleitertechnologie beschäftigen. Diese Technologie ist hoch komplex und sehr schnelllebig, weshalb im industriellen Bereich ein QM mit sehr strengen Regeln herrscht. Im universitären, also Forschungs-Bereich werden bisher kaum Methoden des QM eingesetzt. Auch wurde bisher kein Katalog an Methoden aus dem umfangreichen Sortiment des QM bereitgestellt, nach dem sich Forschungslabore richten könnten. Aus diesem Grund beschäftigt sich am Lehrstuhl für Technische Elektronik (LTE) im Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik (HPT) ein Teil der Forschungsarbeit mit dieser Problematik.

Ziel dieser Arbeit ist es zu evaluieren, ob und wie ein Qualitätsmanagementsystem QMS in einem universitären Reinraum eingeführt und etabliert werden kann. Es soll untersucht werden, welche Methoden zur Verfügung stehen und eingesetzt werden können. Außerdem soll beurteilt werden, welchen Beitrag die ausgewählten Methoden zur Verbesserung der Arbeitsumgebung und der Ergebnisse der technologischen Arbeiten liefern.

Aufgrund der sehr hohen Mitarbeiterfluktuation im universitären Bereich soll eine Standardisierung von Prozessen und Messtechniken erfolgen, so dass ein reibungsloser Übergang von einer Doktorandengeneration zur nächsten stattfinden kann und somit weniger Einarbeitungszeit nötig ist.

Als erster Schritt soll dabei eine Beurteilung erfolgen, welche QM-Methoden im universitären Bereich anwendbar sind bzw. benötigt werden. Der Schwerpunkt sollte dabei auf messbaren Methoden liegen. Aber auch Methoden, welche eine Verbesserung der Arbeitsumgebung erzielen, sollen evaluiert werden.

Zusätzlich wird die Entwicklung eines Systems angestrebt, das die Möglichkeit bietet, Informationen zu speichern, problemlos wiederzufinden und in jedem Bereich des HPT zur Verfügung zu stellen. Das heißt, dieses System dient zur Dokumentation der Ergebnisse aus dem QMS und soll von den Mitarbeitern zur Dokumentation von Informationen wie Bedienungsanleitungen, Prozessen, Spezialwissen etc. verwendet werden. Dieses Wissensmanagementsystem soll von der Konzeption bis zur täglichen Anwendung aufgebaut und etabliert werden.

Die Erwartungen an ein QMS am HPT sind:

- Verbesserung der Qualität der Produkte
- Kürzere Einarbeitungszeiten durch eine umfangreichere Dokumentation
- Bereitstellung eines Gesamt-Systems zur Verbesserung der wissenschaftlichen Arbeit
- Reibungsloser Wissenstransfer zwischen Mitarbeitergenerationen
- Verkürzung von Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten

Die Einführung eines QMS setzt voraus, dass die historische Entwicklung des QM bekannt ist. Das bedeutet, dass man sich bewusst macht, an welchem Punkt der Entwicklung des QM der Neueinstieg erfolgt. Zusätzlich ist es wichtig, dass erforderliche Normen und deren Sinn bekannt sind sowie ein Überblick über die Methoden des QM gegeben ist. Nach der Auseinandersetzung mit diesen Punkten, die in Kapitel 2 betrachtet werden, ist es wichtig, sich einen Überblick über die Organisationsstruktur des HPT zu verschaffen (siehe Kapitel 3.2), um später beurteilen zu können, welche Methoden Anwendung finden können (siehe Kapitel 3.3). In Kapitel 3.4 werden als erstes die Methoden beleuchtet, die für eine Anwendung am HPT nicht oder nur sehr bedingt sinnvoll erscheinen.

Die Umsetzung der ausgewählten Methoden wird in Kapitel 4 beschrieben. Hier erfolgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Methoden, die Umsetzung und erzielten Ergebnisse für den HPT. Eine Zusammenfassung dieses Kapitels erfolgt schließlich in Kapitel 4.10, in dem allgemeine Verbesserungen dargestellt werden.

Die Beschreibung des Systems zur Dokumentation des QMS (Wissensbasis WB) und zur Speicherung von Informationen gibt Kapitel 5. In Kapitel 5.2.2 wird die Auswahl der Software für das geplante System beschrieben, Kapitel 5.2.3 stellt die Implementierung, Struktur und inhaltliche Gestaltung der Wissensbasis WB kurz dar. Das Fazit (siehe Kapitel 5.3) bietet schließlich eine Zusammenstellung der Ergebnisse sowie die Verbesserungen, die durch die WB erzielt werden konnten.

In Kapitel 6 erfolgt eine Zusammenfassung über die Einführung des QMS sowie über die Einführung des Wissensmanagementsystems am HPT.

2 Qualitätsmanagement

2.1 Grundlagen

Der Gedanke an Qualität besteht bereits seit dem Altertum. Allerdings wurde erst durch die Entwicklung mathematischer Methoden die Möglichkeit geschaffen, statistische Verfahren für komplexere Prozesse und Berechnungen anzuwenden. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Entwicklung des Qualitätsmanagements. Qualitätsmanagement begann etwa um die 1920er Jahre und konzentrierte sich hauptsächlich auf die End-Kontrolle des fertigen Produktes, unterschied also *brauchbar/nicht brauchbar*. In den folgenden Jahren wurden mehr und mehr Methoden entwickelt, Qualität von Produkten, Geräten bis hin zu Prozessen zu kontrollieren, was schließlich im Total Quality Management TQM, das gegen Ende der 1990er Jahre eingeführt wurde, sowie Weiterentwicklungen davon, vorerst endete. Im TQM werden zusätzliche Aspekte wie Umwelt, Recht oder Qualitäts-Kosten berücksichtigt. Auch wird das gesamte Unternehmen in den Qualitäts-Prozess einbezogen, d.h. die Qualitätsverbesserung erfolgt nicht mehr nur in den Produktionsbetrieben sondern auch z.B. in der Verwaltung.

In den folgenden Kapiteln wird ein kurzer Überblick über die Entwicklungsstufen und Vorreiter des QM gegeben und anschließend auf die heute angewendeten Methoden und Regelwerke eingegangen. Abbildung 2 gibt einen zeitlichen Überblick über einige Persönlichkeiten, die QM geprägt haben.

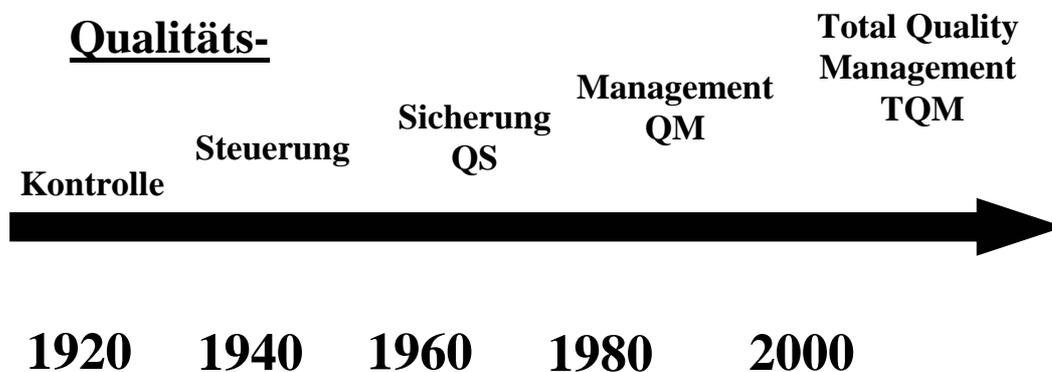


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung des QM



Abbildung 2: Prägende Persönlichkeiten für QM

2.2 Historie

Vom Altertum bis Taylor und Ford - Altertum bis ca. 1915

In Babylon wurde von Hammurapi (1728-1686 v.Chr.) bereits vor mehr als dreieinhalb Jahrtausenden ein Codex aufgestellt, der von seinen Baumeistern qualitativ gute Arbeit abverlangt. Bei niedriger Qualität waren teils sehr drastische Bestrafungen vorgesehen [Lin05]. Der Qualitätsgedanke ist bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts beinahe in jedem Lebensbereich zu finden, wobei der Begriff „Qualität“ erst ab 1900 geprägt wurde, als es statistische Verfahren ermöglichten, Fehler zu erfassen und mathematisch zu behandeln. Diese Entwicklung wurde möglich, da seit dem 18. Jahrhundert Mathematiker wie Poisson und Gauß an Statistik arbeiteten [Zol02]. Ende 1800 begann die „Moderne“ des Qualitätsmanagements, indem 1875 Frederick W. Taylor das Buch „Scientific Management“ veröffentlichte [Tay67]. In diesem stellte er seine Theorie zur Produktionsverbesserung vor, die später als Taylorismus bekannt wurde. Das Prinzip ist, dass eine Produktivitätssteigerung herbeigeführt werden kann, indem eine optimale Prozessfolge gefunden und eine Arbeitsteilung eingeführt wird, d.h. dass sich die Arbeitskräfte immer mehr zu Facharbeitern entwickeln und die Bezahlung erfolgsabhängig ist. Taylor glaubte daran, Management, Arbeit und Unternehmen mit einer rein wissenschaftlichen Herangehensweise (Scientific Management) optimieren zu können, damit soziale Probleme zu lösen und „Wohlstand für Alle“ erreichen zu können.

Als Fordismus wurde die von Henry Ford 1911 eingeführte Fließbandfertigung bezeichnet.

Seine beiden Maximen waren Standardisierung und Quantität. Fordismus basiert auf stark standardisierter Massenproduktion und -konsumierung von Konsumgütern. Mit Hilfe hoch spezialisierter, monofunktionaler Maschinen wird Fließbandfertigung betrieben, durch die eine starke Spezialisierung der Arbeiter und damit starke Abhängigkeit vom Unternehmen angestrebt wird [Mar98]. Der Fordismus beruht nur auf den Entwicklungen des New Deals, also sozialen Sicherungssystemen, lebenslanger Anstellung bei einem Arbeitgeber und einer weitgehenden Vollbeschäftigung.

Eine weitere Triebfeder für die Entwicklung von Methoden zur Produktion qualitativ hochwertiger Produkte sind seit jeher auch Kriege. So sind viele Erfindungen ebenso wie Maßnahmen zur Produktionssteigerung auf den Zwang des Militärs zurückzuführen, besser als die gegnerischen Nationen zu sein und somit den Krieg gewinnen zu können. Dies trifft auch für die Zeit des Ersten und Zweiten Weltkriegs zu, in der viele Erfindungen entstanden sind. Die Zeit nach den Kriegen war meist von einem starken Konsumgütermangel geprägt, was dazu führte, dass die militärischen Erfindungen für Neuerungen im zivilen Bereich verwendet wurden. Dazu wurden Methoden benötigt, qualitativ hochwertige Produkte möglichst günstig und schnell herstellen zu können, was zur Entwicklung des modernen Qualitätsmanagements stark beitrug [Lin05].

Qualitätsregelkarten von Shewhart - ca. 1925

Als Begründer der Industriestatistik und Schlüsselfigur des modernen Qualitätsmanagements muss Walter Andrew Shewhart genannt werden. Die Absicht des Managements der Hawthorne Plant der Western Electric Company in Chicago, möglichst einheitliche und somit zuverlässige Produkte mit Mitteln des gesunden Menschenverstandes herzustellen, schlug fehl. In der Folge wurde Shewhart von den Bell Telephone Laboratories aus New York um Unterstützung gebeten. In seinem Werk „Economic Control of Quality of Manufactured Products“, das 1931 auf dem Markt erschien, forderte Shewhart als erster die Ablösung der individuellen Kontrolle und die Einführung statistischer Verfahren zur Qualitätskontrolle [She80]. Die Erfassung von Fehlern und die anschließende Analyse sind essentiell, um eine Produktion mit möglichst geringem Ausschuss zu gewährleisten. Die von Shewhart entwickelte „Control Chart“, also Qualitätsregelkarte, ermöglichte es, die Fertigung statistisch zu überwachen und frühzeitig Fehlentwicklungen zu erkennen und regelnd einzugreifen [Tim04].

Deming und Juran - ca. 1950er Jahre

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die japanische Qualitätsoffensive mit Deming, Juran und Ishikawa von der amerikanischen Besatzungsmacht ausgelöst, die jegliche Produktion für das Militär verbot, sowie alle großen Konzerne zerschlug. So war Japan gezwungen, das als Land zusätzlich noch über wenig Platz und Ressourcen verfügt, Strategien zu entwickeln, wieder „auf die Beine zu kommen“. Um dies innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne zu erreichen, mussten neue Wege gefunden werden, die sich schließlich zu umfassenden qualitätsverbessernden Methoden entwickelten.

William Edwards Deming war ein Schüler und später auch Kollege von Shewhart. Zusammen veröffentlichten sie das Buch „Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control“ [She87]. Deming erweiterte die Theorie von Shewhart und übertrug die statistischen Verfahren auf Bereiche außerhalb der Produktion [Zol02]. Anfang der 1940er Jahre hielt Deming Seminare über Qualitätsmanagement in den USA. Ende der 1940er Jahre wurde eine japanische Ingenieursgesellschaft (JUSE) auf Deming aufmerksam und lud ihn dazu ein, Seminare für japanische Ingenieure und Manager zu halten. Seine Theorien veranlassten die Industrie zu einem radikalen Umdenken. Deming verlangte kundenorientiertes Handeln der Unternehmen und damit auch des Qualitätsmanagements. Er argumentierte, dass der Mensch die Basis jedes Unternehmens sei und selbst zur Optimierung der Qualität beitrage. Auch ist nach Deming das Management zu 85% an Produktionsfehlern schuld und nicht die Mitarbeiter. Zur Veranschaulichung seiner Theorien und Forderungen hat Deming den so genannten PDCA (Plan-Do-Check-Act)-Plan eingeführt. Dieser Plan wird als Zyklus dargestellt, der weder Ende noch Anfang hat (siehe Kapitel 2.4). Deming stellte zusätzlich einen 14-Punkte-Plan zur Umsetzung seiner Qualitäts-Philosophie auf [Dem00], [Zin98].

Ein weiterer Schüler Shewharts ist Joseph Moses Juran, der als Begründer des Total Quality Managements (TQM, Umfassendes Qualitätsmanagement) angesehen werden kann. Seit den 1950er Jahren hielt Juran Seminare über Qualitätsmanagement in vielen Ländern, darunter auch Japan. Seine Forderung, Qualitätsmanagement als kundenbezogene Managementaufgabe zu definieren und alle Prozesse unter Einbeziehung der Mitarbeiter zu planen wird heute als TQM bezeichnet. Bekannt wurde Juran vor allem durch seine These „Quality is fitness for use“ und der „Juran Trilogy“, welche besagt, dass die kontinuierliche Förderung von Qualität in drei Schritten erfolgt: Qualitätsplanung, Qualitätsregelung und Qualitätsverbesserung [Jur00].

Ishikawa und Taguchi - ca. 1950er bis 1960er Jahre

Die 1960er Jahre wurden von den beiden Japanern Kaoru Ishikawa und Genichi Taguchi geprägt. Ishikawa führt sein Konzept der „Unternehmensweiten Qualitätskontrolle“ (CWQC, Company Wide Quality Control) ein, das die Kundenorientierung in den Vordergrund stellt. Dazu wurden fünf Grundsatzregeln eingeführt [Zol02], [Zin98]:

- Quality first: Qualität muss immer im Vordergrund stehen.
- Qualität heißt „conformance to consumer’s requirements“: Der Kunde definiert die Qualität.
- Einbeziehung aller wichtigen Funktionen: interfunktionales Management erfordert interfunktionale Teams.
- Kontinuierliche Verbesserung: Jeder Zustand kann verbessert werden. Perfektion wird nie erreicht.
- Berücksichtigung des sozialen Systems: Es ist Aufgabe der Führung für ein gutes Arbeitsklima und damit Motivation der Mitarbeiter zu sorgen.

Ishikawa hat durch das Konzept der CWQC einen weiteren Fortschritt im modernen Qualitätsmanagement bewirkt [Ish85], [Ish86].

Ebenfalls in den 1960er Jahren wurde von Taguchi die Methodik des Design of Experiments (DoE) entwickelt [Tag04], [Tag86]. Mit dieser Methodik wird die komplizierte Versuchsplannung mit Hilfe statistischer Methoden vereinfacht (siehe Kapitel 4.5). Taguchi entwickelte auch ein neues Qualitätsverständnis. Qualität wird von Taguchi folgendermaßen beschrieben und als *Quality Loss Function* bezeichnet:

„Die Qualität eines Produktes ist der kleinste Verlust, den ein Produkt nach seiner Auslieferung verursachen kann.“ [Zol02].

Von Crosby zur Normierung - ca. 1960er Jahre bis heute

Der wachsende Konkurrenzdruck zwischen den Unternehmen und der immer globaler werdende Markt zwang die Unternehmen, immer bessere, aber auch kostengünstigere Produkte herzustellen. Dies konnte nur dadurch erreicht werden, dass eine strenge (Qualitäts-)Kontrolle während der Produktion stattfindet und Rahmenbedingungen und Methoden geschaffen werden, besser als andere Unternehmen zu arbeiten. Aus diesem Grund wurde Qualitätsmanagement immer wichtiger und Unternehmen konzentrierten sich immer mehr darauf, Methoden zu entwickeln, die ihnen einen Vorsprung im Wettbewerb verschafften.

Philip B. Crosby wurde für sein Null-Fehler-Programm 1964 vom US-Verteidigungsministerium ausgezeichnet [Cro78], [Cro95]. Die drei Hauptgrundsätze seiner Arbeit sind:

- „The Absolutes of Quality Management“:
 - *Quality has to be defined as conformance to requirements, not as goodness or elegance*: Qualität bedeutet die Erfüllung von Forderungen.
 - *The system for causing quality is prevention, not appraisal*: Qualität wird durch Vorbeugung, nicht durch Prüfung erreicht.
 - *The performance standard must be Zero Defects, not „that’s close enough“*: Der Leistungsstandard ist Null-Fehler.
 - *The measurement of quality is the Price of Nonconformance, not indices*: Qualitätskosten sind identisch mit Kosten der Nichterfüllung von Qualität.

- Das 14-Punkte-Qualitätsprogramm
 - Die 14 Managementregeln dienen dem Ziel, Null-Fehler zu erreichen.

- „5 Steps for Eliminating Nonconformance“
 - Definieren der Situation
 - Beheben des Fehlers
 - Identifizierung der Ursache
 - Korrigierendes Eingreifen
 - Evaluierung und Anschluss finden

Crosby ist der letzte der „klassischen“ Vorreiter des Qualitätsmanagements. In den 1980er Jahren wurde durch das Institut für Normung eine erste Norm zum Qualitätsmanagement veröffentlicht, in der die Theorien sowie Vorschläge und Pläne zur Umsetzung eines QMS zusammengefasst wurden. In Kapitel 2.3 wird eine Übersicht gegeben, was Normierung nach der aktuellsten Norm *ISO 9000ff.* bedeutet und wo sie Anwendung findet.

2.3 Normierung nach DIN EN ISO 9000ff

Ein Unternehmen, das sein Produkt am Markt anbietet, ist starkem Konkurrenzdruck ausgesetzt und muss darauf achten, dass die Qualität des Produktes den Anforderungen der Kunden entspricht. Qualitätsmanagementsysteme QMS werden in Unternehmen eingeführt, um die Einhaltung der Qualitätsanforderungen zu gewährleisten und somit das Vertrauen des Kunden zu erlangen und zu erhalten. Durch die Einführung von QMS werden betriebliche Abläufe transparent, dokumentiert und verbessert. Dies führt dazu, dass das Vertrauen in die Organisation und damit in das Produkt gesteigert wird.

Die ISO 9000ff. Normenreihe ist als Grundlage für den Aufbau und die Zertifizierung von QMS als Zusammenschluss mehrerer unabhängiger Normen 1987 entstanden und eingeführt worden [Lin05]. Normen sind keine Gesetze, sondern von Experten zusammengestellte Mindestanforderungen an Systeme, Produkte oder Prozesse, wobei die ISO 9000ff. Normenreihe speziell für QMS entwickelt wurde.

Normen sind unterteilt in:

- Weltweite Normen (ISO)
- Europäische Normen (EN)
- Nationale Normen (DIN, ÖNorm, BS etc.)
- Branchenspezifische Normen (VDA 6 (Automobil), GMP (Pharma) etc.)
- Unternehmensspezifische Normen (Q101 von Ford, Formel Q von VW etc.)

Die Normenreihe ISO 9000ff. besteht aus vier Teilen und wurde im Dezember 2000 verabschiedet und seitdem kontinuierlich erweitert (siehe auch [Din05], [Din00a], [Din00b], [Din02]):

- ISO 9000: Grundlagen und Begriffe
- ISO 9001: Anforderungen
- ISO 9004: Leitfaden zur Verbesserung
- ISO 19011: Leitfaden für Audits von QM- und/oder UM (Umwelt)-Systemen

Die ISO 9001 definiert eine Mindestanzahl von vier Prozessen, die zum Aufbau eines QMS nötig sind ([Din05], [Din00a], [Din00b], [Din02]):

- Verantwortung der Leitung:
Kundenorientierung, Planung, Verantwortung, Qualitätspolitik
- Management von Ressourcen:
Infrastruktur, Arbeitsumgebung, Informationen, Lieferanten und Partnerschaften, Natürliche und finanzielle Ressourcen
- Produktrealisierung:
Kundenbezogene Prozesse, Entwicklung, Beschaffung, Produktion und Dienstleistungserbringung, Lenkung von Überwachungs- und Messmitteln
- Messung, Analyse, Verbesserung:
Überwachung und Messung, Lenkung fehlerhafter Produkte, Datenanalyse, Verbesserung

Diese Prozesse werden in der ISO 9000 in einem Prozessmodell dargestellt (siehe Abbildung 3). In der ISO 9004 werden schließlich Anleitungen gegeben, welche die ISO 9001 ergänzen. Diese Norm kann als „Bedienungsanleitung“ für den Aufbau eines umfassenden Qualitätsmanagementsystems herangezogen werden.

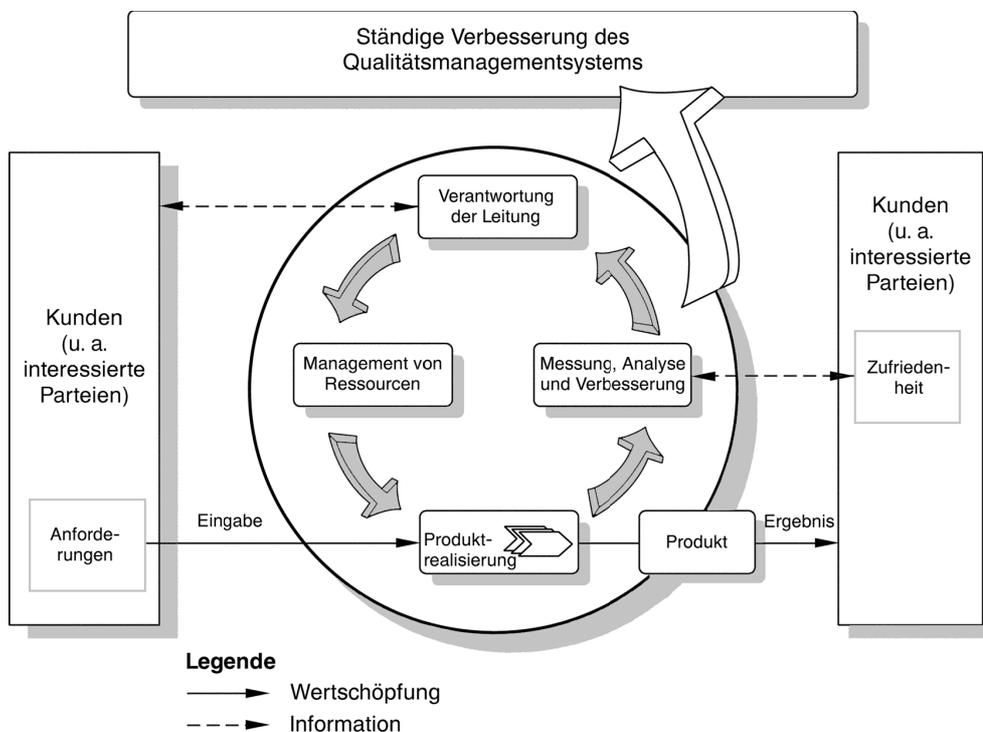


Abbildung 3: Prozessmodell aus DIN 9000 [Din05]

Ein weiterer wichtiger Bestandteil von QMS, der auch in den Normen gefordert wird, ist der Bereich Dokumentation, der in Kapitel 2.5 kurz erläutert wird.

2.4 Qualitäts-Methoden nach PDCA-Kreis

Die Normenreihe nach ISO 9000ff. beschreibt den Aufbau eines QMS unter Berücksichtigung jeglicher Aspekte wie Organisation, Struktur, Prozesse, Recht, Kosten, Umwelt oder Dokumentation.

Bevor diese Anweisungen zum Aufbau von QMS vereinheitlicht wurden, hatte schon Deming einen Plan entwickelt und Methoden bereitgestellt und gesammelt, die als Methoden für kontinuierliche Verbesserungsprozesse dienen. Dieser Plan ist in vier Bestandteile aufgeteilt und ist als Deming-Kreis oder PDCA-Kreis (plan-do-check-act, siehe Abbildung 4) bekannt, wobei in jedem der vier Teile Methoden zur Umsetzung der Ziele vorgeschlagen werden. Im Folgenden werden die vier Bestandteile des Deming-Kreises kurz erklärt.

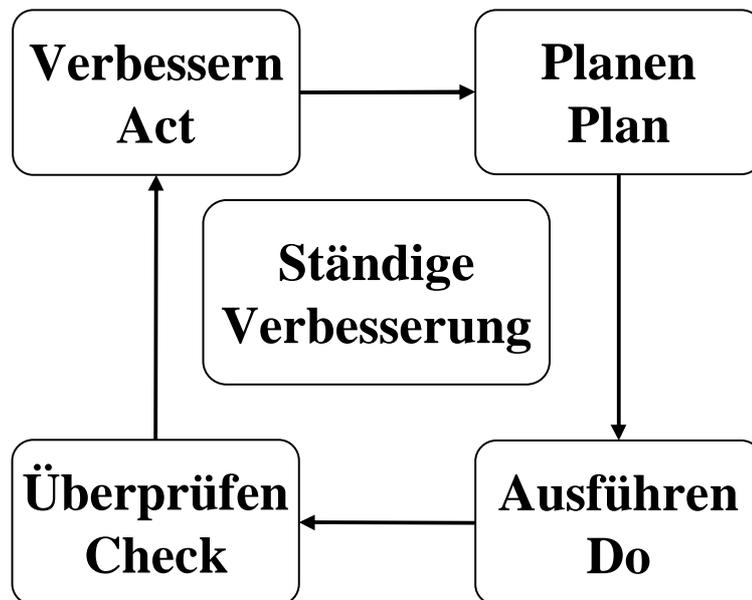


Abbildung 4: PDCA nach [Lin05]

Plan - Qualitätsplanung

Qualitätsplanung ist das Planen der Ziele, die erreicht werden sollen, z.B. Verringerung des Ausschusses, Erhöhung der Qualität eines Gerätes oder Verringerung von Kosten. Es werden Qualitätsanforderungen an Tätigkeiten und Ergebnisse auf allen Ebenen der Organisation entwickelt. Nach DIN EN ISO 9000 ist Qualitätsplanung ein „Teil des Qualitätsmanagementsystems, der auf das Festlegen der Qualitätsziele und der notwendigen Ausführungsprozesse sowie der zugehörigen Ressourcen zum Erreichen der Qualitätsziele gerichtet ist. [Din05]“ Qualitätsziele beruhen auf der zugehörigen Qualitätspolitik und werden für jede Organisationsebene des Unternehmens eigens festgelegt.

Do - Qualitätslenkung

Qualitätslenkung ist ein „Teil des Qualitätsmanagementsystems, der auf die Erfüllung von Qualitätsanforderungen gerichtet ist [Din05].“ Nach Deming sollen betreffende Mitarbeiter mit dem Plan evtl. durch Training vertraut gemacht, sowie die Durchführung der geplanten Verbesserungen gestartet werden, d.h. es erfolgt im Teil *Do* die Umsetzung der im Teil *Plan* beschlossenen Maßnahmen.

Check - Qualitätssicherung

Qualitätssicherung ist ein „Teil des Qualitätsmanagementsystems, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden [Din05].“ Nach Deming ist dieser Teil die Prüfphase, in der die Situation erfasst wird, d.h. Daten ermittelt werden, die Grundlage für die Prüfung sind und in dem anhand der Prüfpunkte festgestellt wird, ob die Zielsetzung der Planungsphase erreicht wurde.

Act - Qualitätsverbesserung

Der vierte Teil des PDCA-Kreises ist die Qualitätsverbesserung. Nach DIN EN ISO 9000 ist Qualitätsverbesserung ein „Teil des Qualitätsmanagementsystems, der auf die Erhöhung der Eignung zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen gerichtet ist. Die Anforderungen können jeden beliebigen Aspekt betreffen wie Wirksamkeit, Effizienz oder Rückverfolgbarkeit [Din05].“

Nach Deming beginnt an diesem Punkt die Aktionsphase, welche aus der Übereinstimmung von SOLL und IST besteht, d.h. Ergebnisse werden standardisiert und eingeführt. Wenn die Verbesserungen von den Zielen abweichen, wird eine Entscheidung getroffen, ob und wie oft Phase *Plan* und *Do* nochmals durchlaufen werden sollen, damit Übereinstimmung entsteht.

Die Methoden des PDCA-Kreises dienen zum Aufbau und zur Erhaltung eines QMS und können für alle Bereiche des Prozessmodells aus Abbildung 3 angewendet werden, auch wenn die Aufteilung in geringfügig anderer Weise als bei der Norm erfolgt. Diese Sammlung ist sehr umfangreich und beinhaltet die am häufigsten verwendeten Methoden zur Umsetzung QMS.

In Tabelle 1 werden einige Methoden aus dem PDCA-Kreis mit einer kurzen Beschreibung aufgeführt. In den folgenden Kapiteln werden die Methoden, die für die Anwendung in einem universitären Labor geeignet sind, herausgehoben und detaillierter erklärt.

Die Methoden, die für einen Einsatz im Labor nicht geeignet sind, werden in Kapitel 3.4 kurz vorgestellt, da sich diese Arbeit zur Einführung eines QMS weitestgehend an den PDCA-Kreis anlehnt.

PDCA	Methode	Kurz-Beschreibung	Kapitel
Plan	QFD	Quality Function Deployment: sehr stark kundenorientiert	3.4
	Lasten-/Pflichtenheft	Beschreibung der Eigenschaften, die ein Produkt haben sollte	4.1
	Prüfplanung	Planung für Messung unterschiedlicher Schritte in Herstellung	4.2
	Prüfmittelauswahl	Messgeräte für Messung bestimmter Parameter	4.3
Do	Prüfmittelverwaltung	Wartung, Instandhaltung, Kalibrierung	4.2
	SPC - QRK	Statistische Prozess-Kontrolle: Qualitätsregelkarten	4.4
	Fehlermanagement	Schritte zur effektiven Fehlerbehandlung	4.6
	Jidoka	Hilfsmittel zur automatischen Fehlererkennung von Geräten + Warnung	4.6
	Poka Yoke	Vermeidung unbeabsichtigter Fehler	4.6.3
	Andon	Anzeigetafel für Ort des Fehlers im Werk	3.4
	3 Mu	Ausschalten von Tätigkeiten, die unnötige Ressourcen verbrauchen	3.4
	5 S	Ordnung + Sauberkeit am Arbeitsplatz als oberstes Ziel	4.6.2
Check	MFU/PFU	Maschinen- und Prozessfähigkeit	4.3
	Mitarbeiterzufriedenheit	Alle Mitarbeiter sollen am QMS teilhaben	3.4
Act	Audit	Systematische und von unabhängigen Personen durchgeführte Qualitätsprüfungen	3.4
	Benchmark	Vergleich der eigenen Leistung mit der anderer + ziehen von Konsequenzen zur Verbesserung	3.4
	FMEA	Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse: Fehler frühzeitig ermitteln	3.4.8
	DoE	Design of Experiments: Zielerreichung mit möglichst geringer Anzahl von Versuchen	4.5
	Ishikawa	Fischgrät- / Ursache-Wirkungsdiagramm	4.8
	8 D	Analyse zur Beseitigung von Fehlerursachen	4.6.4
	Q-Zirkel	Mehrere Mitarbeiter aus verschiedenen Bereichen finden sich zusammen, um Probleme und deren Lösungen zu diskutieren	4.7
	Six Sigma	Ziel: Kontinuierliche Verbesserung der Unternehmensleistung	3.4
	Vorschlagwesen	Möglichkeit für Mitarbeiter, ihre Vorschläge einzubringen	4.9
	Kaizen	Ständige Verbesserung	4.10

Tabelle 1: Methoden aus dem PDCA-Kreis

2.5 Dokumentation

Die Dokumentation des QMS ist nach Norm das wichtigste Mittel, um ein QMS aufzubauen, gleich bleibende Qualität und eine ständige Verbesserung zu gewährleisten. Der Umfang der Dokumentation richtet sich immer nach der Größe und Art des Unternehmens und nach der Komplexität der Prozesse sowie nach der Fähigkeit, d.h. der Qualifikation des Personals [Din05], [Gem06], [Lin05].

QM-Dokumente sollten folgende Inhalte aufweisen [Din05], [Lin05]:

- Aussagen zur Qualitäts-Politik
- Qualitäts-Handbuch
- dokumentierte Verfahren, die normseitig gefordert werden
- Dokumente, die die Organisation zur wirksamen Planung, Durchführung und Lenkung ihrer Prozesse benötigt
- normseitig geforderte Qualitäts-Aufzeichnungen

Die Dokumentation erfolgt in einem so genannten Qualitätsmanagement-Handbuch QMH, wobei es freigestellt ist, in welcher Form dieses geführt wird, also Papier, elektronisch oder eine Mischung, solange es in sich schlüssig und konsistent ist.

Das QMH ist das zentrale Dokument zur Beschreibung eines QMS, in dem festgehalten wird, welche Maßnahmen die Unternehmensleitung zur Umsetzung ihrer Qualitätspolitik favorisiert. Es werden Verantwortlichkeiten, Befugnisse und alle benötigten Maßnahmen zur Umsetzung des QMS für jede Einheit oder Abteilung beschrieben [Lin05]. Nach praktischen Erfahrungen sollte das QMH in drei Teile unterteilt werden:

- Teil 1: Leitfaden und QMS-Rahmenbeschreibung mit Bezug zu den QM-Elementen nach DIN EN ISO 9000ff.
- Teil 2: QM-Anweisungen und Verfahrensanweisungen, die für die Führung und Lenkung der QM-Abteilung maßgeblich sind.
- Teil 3: Arbeits- und Prüfanweisungen, QM-Pläne und alle Arbeitspapiere für die operative Ebene.

In Teil 2 und 3 sollten zusätzlich Formulare, Protokolle und Tabellen zur Verfügung gestellt werden [Her99]. Das QMH dient auch als Nachweisdokument zur Zertifizierung und für Audits.

In Kapitel 5 wird die Dokumentation des QMH am HPT beschrieben.

3 Qualitätsmanagement für das Halbleiterlabor des HPT

3.1 Das Halbleiter-Labor am HPT

Am Lehrstuhl für Technische Elektronik LTE und Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik HPT werden zu Forschungszwecken Halbleiterbauelemente auf Silizium-Substrat (Wafer) neu entwickelt, gefertigt und charakterisiert. Hierzu steht ein Halbleiter-Labor (HL-Labor) zur Verfügung, das im Wesentlichen aus einem Reinraum mit ca. 85 m^2 und zusätzlichen Räumen mit Geräten für Prozessierung und Analyse mit ca. 300 m^2 Fläche besteht. Die grundsätzliche Eignung und Qualitätseinstufung eines HL-Labors erfolgt nach der Fähigkeit, gleiche Halbleiterbauelemente wie in der industriellen Massenproduktion herzustellen. Die Standard-Industrie-Technologie ist die so genannte CMOS-Technologie (CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor). Das HL-Labor am HPT/LTE ist CMOS-fähig und durchgängig für Kleinserienfertigung geeignet und wird für Forschung und Lehre eingesetzt. Da die Funktion von HL-Bauelementen hauptsächlich durch störende Partikel, z.B. Staub, Bakterien oder Viren, beeinträchtigt wird, sollten HL-Bauelemente möglichst in partikelfreien Räumen, so genannten Reinräumen, produziert werden.

Ein Reinraum ist ein Raum, der aus mehreren Teilräumen bestehen kann, in dem in sehr sauberer Atmosphäre gearbeitet wird. Im Vergleich zu einem Reinraum sind in einem Operationsaal bis zu 1000mal mehr Bakterien vorhanden. Um diese Reinheit herzustellen besteht ein professioneller Reinraum meist aus fünf Stockwerken, wobei nur im mittleren prozessiert wird. Die anderen vier Stockwerke dienen zur Klimatisierung und Filterung der Luft. Detailliertere Informationen finden sich in [Gai04] oder [Tra00].

Diesen Aufwand an Klimatisierung und Filterung ist an einem Labor an einer Universität nicht möglich. Trotzdem wird versucht mit den zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten und Mitteln eine sehr hohe Reinheit zu erreichen. Diese Reinheit ist vor allem bei den kritischen Prozessgeräten mit der Reinheit eines industriellen Reinraums vergleichbar. Abbildungen 5 und 6 zeigen eine Teilansicht des Reinraums am LTE/HPT mit einigen Prozessgeräten. Es ist zu sehen, dass diese wenigen auf den Bildern sichtbaren Geräte komplex zu bedienen sind, so dass auf sehr genaues Arbeiten geachtet werden muss, um Fehler zu vermeiden.

Die am LTE/HPT zusätzlich verfügbaren Räume für Messgeräte und weniger kritische Prozessgeräte stehen nicht in Reinraumatmosphäre, sind aber mit allen benötigten Versorgungsleitungen und Sicherheitsvorrichtungen ausgestattet.

Der Gerätepark besteht aus Prozess- und Analysegeräten sowie Computern zur Simulation von Prozessen und Bauelementen. In Tabelle 2 wird ein Überblick über die vorhandenen Prozessgeräte gegeben und in Tabelle 3 werden die vorhandenen Analysegeräte aufgelistet.



Abbildung 5: Teilansicht 1 des Reinraums am LTE / HPT



Abbildung 6: Teilansicht 2 des Reinraums am LTE / HPT

Gerät	Art des Prozesses
Maskenherstellung	Masken zur Verwendung in der Lithographie
Sputtern	Metalle (Titan, Aluminium, Gold, Silber...), Isolatoren (Oxid)
Aufdampfanlagen	Aufdampfen Metalle: Aluminium, Gold etc.
Naßchemie	Reinigen, Ätzen etc.
Diffusionsöfen	n- und p-Substratdotierung
LPCVD, RTCVD	Si, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ : Gasphasenabscheidung
RIE	Trockenätzen
Ofen-Oxidation, RTP	Oxidation von Silizium
Photolithographie	Belichtung von Strukturen bis zu ca. 1 μ m
Backend	Sägen und Bonden

Tabelle 2: Übersicht Prozessgeräte

Gerät	Art der Messung
Partikelmessgerät	Messung der Anzahl der Partikel, Temperatur und Luftfeuchte im Reinraum
Mikroskop	Qualitative Sichtkontrolle von Strukturen
DekTak	Stufenmessgerät
AlphaStep	Stufenmessgerät
Ellipsometer	Messung von Schichtdicken mittels Ellipsometrie
AFM	Atomic Force Microscopy
FIB	Focused Ion Beam - Multi-Analyse-Tool
SEM	Scanning Electron Microscopy
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy
Vakuummessplatz	Elektrische Charakterisierung unter Vakuumbedingungen
Parameteranalyser	Charakterisierung von Strom-Spannungs-Kennlinien
LCR-Messbrücke	Charakterisierung von Kapazitäts-Spannungskennlinien
Spitzenmessplatz	Nadelkontakte zur Messung von Bauelementen
Wafer-Prober	Automatisierte Messung mehrerer Bauelemente

Tabelle 3: Übersicht Messgeräte

Im Folgenden werden die am LTE/HPT durchgeführten Bauelement-Prozesse aufgelistet. Die einzelnen Prozesse bestehen zum Großteil aus bis zu 40 Einzelprozess-Schritten und zusätzlichen Kontrollmessungen. Als Beispiel für einen solchen Prozess ist in Anhang A der Gesamtprozess für den Standard-MOSFET-Prozess abgedruckt.

- MOS-Dioden
- Standard-Prozess MOSFET - MOS-Feldeffekttransistor
- Variationen des MOSFET-Prozesses
- TFET (Tunnel-FET)
- FEA - Feldemissionsspitzen
- CTFET - Complementärer TFET
- Biosensoren

Die am HPT hergestellten und untersuchten Bauelemente sind, ähnlich wie in der Industrie, kein Einzelprozessverfahren, sondern ein Vielstufenprozess, der zu einem funktionierenden Bauelement führt. Das heißt, dass alle Prozess-Schritte zusammen spielen und sehr genau funktionieren müssen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass ein Teilschritt des Prozesses das Bauelement unbrauchbar macht. Die Herausforderung bei der Arbeit mit Halbleiterprozessen und an Halbleiterbauelementen ist also die Komplexität der Prozesse, mit denen immer kleinere Bauelemente erzeugt werden. Diese Prozesse werden immer anfälliger auf kleinste Verunreinigungen. Am HPT können Strukturgrößen von etwa $1\ \mu\text{m}$ hergestellt werden. Im Folgenden wird an einigen Beispielen gezeigt, wie stark die technologische Arbeit in einem HL-Labor davon abhängig ist, dass der Reinraum eine sehr hohe Reinheit aufweist, um funktionsfähige Bauelemente herstellen zu können:

- Abbildung 7 zeigt ein Haar (ca. $30\ \mu\text{m}$) auf einem Chip mit 4Mb DRAM Strukturen.
- Abbildung 8. Hier ist ein Kosmetik-Partikel (ca. $15\ \mu\text{m}$) auf 4Mb DRAM Aluminiumbahnen abgebildet. Sechs Bahnen wurden dadurch kurz geschlossen.
- Ein Schweißtropfen, der z.B. in ein Reinigungsgefäß fällt, kann auf 1000 Wafern jeden einzelnen chip und jeden einzelnen Transistor funktionsunfähig machen.
- Ein Grippe-Virus hat einen Durchmesser von 100nm, was etwa 400 Atomen entspricht. Ein aktueller Transistor schaltet Ströme auf 45nm, also ca. 200 Atomen [Int07].

Aus diesen Beispielen ist erkennbar, dass schon sehr kleine Verunreinigungen ein komplettes Bauelement zerstören können. Auch Fluktuationen im Prozess oder Ungenauigkeiten bei Geräten wirken sich sehr stark auf die Funktionsfähigkeit der produzierten Bauelemente aus. Aus diesem Grund muss darauf geachtet werden, dass die Geräte innerhalb der

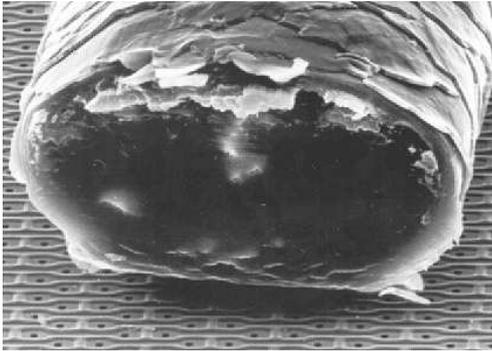


Abbildung 7: Haar auf 4Mb DRAM Strukturen (aus [Foe07])

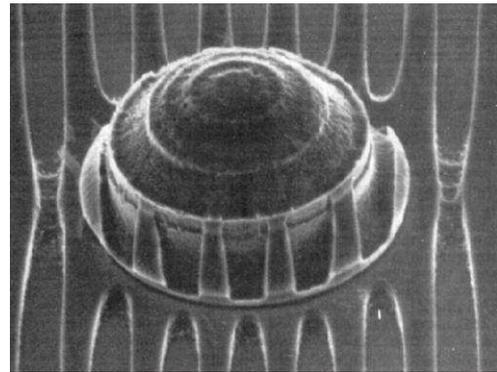


Abbildung 8: Kosmetik-Partikel auf 4Mb DRAM Aluminiumbahnen (aus [Foe90])

vorgegeben Grenzbereiche arbeiten und dass Prozesse möglichst genau reproduzierbar sind und möglichst wenigen Schwankungen unterliegen. Aus diesem Grund werden so genannte „Geräteverantwortliche“ eingesetzt. Diese Personen sind für ein oder mehrere Geräte verantwortlich, d.h. sie sind sowohl Ansprechpartner für Probleme technischer Art am Gerät als auch für prozesstechnische Fragen. Im HL-Labor des HPT/LTE sind die Doktoranden Geräteverantwortliche, also Ansprechpartner für Fragen und Probleme.

Am LTE/HPT liegt das Interesse auf der Erforschung neuartiger Bauelemente, weshalb eine Standardisierung z.B. nach DIN wenig sinnvoll ist. Dennoch muss und wird insbesondere bei der Entwicklung von neuartigen Bauelementen darauf geachtet werden, dass die Prozessgeräte zuverlässig arbeiten und die Prozesse bekannt und unter Kontrolle sind. In den vergangenen Jahren wurden die Prozesse durch die Verkleinerung der Strukturgrößen immer komplexer und schwieriger durchzuführen. Aus diesem Grund ist es nötig, ein Qualitätsmanagementsystem für das HL-Labor und insbesondere den Reinraum des LTE/HPT einzuführen, um weiterhin zuverlässige Forschung betreiben zu können.

3.2 Organisatorische Voraussetzungen

Die Normenreihen sind ebenso wie der PDCA-Kreis nach Deming als Hilfsmittel zum Aufbau, zur Etablierung und zur Aufrechterhaltung eines QMS zu betrachten. Dabei wird stets betont, dass die Bedürfnisse des Unternehmens, das die Einführung eines QMS plant, am wichtigsten sind und darauf geachtet werden muss, dass eine systematische Einführung erfolgt. Ein QMS ist als Kontrollmethode zu betrachten, bei dem die Dokumentation, die Weitergabe und Sicherung von Wissen, auch Wissensmanagement genannt, einen der wichtigsten Bestandteile des Gesamtsystems darstellt [Rom95].

Bevor ein QMS eingeführt wird, muss die Struktur der bestehenden Organisation beleuchtet werden. Es sollte klar sein, wie Verantwortlichkeiten geregelt sind und wer Verantwortung trägt. Die Struktur auf universitärer Ebene ist dabei relativ einfach zu beschreiben, vor allem auf der Ebene von Lehrstühlen oder Fachgebieten. Die Organisationsstruktur des HPT ist in Abbildung 9 dargestellt.

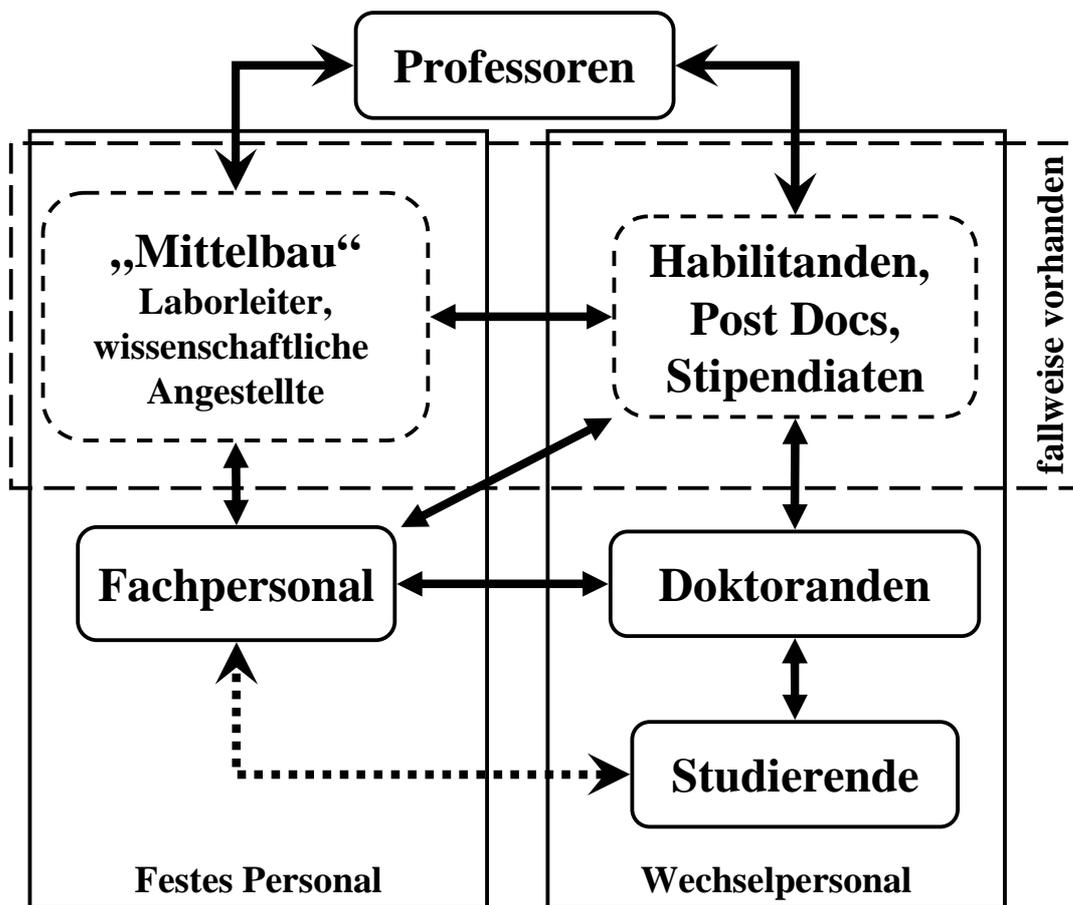


Abbildung 9: Organisationsstruktur im universitären Bereich

Es herrscht eine klar hierarchische Struktur, bei welcher der Professor auf der obersten Ebene steht. Danach erfolgt eine vertikale sowie eine horizontale Unterteilung.

Vertikal wird unterteilt in *Wechselpersonal*, also Habilitanden, Post Docs, Doktoranden, Studierende und *festes Personal*, zu dem der klassische „Mittelbau“ mit Laborleiter und wissenschaftlichem Personal sowie das Fachpersonal zählen.

Horizontal erfolgt die Unterteilung in Hierarchieebenen. Hierbei ist die zweite Ebene, die unter anderem aus Habilitanden, Post Docs sowie dem „Mittelbau“ besteht, nur fallweise vorhanden und in Abbildung 9 aus diesem Grund gestrichelt dargestellt.

Am HPT besteht die zweite Hierarchieebene bisher ausschließlich aus dem Technologieleiter, der zusammen mit den Doktoranden den zentralen Punkt in der Kommunikationsstruktur

darstellt. Die Studierenden sowie das Fachpersonal klären ihre Angelegenheiten beinahe ausschließlich mit den bzw. über die Doktoranden, weniger untereinander [Now07a], [Now07b].

Obwohl eine klar hierarchische Struktur herrscht, müssen die Doktoranden eigenverantwortlich handeln, Studierende koordinieren und bei ihren Arbeiten betreuen. Eine Absprache mit dem Professor findet zwar statt, diese Gespräche sind aber meist so gestaltet, dass keine Arbeitsanweisungen gegeben werden, sondern der Status der wissenschaftlichen Arbeit abgefragt wird und weiteres Vorgehen besprochen wird. Dabei wird dem Doktoranden die Freiheit gelassen, im Vertrauen auf seine erworbene Expertise, die weiteren Schritte vorzuschlagen und zu begründen. Der Professor gibt meist neue Denkanstöße und greift nur dann ein, wenn die Gefahr besteht, dass das Ziel der Arbeit nicht erreicht wird oder neue Aspekte berücksichtigt werden sollen.

Insgesamt weist die Organisationsstruktur in einer universitären Umgebung außer der hierarchischen Struktur noch einige Besonderheiten auf:

- Wissenschaftliches Arbeiten lässt sich nur schwer standardisieren.
- Wissenschaftler sind Individualisten, d.h. der Drang zur Selbstverwirklichung ist sehr ausgeprägt.
- Es muss Überzeugungsarbeit geleistet werden, dass Qualität nötig ist und dafür Zeit investiert werden muss.
- In einer universitären Umgebung sind Kunden, die zufrieden gestellt werden müssen, anders definiert als in einer industriellen Umgebung.

Die organisatorische Struktur einer universitären Forschungseinrichtung ist nicht darauf ausgelegt, standardisiert zu arbeiten, sondern hat das Ziel, kreative wissenschaftliche Arbeit zu leisten und zu fördern und daraus innovative Ergebnisse hervorzubringen. Auch wird Wert darauf gelegt, dass Forschungsthemen möglichst einzigartig sind und von einzelnen Personen evtl. in Kooperationsgruppen bearbeitet werden, was eine sehr individuelle Arbeitsweise fördert und voraussetzt.

Diese Arbeitsweise sollte bei der Einführung eines QMS beachtet werden. Individuelle Freiheiten und Wünsche von einzelnen Personen sollten, wenn möglich und sinnvoll, berücksichtigt werden. Auch ist mit einer längeren Einführungs- und Etablierungszeit des Systems zu rechnen. Es besteht zwar eine Weisung von oben, also vom Professor, aber es muss mit Widerständen in der Umsetzung gerechnet werden. Der Grund dafür kann sein, dass ein QMS als unnötig empfunden wird. Auch ist der Arbeits- und Zeitaufwand zur Einführung eines QMS und zur Dokumentation sehr intensiv. Die Begründung, warum ein QMS als nicht sinnvoll angesehen werden kann, ist die Verkürzung der Zeit, die für die wissenschaftliche Arbeit zur Verfügung steht. Normalerweise sind ca. 3 Jahre für ein Projekt angesehen, was für eine Arbeit in der Forschung an Halbleiterbauelementen sehr kurz bemessen ist. Für die Pflege von Dokumentation und die Durchführung von QM-Maßnahmen würde etwa ein Tag

pro Woche benötigt (siehe Kapitel 4.4.5), was in den Augen der meisten Doktoranden zeitlich nur schwer tragbar wäre.

Trotz dieser Gegenargumente wurde beschlossen, zu untersuchen, ob und in welchem Umfang ein QMS für die Technologie (Reinraum, Geräte, Arbeitsumgebung) am HPT eingesetzt werden kann. Die Erwartungen sind:

- eine Verbesserung der Qualität der Produkte in Lehre und Forschung.
- kürzere Einarbeitungszeiten durch eine umfangreichere Dokumentation.
- sowie die Bereitstellung eines Systems zur Verbesserung der wissenschaftlichen Arbeit.

QMS sind in der Regel sehr stark darauf ausgelegt, Kundenwünsche zu befriedigen und liefern dementsprechend viele Methoden hierzu.

Am HPT - und generell in der universitären Umgebung - steht nicht im Vordergrund, Produkte (an einen Kunden) zu verkaufen und auszuliefern. Vielmehr ist die Forschung an innovativen Bauelementen das Ziel. Als Kunde können hier (in sehr abstrakten Sinne) das deutsche Volk, also die Steuerzahler, angesehen werden, da unter anderem mit Steuergeldern die Universitäten finanziert und damit auch die Professoren bezahlt werden. Professoren müssen ihren Anspruch auf Finanzierung durch Forschungsergebnisse, die veröffentlicht werden, nachweisen. Die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen ist für Professoren ein wichtiges Hilfsmittel zur Sicherung und Erweiterung des Renommees. Aus diesem Interesse heraus können auch Professoren als Kunden angesehen werden. Zusätzlich sind Drittmittelgeber ebenfalls Kunden, da sie als Gegenleistung für finanzielle Unterstützung das Einhalten des Projektplans und Forschungsergebnisse erwarten. Dies schafft andere Voraussetzungen als in der Industrie und hat auch zur Folge, dass andere Methoden angewendet werden müssen bzw. einige Methoden nicht angewendet werden können. Dies wird in den Kapiteln 3.4 und 4 genauer betrachtet.

3.3 Vorauswahl der QM-Methoden zur Anwendung am HPT

Der PDCA-Kreis ebenso wie die Normen sind Hilfsmittel zur Einführung eines QMS. Es werden verschiedene Methoden zur Verfügung gestellt, derer sich die Anwender bedienen können.

Am HPT wird keine Zertifizierung nach DIN Norm angestrebt, sondern hauptsächlich nach einer „technischen“ Möglichkeit gesucht, die Qualität des HL-Labors zu kontrollieren, zu stabilisieren, zu überprüfen und zu gewährleisten. Aus diesem Grund lag das Hauptaugenmerk bei der Umsetzung des QMS darauf, Methoden anzuwenden, mit denen die Technik kontrolliert wird und mit denen zuverlässig Wissenstransfer und -sicherung betrieben werden kann. Andere Methoden sollten evaluiert und eine Entscheidung getroffen werden, ob eine Einführung oder weitere Systematisierung sinnvoll sein könnte und eine Verbesserung oder Erleichterung der Forschungsarbeit erreicht werden kann. Dafür wurde der PDCA-Kreis nach [Lin05] zu Hilfe genommen, da umfassende Methoden für QMS systematisch zur Verfügung gestellt werden.

Für das QMS am HPT erfolgte eine Auswahl der Methoden nach Prioritäten geordnet:

1. Gerätekontrolle
2. Wissenstransfer und -sicherung
3. Fehlermanagement
4. Kommunikationsverbesserung
5. weitere

Unter Berücksichtigung oben genannter nach Priorität geordneter Punkte wurden geeignete und ungeeignete Methoden zur Anwendung am HPT in zwei Tabellen unterteilt.

In Tabelle 4 werden die Methoden aufgeführt, die nicht zur Anwendung am HPT geeignet sind.

In Tabelle 5 werden die Methoden, die zur Einführung eines QMS im HL-Labor des HPT verwendet wurden, aufgeführt. Dabei wird nicht mehr nach dem PDCA-Kreis vorgegangen, sondern es wird die Wichtigkeit der jeweiligen Methode durch die Reihenfolge in der Tabelle dargestellt. Dabei sollten die ersten vier Methoden, die der Kontrolle der Geräte dienen, möglichst zügig realisiert werden. Danach sollte Schritt für Schritt eine Umsetzung der weiteren Methoden zur Qualitätskontrolle, -erhaltung und -steigerung erfolgen.

Eine detaillierte Beschreibung der in den Tabellen genannten Methoden erfolgt in Kapiteln 3.4 und 4.

	Werkzeug	Kapitel	Seite
1.	QFD - Quality Function Deployment	3.4	26
2.	Jidoka	3.4	26
3.	Andon	3.4	27
4.	3 Mu	3.4	27
5.	Mitarbeiterzufriedenheit	3.4	28
6.	Audit	3.4	29
7.	Benchmarking	3.4	29
8.	FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	3.4	30
9.	Six Sigma	3.4	31

Tabelle 4: Ungeeignete Methoden zur Anwendung am HPT

	Werkzeug	Kapitel	Seite
1.	Lasten-/ Pflichtenheft	4.1	32
2.	Prüfplanung inklusive Prüfmittelauswahl	4.2	33
3.	MFU/PFU - Maschinen- und Prozessfähigkeit	4.3	37
4.	SPC - Qualitätsregelkarten	4.4	43
5.	DoE - Design of Experiments	4.5	65
6.	Werkzeuge zur Fehlervermeidung: - Fehlermanagement - 5 S - Poka Yoke - 8D	4.6	74
7.	Qualitätszirkel	4.7	80
8.	Ishikawa-Diagramm	4.8	81
9.	Vorschlagwesen	4.9	84
10.	Kaizen	4.10	85

Tabelle 5: Geeignete Methoden nach Wichtigkeit sortiert

3.4 Für HPT ungeeignete Methoden

In allen vier Bereichen des PDCA-Kreises werden Methoden vorgeschlagen, die nicht oder nur in sehr begrenztem Maße für die Verwendung im universitären Umfeld geeignet sind. Nachfolgend werden diese aufgeführt, kurz beschrieben und erklärt, weshalb sie keine Anwendung finden.

Nicht verwendbare Methoden:

- Bereich Plan:** QFD
- Bereich Do:** Jidoka, Andon und 3 Mu
- Bereich Check:** Mitarbeiterzufriedenheit
- Bereich Act:** Audit, Benchmarking, FMEA und Six Sigma

3.4.1 QFD - Quality Function Deployment

Quality Function Deployment oder Qualitätsfunktionen-Darstellung ist ein rein kundenorientiertes Werkzeug. Es dient dazu, Kundenwünsche in Produktmerkmale umzusetzen und dies grafisch darzustellen (House of Quality, siehe Abbildung 10). Das House of Quality ist eine umfassende Beziehungsmatrix, in der Kundenwünsche mit Produkt- und Prozessmerkmalen sowie Arbeits- und Prüfanweisungen verknüpft werden. Eine QFD wird in drei Teile mit unterschiedlicher Bedeutung eingeteilt.

Im Folgenden werden die in Abbildung 10 aufgeführten Punkte kurz tabellarisch dargestellt und benannt:

WAS:	Punkt 1	Kundenanforderungen ermitteln
	Punkt 2	Bewertung der Kundenanforderungen
	Punkt 3	Produktvergleich aus Kundensicht
	Punkt 6	Beziehungsmatrix erstellen
WIE:	Punkt 4	Produktmerkmale ermitteln
	Punkt 5	Optimierungsrichtung festlegen
	Punkt 7	Technische Wechselbeziehungen bestimmen
WIE VIEL:	Punkt 8	Technische Schwierigkeiten bewerten
	Punkt 9	Zielwerte festlegen
	Punkt 10	Produktvergleich aus Ingenieurssicht
	Punkt 11	Bewertung der technischen Bedeutung

Der Vorteil der QFD-Methode ist, dass Kundenwünsche im Voraus geklärt werden und die Bedeutung der einzelnen Produktmerkmale kritisch bewertet wird. QFD ist eine anfangs sehr aufwändige Methode, zahlt sich aber schließlich meist schnell aus, da in späteren Phasen der Entwicklung weniger Korrekturen vorgenommen werden müssen. Zur Durchführung einer QFD wird ein Team aus fünf bis acht Mitgliedern aus verschiedenen Abteilungen eines Unternehmens vorgeschlagen [The05].

Detailliertere Informationen zu QFD finden sich u.a. in [Aka92], [The05], [Mas07], [QFD07].

QFD ist eine Methode, die sich ausschließlich auf Kundenwünsche und deren Umsetzung konzentriert und ist somit nicht für ein universitäres Labor geeignet. Auch wird vorausgesetzt, dass mehrere Personen aus verschiedenen Abteilungen mitwirken. Dies ist in einem universitären Labor nicht umsetzbar. QFD geht von einem fertigen Produkt aus, das für Kunden anwendbar ist. Diese Voraussetzung ist im Labor des HPT nicht erfüllt, da Forschungshalbleiterbauelemente hergestellt werden, die erst später in der Industrie zu einem Produkt entwickelt werden.

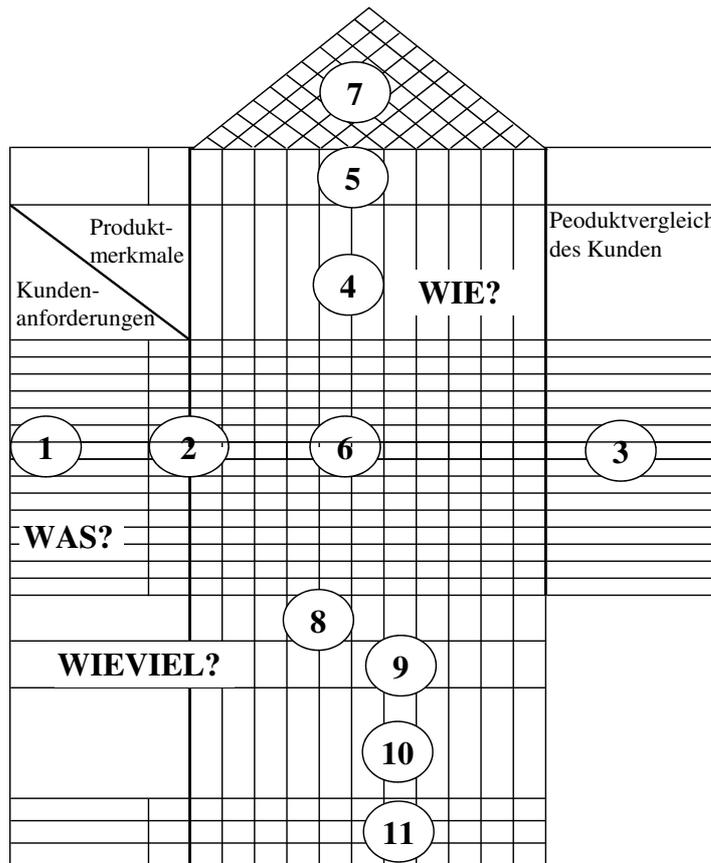


Abbildung 10: QFD - House of Quality

3.4.2 Jidoka

Jidoka ist ein Hilfsmittel zur automatischen Fehlererkennung an Geräten. Es dient dazu, Probleme im Herstellungsprozess zu melden. Dabei sind die Geräte mit Sensoren ausgestattet, die bei Fehlern ein automatisches Abschalten bewirken und eine Meldung geben. Diese Meldung kann erfolgen, indem eine Warnlampe aufblinkt oder eine Meldung an die zuständige Stelle z.B. per email geschickt wird [Ohn93], [Lea07], [Kam99].

Jidoka ist in einem universitären Labor schwer anwendbar. Da, im Gegensatz zur Industrie, meist kleinere und weniger moderne Geräte zur Verfügung stehen, wäre sowohl der personelle als auch der finanzielle Aufwand, ein automatisches Fehlererkennungssystem zu installieren, extrem hoch. Dazu kommt, dass die Geräte von einzelnen Personen bedient werden und nicht automatisiert arbeiten, weshalb ein Fehler meist sofort auffällt.

Allerdings gibt es durchaus Geräte in einem Labor, die einem aktuelleren Industrie-Standard genügen und in einem universitären HL-Labor zu finden sind. Diese Geräte sind meist mit einer automatischen Abschaltung versehen, die verhindert, dass bei z.B. zu wenig Kühlflüssigkeit (Stickstoff) oder Überhitzen einer Pumpe, das Gerät abgeschaltet wird. Damit wird verhindert, dass das Gerät frühzeitig altert, repariert werden muss oder sogar kaputt geht. Am HPT sind die RTCVD (Rapid Thermal Chemical Vapor Depositon), die LPCVD (Low Pressure CVD), die RTP (Rapid Thermal Processing) und der ATV-Oxidationsofen mit einer automatischen Abschaltung versehen. Hier erfolgt eine Abschaltung nicht prozessbedingt, sondern rein aufgrund externer Einflüsse.

3.4.3 Andon

Andon wurde von Toyota entwickelt. Dieses System besteht aus einer zentral in einer Werkshalle aufgestellten Anzeigetafel für alle Geräte. Wenn ein Gerät ausfällt, leuchtet eine Lampe auf der Anzeigetafel bei diesem Gerät auf und zeigt somit den Standort des Fehlers an [Lik04], [Lea07],[Kam99].

Andon wurde für die Fließbandfertigung bei Toyota entwickelt und ist für ein universitäres Labor nicht geeignet, da keine automatisierte Serienproduktion stattfindet, d.h. es ist immer ein Operator an einem benutzten Gerät, der einen Fehler sofort feststellen kann. Außerdem müsste eine aufwändige Verkabelung und Anpassung der Geräte erfolgen, was für die Größe eines Labors einen zu großen Aufwand bedeutet und keine signifikante Verbesserung bringen würde.

3.4.4 3 Mu - Muda, Mura, Muri

Die Begriffe Muda, Mura und Muri wurden von Toyota geprägt und bezeichnen das Ausschalten von Tätigkeiten, die unnötige Ressourcen verbrauchen ohne dabei zum Mehrwert des Produktes zu führen.

Muda heißt „Verschwendung“ und untergliedert sich in: Überproduktion - Wartezeit - Überflüssiger Transport - Ungünstiger Herstellungsprozess - Überhöhte Lagerhaltung - Unnötige Bewegungen - Herstellung fehlerhafter Teile.

Mura heißt „Unausgeglichenheit“, d.h. eine nicht optimale Produktion wie z.B. Verschwendung von Kapazitäten durch Warteschlangenbildung.

Muri heißt „Überlastung“ und bezeichnet Verluste, die durch Überlastung oder Überbeanspruchung entstehen. Dies kann z.B. eine geistige Überbeanspruchung des Personals sein [Lea07], [Lin05], [Kam99].

Die 3 *Mu* sind sehr stark auf Serienproduktion mit sehr genau bekannten Prozessen ausgelegt. In einem universitären Labor können die 3 *Mu* praktisch nicht zum Einsatz kommen, da zum einen keine Serienproduktion stattfindet und zum anderen Forschung betrieben wird, die nicht auf Reduktion von Verschwendung ausgelegt ist. Vielmehr können Verschwendung von Material, ungünstige Prozesse etc. in Kauf genommen werden, um innovative neue Bauelemente zu entwickeln.

3.4.5 Mitarbeiterzufriedenheit

Die Ermittlung der Mitarbeiterzufriedenheit ist eine Methode, die in Unternehmen eingesetzt wird, um alle Mitarbeiter am QMS teilhaben zu lassen. Die Mitarbeiter sollen das QM-Konzept verstehen und aktiv an der Verbesserung von Prozessen und Kundenservice teilhaben. Die Mitarbeiterzufriedenheit wird durch anonyme Befragungen ermittelt, die arbeitsbezogene, organisatorische und soziale Themen betreffen. Die Ergebnisse der Befragungen sollen Verbesserungspotentiale aufzeigen, die auch konsequent umgesetzt werden sollten [Lin05].

Mit der Methode der Mitarbeiterzufriedenheit wird eine Analyse betrieben, mit der festgestellt werden soll, warum Mitarbeiter z.B. nicht motiviert oder öfter krank sind. Das Ergebnis wird dann dazu verwendet, eine Verbesserung im Arbeitsumfeld zu schaffen, damit die Qualität der Produkte nicht durch unmotivierte Mitarbeiter leidet.

Als Methode zur Qualitätssicherung hat die Mitarbeiterzufriedenheit in einem universitären Labor wenig Hebelwirkung. Ein universitäres Labor besteht aus relativ wenig Personal, von dem erwartet wird, dass selbständig und selbstverantwortlich gearbeitet wird und Probleme und Verbesserungen ebenso selbständig untereinander besprochen und gelöst werden. Aufgrund dieser Arbeitsweise sind anonyme umfangreiche Fragebögen nicht angebracht. Trotzdem sollte vom Laborleiter darauf geachtet werden, dass ein offenes Klima herrscht, in dem Probleme angesprochen werden können.

Auch ist vorstellbar, dass bei einer Einführung eines neuen Systems, z.B. einer Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) eine Mitarbeiterbefragung stattfinden kann. Allerdings ist dies nur bei umfangreicheren Neuerungen sinnvoll, da der Aufwand für die Erstellung einer Mitarbeiterbefragung im Verhältnis zum Nutzen für das Labor sehr groß ist und andere Methoden anwendbar sind, um ein gutes Arbeitsklima zu schaffen (siehe Kapitel 4.7 und 4.9).

Zusammenfassend ist diese Methode eine aktive Methode zur Verbesserung von Qualität, die für große Unternehmen sehr gut geeignet ist. In einer universitären Umgebung arbeiten die Mitarbeiter selbstverantwortlich und achten deshalb selbständig auf Qualität. Die Zufriedenheit der Mitarbeiter ist dann sichergestellt, wenn das QMS mit Hilfe von geeigneten Methoden vor allem die Qualität der Geräte sichert und so die Forschungsarbeit vorangetrieben werden kann.

3.4.6 Audit

Audits sind systematische und von unabhängigen Personen durchgeführte Qualitätsprüfungen. Sie dienen zur objektiven Prüfung, ob Systeme, Prozesse und Produkte klare und transparente Strukturen aufweisen und können frühzeitig Schwachstellen aufdecken. Es gibt interne und externe Audits. Interne Audits werden auf Veranlassung der Leitung einer Organisation durchgeführt. Externe Audits werden bei Lieferanten oder von einer Zertifizierungsstelle durchgeführt [Qua07], [Lin05].

Es wird nach System-, Produkt- und Prozessaudit unterschieden:

- **Systemaudit:** Überprüfung, inwieweit das gesamte QMS oder Teile davon geeignet sind, die vorgegebenen Qualitätsziele zu erreichen. Es soll eine Verifizierung der geplanten qualitätsrelevanten Tätigkeiten erfolgen und die Wirksamkeit des QMS festgestellt werden.
- **Produktaudit:** Überprüfung der Übereinstimmung der Ausführung von Produkten mit den festgelegten Qualitätsanforderungen. Vorrangig soll dabei auf systematische Fehler geachtet werden.
- **Prozessaudit:** Überprüfung, ob
 - ausgewählte Prozesse zweckmäßig sind.
 - die praktische Umsetzung sinnvoll ist.
 - die Prozessparameter bekannt sind.
 - der Prozess beherrscht ist.

Die Durchführung eines Audits im universitären Labor ist schwierig. Ein Audit dient hauptsächlich dazu, Lieferanten zu überwachen oder zur Zertifizierung. Da das Labor am HPT weder Lieferant ist noch nach einer Zertifizierung strebt, würde ein Audit nur zur eigenen Kontrolle dienen. Zusätzlich verursacht ein Audit einen hohen personellen und verwaltungstechnischen Aufwand.

Da in dieser Arbeit evaluiert werden soll, ob ein QMS in einem universitären Labor anwendbar ist, kann an dieser Stelle nur ein Vorschlag gegeben werden. Ein Labor, das keine Zertifizierung anstrebt, sollte und wird in der Regel permanent durch die eigenen Mitarbeiter auditiert werden. Dabei ist der Vorteil, dass Verbesserungen und Änderungen sehr schnell umgesetzt werden, da die Mitarbeiter sowohl Bediener als auch Qualitätskontrolleure sind und ein Labor aus einem in der Regel sehr kleinen Team besteht.

3.4.7 Benchmarking

Benchmarking wird verwendet, um einen Vergleich der eigenen Leistungen mit denen der führenden Konkurrenz oder auch branchenfremden Unternehmen durchzuführen. Dabei werden die Konkurrenten und deren Strategien analysiert und für das eigene Unternehmen Konsequenzen zur Verbesserung gezogen. Es wird internes und externes Benchmarking unterschieden.

Im internen Benchmarking werden ähnliche Prozesse innerhalb eines Unternehmens miteinan-

der verglichen, um mögliches Verbesserungspotential zu finden.

Externes Benchmarking vergleicht die eigenen Leistungen mit denen von anderen Unternehmen. Wichtige Informationsquellen sind dabei Publikationen, Statistiken oder Benchmarking-Kontaktbörsen im Internet [DBZ07], [Gei05], [Mas07].

Für ein universitäres Labor ist es wichtig zu wissen, was die „Konkurrenz“, also andere Forschungsinstitute, entwickeln oder erforschen. Aber es besteht kein Zwang wie in der Industrie, dass die Produkte oder Arbeitsweisen verglichen werden müssen, da Forschungsinstitute per se an Innovationen arbeiten und somit kaum vergleichbar sind. Benchmarking wird aus diesem Grund am HPT nicht aktiv angewendet. Aus der Forschungsarbeit und den Ergebnissen im wissenschaftlichen Bereich ergeben sich so genannte Hochschulrankings, die regelmäßig durchgeführt und publiziert werden, was durchaus eine Art Benchmarking darstellt.

3.4.8 FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse

Die FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse) ist eine Methode, Fehler frühzeitig zu ermitteln und somit Kosten zu vermeiden und Kunden nicht zu verärgern. Bei der FMEA werden die aus Fehlern entstehenden Risiken bewertet und Gegenmaßnahmen zur Vermeidung dieser Fehler entwickelt [The05]. Ziel dabei ist eine konsequente, dauerhafte Beseitigung von Fehlern durch Erkennen ihrer Ursachen und Einführung von wirksamen Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von weiteren Fehlern. Wiederholfehler sollen durch Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse vermieden werden [Din06], [FME01], [DGQ04].

Eine FMEA besteht aus den Elementen:

- Fehleranalyse
- Risikoanalyse
- Lösungsmöglichkeiten und Abstellmaßnahmen
- Ergebnisbeurteilung

Die FMEA ist ein sehr wirksames Mittel für ein rechtzeitiges Ausschalten von Fehlern bei Produkten, die in Serienfertigung gehen sollen. Um eine FMEA durchzuführen sind genaue Kenntnisse der Prozesse, Verfahren und Materialien, die benötigt werden, erforderlich. Ein universitäres Labor ist darauf ausgerichtet neue Prozesse und Materialien zu testen, weshalb meistens nicht genügend genaue Kenntnisse vorliegen, um eine FMEA durchführen zu können. FMEA findet in einer Forschungsumgebung nur schwer Anwendung, da FMEA auf die Vermeidung von Fehlern beim Kunden abzielt und ein Forschungslabor kein kundenspezifisches Produkt entwickelt. Auch kann im Regelfall keine Aussage zur Bewertung des Risikos von Fehlern im Labor gemacht werden, da neuartige Prozesse und Produkte entwickelt werden, bei denen erst später untersucht werden kann, durch welchen Produktionsprozess Fehler entstanden sein könnten.

Wenn ein QMS etabliert ist, können evtl. Teile einer FMEA-Strategie verwendet werden. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.8 kurz betrachtet.

3.4.9 Six-Sigma

Six Sigma ist eine Qualitätsstrategie, die eine kontinuierliche Verbesserung der Unternehmensleistung als Ziel hat. Dafür werden verschiedene Qualitätsmethoden verwendet.

Die theoretische Grundlage, also die Prozessbetrachtungen sind immer auf das Modell der Normalverteilung mit Variation eines Merkmals bezogen. Six Sigma bezeichnet die Fähigkeit eines Prozesses, Merkmale zu erzeugen, die so geringe Schwankungen aufweisen, dass die Standardabweichung σ der erzeugten Merkmale des Prozesses ein Sechstel der Toleranzbreite beträgt: $\sigma = 1/6$ Toleranzbreite. Das heißt, das Ziel ist eine Fehlerhäufigkeit von 3,4 Fehlern pro Million Möglichkeiten (FpMM) bzw. eine Zielerreichung von 99,999998%. Seit einigen Jahren hat sich diese Grenze noch erweitert und man spricht von 8σ oder 10σ .

Mit Six Sigma können sprunghafte Verbesserungen der kundenrelevanten Unternehmensprozesse erzielt werden und Fehlerquoten deutlich gesenkt werden. Ziel von Six Sigma sind immer stabile Prozesse auf sehr hohem Qualitätsniveau, um Kundenzufriedenheit zu steigern und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

Die Organisation von Six Sigma wird oft als Pyramide dargestellt, in der von unten nach oben die Verantwortung und Qualifikation der Mitarbeiter steigt. Die Verbesserungsstrategie, die Six Sigma für Prozesse vorschlägt, ist sehr stark an den PDCA-Kreis von Deming angelehnt und untergliedert sich in fünf Phasen (DMAIC) [The05]:

- Definieren
- Messen
- Analysieren
- Verbessern
- Überprüfen

Six Sigma bezieht sich auf die gesamte Unternehmensstruktur und -kultur und zielt auf Umsatzerhöhung und Kundenzufriedenheit ab. Diese Ziele gelten für ein universitäres Labor nicht. Allerdings sind durchaus Qualitätsmethoden, die für Six Sigma verwendet werden in einem Labor ebenfalls anwendbar (siehe Kapitel 4).

Für einen detaillierteren Überblick über Six Sigma und dessen Anwendung sei auf [The05], [Kro03] oder [Mas07] verwiesen.

4 Qualitätsmethoden zur Umsetzung am HPT

4.1 Lasten-/Pflichtenheft

4.1.1 Grundsätzliches

Aufgabe eines QMS ist es, bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses für alle Bereiche methodische Unterstützung zu bieten. Ziel ist die Erfüllung von Kundenwünschen und das Erreichen von niedrigen Entwicklungs- und Herstellungskosten für das Produkt.

Zur Erfüllung dieser Aufgabe werden Methoden aus dem Projektmanagement angewendet, z.B. die Anforderungsanalyse. Hier werden die Forderungen an Produkte und die Herstellbarkeit im Unternehmen untersucht. Weitere wichtige Instrumente sind das Lasten- und das Pflichtenheft. Das Lastenheft dokumentiert alle Forderungen, Bedürfnisse und Erwartungen an das zu entwickelnde Produkt bezüglich Liefer- und Leistungsumfang.

Im Pflichtenheft werden die Kundenanforderungen in Entwicklungs- und Produktionsparameter umgesetzt. Dabei werden alle Bedingungen für die Entwicklung des Produktes berücksichtigt. Das Pflichtenheft ist sehr umfangreich und muss alle Angaben zum Produkt enthalten, damit die Entwicklung sofort beginnen kann. Leistungsforderungen sind z.B. technische Parameter, Stückzahlen, Liefertermin oder Kosten und Qualität [Lin05], [Mas07].

4.1.2 Umsetzung am HPT

Ein Lasten- oder Pflichtenheft enthält in der Regel detaillierte Beschreibungen, welche Eigenschaften ein Produkt haben muss und welche Wünsche von Kunden an die Eigenschaften des Produktes bestehen. Im universitären Umfeld muss eine etwas andere Definition für ein Lasten- oder Pflichtenheft erfolgen. Als Kunden können hier der Professor, Drittmittelgeber und auch die Doktoranden, die das Projekt bearbeiten, gesehen werden. Auch werden die entstandenen neuartigen Produkte nicht „ausgeliefert“, da die Forschungsergebnisse als Basis für weitere Forschung dienen. In diesem Sinne ist ein Lasten- und Pflichtenheft für die universitäre Umgebung die Beschreibung des Projekts mit einem (detaillierten) Arbeitsplan, der beschreibt, was zu bearbeiten ist. Wenn das Projekt aus Fördergeldern bezahlt wird, existiert eine schriftliche Projektbeschreibung. Die Genehmigung der Gelder setzt voraus, dass sich die Forschung möglichst genau an die Projektbeschreibung hält. Bei Projekten, die nicht aus externen Quellen gefördert werden (ca. 1/4 der Projekte) existiert meist keine detaillierte Projektbeschreibung, sondern eine mündliche Absprache zwischen Doktorand und Professor. Hier besteht für den Doktoranden die Aufgabe, für sich selbst eine Projektbeschreibung mit zeitlichen Vorgaben zu erstellen, trotzdem aber die größere Freiheit für individuelle Ideen nicht zu vernachlässigen.

Bei universitären Projekten besteht ein Risiko, dass die Forschungsarbeit zu nicht vorhersehbaren, ungewollten oder keinen Ergebnissen führt. Trotzdem werden die aus intensiven Vorüberlegungen zur Umsetzbarkeit entstandenen Projektbeschreibungen möglichst eingehalten. Ziel dabei ist, zuverlässige Forschungsergebnisse zu erreichen und die Erwartungen des Professors zu erfüllen, was von allen am HPT bearbeiteten Projekten erfüllt wird.

4.2 Prüfplanung und Prüfmittelauswahl

4.2.1 Grundsätzliches

Prüfmittelmanagement ist ein essentieller Bestandteil von QM-Systemen und beinhaltet alle Tätigkeiten, die in Zusammenhang mit Prüfmittelüberwachung stehen. Ein Prüfmittel ist der Ausdruck für alle im Unternehmen vorhandenen Geräte zur Messung und Überwachung der Qualitätsmerkmale der Produkte [Die06], [Lin05].

Ein Messmittel ist ein Oberbegriff und beinhaltet ein „Messgerät, Software, Messnormal, Referenzmaterial oder apparative Hilfsmittel oder eine Kombination davon, wie sie zur Realisierung eines Messprozesses erforderlich sind [Din05]“.

Ziel des Prüfmittelmanagements ist es, sicherzustellen, dass nur Prüfmittel zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden, die selbst auf Qualitätsfähigkeit geprüft und überwacht sind. Durch das systematische Einhalten einiger Schritte kann sichergestellt werden, dass die verwendeten Prüfmittel geeignet, ständig einsatzbereit und zuverlässig sind [Lin05]:

1. Prüfmittelplanung:

Als Prüfplanung werden alle Tätigkeiten bezeichnet, die für die Vorbereitung von Prüfungen nötig sind. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass das Prüfmittel passend zur Prüfaufgabe und den geforderten Qualitätszielen gewählt wird.

2. Prüfmittelbeschaffung:

Prüfmittelbeschaffung bezeichnet den Einkauf und die rechtzeitige Bereitstellung der ausgewählten Prüfmittel.

3. Prüfmittelwartung und -instandhaltung:

Regelmäßige Wartungsarbeiten stellen die Einsatzbereitschaft der Prüfmittel sicher.

4. Prüfmittelverwaltung:

Die Überwachung der ständigen Einsatzfähigkeit der Prüfmittel wird durch die Prüfmittelverwaltung sichergestellt.

Laut [DGQ03] sollen folgende Teilaufgaben beachtet werden:

- Erfassung und Registrierung aller Prüfmittel
- Einteilung aller vorhandenen Prüfmittel in *überwachungspflichtig* und *nicht überwachungspflichtig*
- Vorgaben für die Kennzeichnung der Prüfmittel
- Verwaltung der Prüfmitteldaten, Prüf-(Kalibrier-)Anweisungen und Nachweisdokumente

Ein Prüfmittelverwaltungssystem dient hierbei zur Erfassung und Verwaltung aller Daten. Dabei hängt es davon ab, wie viele und welche Prüfmittel vorhanden sind, ob ein rechnergestütztes oder ein papiergestütztes System sinnvoll ist.

Einer der wichtigsten Punkte bei der Prüfmittelüberwachung ist die Kalibrierung der Geräte. Dabei wird in *externe* und *interne* Kalibrierung unterschieden. Externe Kalibrierung wird von einem Kalibrierlabor durchgeführt, während eine interne Kalibrierung vom Unternehmen und der zuständigen Abteilung durchgeführt werden kann. Die Kalibrierintervalle sind entweder

vom Hersteller vorgegeben oder sollten von Experten festgelegt werden, wobei bei der Entscheidung auf die benötigte Genauigkeit Rücksicht genommen werden sollte.

Fehlerhafte Prüfmittel müssen sofort überprüft und repariert, ausgesondert oder entsorgt werden. Sie dürfen so lange keineswegs weiterhin verwendet werden [Die06], [Lin05].

4.2.2 Prüfplanung

Die Planung der Überwachung und Prüfung der einzelnen Schritte in der Produktion ist ein essentieller Bestandteil des QM. Dabei werden Prüfschritte, Vorgehensweisen und Prüfverfahren sowie Prüfanweisungen und Prüfpläne erarbeitet. Ein Prüfplan umfasst alle Schritte und Anweisungen, die zur Prüfung nötig sind, z.B. auch Prüfperson, Prüfumfang etc. [Lin05], [Die06], [Old07].

Voraussetzung für die Erstellung und Durchführung von Prüfplänen ist eine vorhergehende Qualitätsplanung, die Qualitätsmerkmale und -forderungen festlegt.

Eine Notwendigkeit zur Prüfung liegt vor, wenn sich Fehler drastisch auf die Qualität des Produktes auswirken, eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit während der Produktion besteht oder die Möglichkeit zur Entdeckung von Fehlern sehr gering ist.

Nachdem für einen Prozess-Schritt festgelegt wurde, dass eine Prüfung stattfinden muss, wird in vier Schritten vorgegangen:

1. Planung der Prüfung: Objektive Kriterien zum Verfahren werden festgelegt.
2. Beauftragung der Prüfung: Entscheidung, dass geprüft wird.
3. Durchführung der Prüfung: Ausführung der Prüfung nach Prüfplan und Datenerfassung.
4. Auswertung der Prüfung: Auswertung der Daten und der Dokumentation in Bezug auf Einhalten der Spezifikationen.

Die Prüfplanung ist ein Methode zur Systematisierung und Vereinheitlichung von Prüfverfahren. Es werden Prüfmerkmale nach verschiedenen Kriterien festgelegt und geeignete Prüfmittel ausgewählt.

Bevor ein Prüfmittel gewählt werden kann, müssen die Prüfmerkmale und Parameter festgelegt werden: Merkmale eines Produktes sind z.B. Material, Maße oder Funktion.

Wenn das zu prüfende Merkmal festgelegt wurde, werden die zu messenden Parameter bestimmt. Diese Parameter sind so zu wählen, dass der Wert, der am kritischsten ist, gemessen wird. Folgende Parameter müssen festgelegt werden [Lin05]:

- was? Beschreibung des Prüfmerkmals
- wie oft? Prüfhäufigkeit
- wie viel? Prüfumfang
- womit? Prüfmittel
- wann? Prüfzeitpunkt
- durch wen? Prüfer
- wo? Prüfort
- wie? Prüfanweisung
- Prüfdaten? Dokumentation und Auswertung

4.2.3 Prüfmittelauswahl

Der Prüfplan stellt die Grundlage für eine erfolgreiche Prüfung dar. Zur Durchführung dieser Prüfung muss ein geeignetes Prüfmittel gewählt werden (Prüfmittelauswahl). Dabei hängt die Qualität der Prüfung entscheidend von der Wahl des Prüfmittels ab.

Die Auswahl des Prüfgerätes erfolgt unter Berücksichtigung des zu messenden Merkmals und der Parameter und erfolgt nach technischen/technologischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Kriterien [Lin05], [Die06], [Kam99] .

Technische/Technologische Kriterien

Die primären Anforderung an das Prüfgerät sind technischer bzw. technologischer Art und werden dem Prüfplan entnommen. Sie können sowohl qualitativ als auch quantitativ (Prüfart) sein und teilen sich zusätzlich auf in:

Prüfprinzip:	Für jedes Merkmal gibt es verschiedene Prüfprinzipien: physikalisch, chemisch etc.
Prüfgröße:	Die physikalische Größe des Prüfmerkmals bestimmt das Prüfverfahren (z.B. Länge, Dicke, elektrische Eigenschaften etc.)
Messbereich:	Der erforderliche Messbereich (Einheit nm, μm , cm etc.) wird vom Toleranzbereich des Merkmals bestimmt.
Messauflösung und -unsicherheit:	Der Messbereich sollte größer als der Toleranzbereich sein und dieselbe Einheit wie der Messbereich oder eine höhere Auflösung haben.

Bei Messungen sollte immer die „Goldene Regel der Messtechnik beachtet werden“ [Lin05]: Für Messungen, in denen die Messunsicherheit U gegenüber der Toleranz des Fertigungsprozesses T_p vernachlässigbar klein sein soll, darf die Messunsicherheit höchstens ein Zehntel der Funktionstoleranz des geprüften Merkmals betragen:

$$\frac{U}{T} \leq 0,1 \quad (1)$$

Organisatorische Kriterien

Neben der Prüfmittelauswahl nach technischen oder technologischen Kriterien sollte auch der Organisationsaufwand, der für die Prüfung anfällt, betrachtet werden. Hierzu zählt, ob das Prüfmittel bereits vorhanden ist oder eingekauft werden muss. Auch sollte geklärt sein, ob eine ausreichende Verfügbarkeit gegeben ist und ob qualifizierte Prüfer für die Bedienung des Geräts abgestellt werden können. Außerdem ist die richtige Wahl der Prüfumgebung wie Raum, Luftfeuchtigkeit oder Reinheit sicherzustellen.

Wirtschaftliche Kriterien

Sollten nach Berücksichtigung von technischen, technologischen und organisatorischen Kriterien noch eine Auswahl an Prüfmitteln bestehen, sollten wirtschaftliche Kriterien zur Auswahl herangezogen werden. Dabei ist die wichtigste Entscheidung, welches der Geräte am besten geeignet ist und gleichzeitig am wenigsten Kosten verursacht. Diese Entscheidung sollte von Experten in Zusammenarbeit mit den zuständigen „Geldgebern“ erfolgen.

4.2.4 Umsetzung am HPT

Die Planung der Messung unterschiedlicher Schritte in der Herstellung sollte von den betreffenden Personen zusammen mit den Prozess-Schritten geplant werden. Bei Forschungsarbeiten muss jeder Schritt überwacht werden, um eine Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten. Auch muss von vorne herein klar sein, ob die gewünschten Parameter gemessen werden können und welches Gerät dafür zur Verfügung steht oder ob Kooperationspartner oder -institute entsprechende Geräte zur Verfügung stellen.

Am HPT stehen unterschiedliche Messgeräte zur Verfügung (siehe Tabelle 3 Seite 17). Die Auswahl der Prüfmittel erfolgt vom jeweiligen Doktoranden unter Beachtung, welches Gerät für die gewünschte Messung passend ist. Dabei sind Neuanschaffungen von Geräten, die nicht für mehrere Arten von Messungen verwendet werden können, meist aus finanziellen Gründen nur sehr schwer durchsetzbar.

Ein Beispiel für ein Messverfahren während des Standard-MOSFET-Prozesses ist die Mikroskop-Kontrolle der belichteten Strukturen nach jedem Lithographie-Schritt (Prozess-Schritte 7.2, 8.3, 9.2, 10.3 und 11.3 in Anhang A) und die Kontrolle der Oxiddicke des Feldoxids und des Gateoxids (Prozess-Schritte 6 und 8.7 in Anhang A). In Anhang B werden die zugehörigen Laufzettel dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung zu Messverfahren kann aufgrund der Komplexität der einzelnen Verfahren nicht gegeben werden.

Alle vorhandenen Geräte werden regelmäßig gewartet und auf Tauglichkeit geprüft, was im Regelfall von den Geräteverantwortlichen übernommen wird. Bei größeren Problemen oder vorgeschriebenen Inspektionen, z.B. Kalibrierung, werden entsprechende Firmen beauftragt.

Die Verwaltung der Prüfmittel, also die Inventarisierung, wird durch die Zentrale Verwaltung der Technischen Universität München durchgeführt. Hierbei erhält jedes Gerät eine spezielle Nummer und wird in einem elektronischen System zentral gespeichert. Am HPT werden die Unterlagen zu den jeweiligen Geräten (Bedienungsanleitungen, Wartungstermine etc.) in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) des HPT abgelegt.

Am HPT wurde das Ellipsometer als überwachungspflichtiges Messmittel eingestuft, da bei diesem Gerät eine Xenonlampe langsam an Leistung verlieren kann und dadurch die Messergebnisse verfälscht werden können. Zur Überprüfung des Ellipsometers wird ein zum Gerät gehörender Referenzwafer in regelmäßigen Abständen eingelegt, gemessen und in eine Qualitätsregelkarte (siehe Kapitel 4.4) eingetragen. Sind die gemessenen Werte in der

vorgegebenen Toleranz, kann das Ellipsometer als funktionsfähig betrachtet werden. Alle anderen vorhandenen Messgeräte werden bei Bedarf durch Fremdfirmen kontrolliert, kalibriert und repariert.

4.3 Maschinen- und Prozessfähigkeit

4.3.1 Grundsätzliches

Statistische Prozesskontrolle (SPC) dient dazu, fehlerhafte Einheiten nicht am Ende der Fertigung durch Sortieren herauszufinden, sondern schon während des laufenden Prozesses ohne Fehler zu arbeiten (Null-Fehler-Produktion). Durch die Verwendung von Stichproben zur Prüfung werden hohe Kosten vermieden, da keine 100% Prüfung stattfindet. Deshalb wird SPC vor allem bei der Produktion von größeren Stückzahlen eingesetzt.

Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen dienen zur Feststellung, ob ein Prozess unter normalen Bedingungen, d.h. im Alltag, stabil und „fähig“ ist. Dabei wirken zufällige und systematische Einflüsse auf den Prozess, so dass ein an einem Produkt gemessenes Qualitätsmerkmal von seinem Sollwert abweichen kann. Zufällige Einflüsse sind die Summe vieler kleiner Einflüsse, die ständig vorhanden und über die Zeit immer gleich sind, wobei sie die natürliche Streuung bilden und nicht zu beeinflussen sind. Dagegen sind systematische Einflüsse ein oder wenige Haupteinflüsse, die nicht vorhersehbar sind und unregelmäßig auftreten, z.B. Ausfall von Geräten. Ihre Ursachen können ermittelt und müssen abgestellt werden.

Mittels der Statistischen Prozesskontrolle (SPC) wird ein Prozess durchgängig beobachtet und ggf. nachkorrigiert, wodurch Ausschuss vermieden werden kann, bevor er überhaupt entsteht. Das Verhalten eines Prozesses kann mit Hilfe von Stichproben über statistische Größen wie Mittelwert und Streumaße (Standardabweichung, Spannweite) gemessen werden. Aus diesem Maßen werden in einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung MFU und einer Prozessfähigkeitsuntersuchung PFU Fähigkeitskennzahlen, so genannte Fähigkeitsindizes C_m und C_p gebildet. Der Buchstabe C steht hierbei für das englische Wort *capability*. Diese Kennzahlen spiegeln den Grad an Stabilität und Beherrschtheit des Prozesses wider und beschreiben die Größe und die Lage der Streuung zu den Toleranzen (Vorgabewerten) [Old07], [Rin99].

Sind die Fähigkeitskriterien nicht erfüllt, muss mit Hilfe von anderen Methoden der Prozess untersucht und verbessert werden. Ist der Prozess schließlich fähig, wird mit Hilfe von Qualitätsregelkarten (QRK, siehe Kapitel 4.4) die durchgehende Prozessbeobachtung und -regelung durchgeführt. Treten dabei wieder systematische Fehler auf, muss der Prozess erneut untersucht und verbessert werden [The05].

Ein Prozess kann nur beurteilt werden, wenn er beherrscht ist. Das heißt, dass sich die zu untersuchenden Merkmale zufällig und nicht systematisch verhalten. Systematische Fehler müssen entfernt werden, bevor eine Entscheidung getroffen werden kann, ob eine Maschine im tolerierbaren Bereich arbeitet. Die zufälligen Größen lassen dann schließlich die Genauigkeit der Maschine erkennen und sind (mit wenigen Ausnahmen) normalverteilt.

Zur Durchführung von Fähigkeitsuntersuchungen (MFU und PFU) hat sich folgende Schrittfolge bewährt [Lin05]:

1. Qualitätsmerkmal festlegen
2. Vorlauf spezifizieren und Testserie durchführen
3. Prozess-Stabilität über \bar{x} - und σ -QRK untersuchen
4. Verteilungsmodell festlegen
5. Berechnungsmethode je nach Verteilungsmodell auswählen
6. Fähigkeitskennzahlen berechnen
7. Fähigkeitskennzahlen auf Grenzbedingungen der Regelwerke prüfen
8. Bewertung der Fähigkeit vornehmen
9. Maßnahmen ableiten:
 - entweder Prozess annehmen
 - oder Prozessverbesserungen vornehmen
 - oder Prozess abbrechen

Dabei kann Punkt 3 (Kontrolle mittels QRK) ebenso nach der Berechnung der Fähigkeitskennzahlen erfolgen, da diese schon mit den Werten aus dem Vorlauf berechnet werden können.

Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen werden zusätzlich noch in Kurzzeituntersuchungen vor Serienanlauf (Maschinenfähigkeit und vorläufige PFU) und in Langzeituntersuchungen nach Serienanlauf (Prozessfähigkeit) unterschieden [Lin05].

4.3.1.1 MFU - Maschinenfähigkeitsuntersuchung

Die Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) ist Grundlage für die Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU). In der Praxis wird die MFU auch im Rahmen von Maschinenabnahmen und periodischen, qualitativen Überprüfungen der Maschinen eingesetzt [Lin05].

Eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung ist eine Kurzzeituntersuchung an Geräten, die ausschließlich die Merkmalsstreuung, die vom Gerät ausgeht, betrachtet. Das heißt, es wird die Qualitätsfähigkeit einer Maschine oder Anlage unter Idealbedingungen beschrieben. Dabei müssen die Randbedingungen und äußeren Einflüsse konstant gehalten werden, d.h. alle anderen prozessbestimmenden Einfluss-Parameter zeigen keine Auswirkungen [Her99], [Ulm87].

Basis der Bewertung ist eine einzige große Stichprobe, d.h. mind. 10 Stichproben à 5 Einheiten aus der laufenden Fertigung. Im Sinne der aufwandsgerechten Durchführung der Untersuchung werden statistische Verfahren eingesetzt. Um sicherzugehen, dass die Messwerte der Einzelstichprobe normalverteilt sind, genügt es eine grafische Prüfung durchzuführen, z.B. mittels eines Histogramms.

Die Maschinenfähigkeit wird durch die Kennwerte C_m (Maschinenpotential) und C_{mk} (kritische Maschinenfähigkeit) ausgedrückt. Dabei berücksichtigt C_m nur die Streuung der

Maschine, während C_{mk} zusätzlich noch die Lage des Mittelwertes innerhalb der Toleranz einbezieht und somit die Langzeit-Merkmalstreuung beschreibt.

4.3.1.2 PFU - Prozessfähigkeitsuntersuchung

Sobald die Maschinenfähigkeit sichergestellt ist, kann eine Prozessfähigkeitsuntersuchung stattfinden. Zur Durchführung einer PFU werden k Stichproben mit je n Einheiten über einen regelmäßigen Zeitraum gezogen. Normalerweise wird $k = 25$ und $n = 5$ gewählt, was einer Gesamtzahl von 125 Einheiten entspricht.

Es wird zwischen **vorläufiger Prozessfähigkeitsuntersuchung** und **Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung (Prozessfähigkeit)** unterschieden.

Eine **vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung** wird bei einem Prozess vor Serienfertigungsbeginn durchgeführt. Es wird vorausgesetzt, dass bereits alle Einflussfaktoren für die spätere Serienfertigung bekannt sind, z.B. Mensch, Maschinen, Methoden, Materialien

Die vorläufige Prozessfähigkeit wird durch die Kennwerte P_p (vorläufiges Prozesspotential) und P_{pk} (kritische vorläufige Prozessfähigkeit) ausgedrückt.

Eine **Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung** findet nach Beginn der Serienfertigung statt und dient dazu, die Qualitätsfähigkeit eines Prozesses unter realen Bedingungen zu beurteilen. Diese Untersuchung zieht sich über einen längeren Zeitraum hinweg, z.B. über 20 Tage [Lin05].

Die Langzeit-Prozessfähigkeit wird durch die Kennwerte C_p (Prozesspotential) und C_{pk} (kritische Prozessfähigkeit) ausgedrückt. Dabei berücksichtigt C_p nur die Streuung der Maschine, während C_{pk} zusätzlich noch die Lage des Mittelwertes innerhalb der Toleranz einbezieht und somit die Langzeit-Merkmalstreuung beschreibt.

4.3.1.3 Durchführung von MFU und PFU

Die Maschinen- und Prozessfähigkeitsindizes unterscheiden sich rechnerisch nicht.

Das Prozesspotential C_m , P_p und C_p wird durch das Verhältnis von Toleranz $T =$ Obere Toleranzgrenze (OTG) - Untere Toleranzgrenze (UTG) und den 6σ -Streubereich des Prozesses gekennzeichnet [Her99], [Old07], [Lin05]. Die Toleranzgrenzen werden in der Regel von Kunden bestimmt und von Experten überprüft, da diese die nötige Erfahrung aufweisen, um den Prozess und die möglichen Toleranzgrenzen einschätzen zu können.

Die Berechnungsvorschrift ist für alle Prozesspotentiale gleich und berechnet sich wie folgt (am Beispiel C_p):

Prozesspotential:

$$C_p = \frac{\text{Toleranzbreite}}{\text{Streubreite}} = \frac{OTG - UTG}{6\sigma} \quad (2)$$

Zur Beurteilung der Fähigkeit muss die Lage des Mittelwerts der Verteilung der Merkmale Beachtung finden, weshalb Kennzahlen für die kritische Fähigkeit eingeführt wurden: C_{mk} , P_{pk} und C_{pk} . Auch hier ist die Berechnungsvorschrift für die Kennzahlen gleich (am Beispiel C_{pk}):

Prozessfähigkeit:

$$C_{pk} = \text{Min}[C_{pu}, C_{po}] = \frac{Z_{krit}}{3\sigma} \quad (3)$$

wobei $C_{pu} = \frac{\mu - UTG}{3\sigma}$ und $C_{po} = \frac{OTG - \mu}{3\sigma}$

Die Berechnung der Fähigkeitskennzahlen erfolgt, indem der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ aus der Stichprobe geschätzt werden, wobei immer eine Normalverteilung angenommen wird.

Die Berechnungsvorschriften dazu lauten wie folgt:

Schätzer für Mittelwert μ :

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j \quad (4)$$

mit: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ und n-Stichprobenumfang

Schätzer für Standardabweichung σ :

$$\hat{\sigma} = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k s_j^2} \quad (5)$$

mit $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$

Wenn die Genauigkeit der Maschine groß ist, ist 6σ klein. Damit wird $C_p > 1$.

Wenn die Abweichungen und die Standardabweichung groß sind, dann ist die Toleranz T kleiner als 6σ und die Fähigkeit wird $C_p < 1$.

Sind sowohl T als auch 6σ gleich groß, heißt das, dass die Maschine gerade in der Lage ist, mit einer wahrscheinlichen Fehlerrate von 99,73% zu fertigen.

Wenn die Maschine mit einer wahrscheinlichen Fehlerrate von 99,994% fertigt, also mit 8σ , ist die Formel: $C_p = \frac{T}{8\sigma}$.

Wenn $C_p \geq 1,33$ und $C_{pk} \geq 1,0$ sind, wird das Gerät in der Regel als fähig bezeichnet. Es gibt auch Quellen, nach denen Werte von 1,67 bis zu 2 gefordert werden. Allerdings sind diese Werte von Kundenvorgaben abhängig [Kam99], [Lin05], [Rin99].

4.3.1.4 Zusammenfassung MFU und PFU

Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen sind sehr gut dafür geeignet, zu überprüfen, ob Maschinen und Prozesse grundsätzlich fähig sind und die vorgegebenen Toleranzen einhalten. MFU und PFU sind vor allem für Serienfertigung sehr wichtig, da hier Produkte in sehr großer Stückzahl mit möglichst wenig Fehlern produziert werden müssen.

In einem universitären Labor gibt es keine Serienfertigung und damit nur bedingt genügend viele (Mess-)Werte, um statistisch korrekte Aussagen treffen zu können. Deshalb sind MFU und PFU im universitären Bereich weniger von Bedeutung als in Industrieunternehmen. Trotzdem werden die Vorlaufuntersuchungen, die für MFU und PFU gefordert sind, durchgeführt, um Qualitätsregelkarten führen zu können (siehe Kapitel 4.4). Dabei können auch C_m und C_p berechnet und ihre Werte mit denen, die in der Industrie verlangt werden, verglichen werden. Zur Beurteilung muss allerdings beachtet werden, dass ausschließlich kleine Stichproben zur Verfügung stehen, also statistisch einwandfreie Aussagen schwer zu treffen sind. Außerdem werden die Stichproben nicht aus der laufenden Produktion gezogen, da eine solche nicht existiert. Dennoch kann zumindest der Wert für eine 6σ -Produktion annähernd erreicht werden (siehe Tabelle 6).

In folgender Tabelle werden die Anforderungen an MFU und PFU und die industriell verlangten Sollwerte zur Erreichung einer fehlerfreien Fertigung zusammengefasst, um einen schnellen Überblick zu geben:

Die dargestellten Parameter werden durch Abbildung 11 grafisch verdeutlicht. Die Werte für die Abbildung sind als schematische Darstellung anzusehen und dienen ausschließlich der Veranschaulichung.

Fehlerfreie Fertigung	gute Teile (in %)	Toleranz T	$C_p = T/(6\sigma)$
Nicht möglich	$\leq 99,73$	$\leq 6\sigma$	$\leq 1,0$
Bedingt / problematisch	$\geq 99,73$	$\geq 6\sigma$	$\geq 1,0$
Gegeben / unproblematisch	$\geq 99,994$	$\geq 8\sigma$	$\geq 1,33$
Für erhöhte Anforderungen	$\geq 99,99994$	$\geq 10\sigma$	$\geq 1,67$

Tabelle 6: Anforderungen an MFU und PFU Parameter

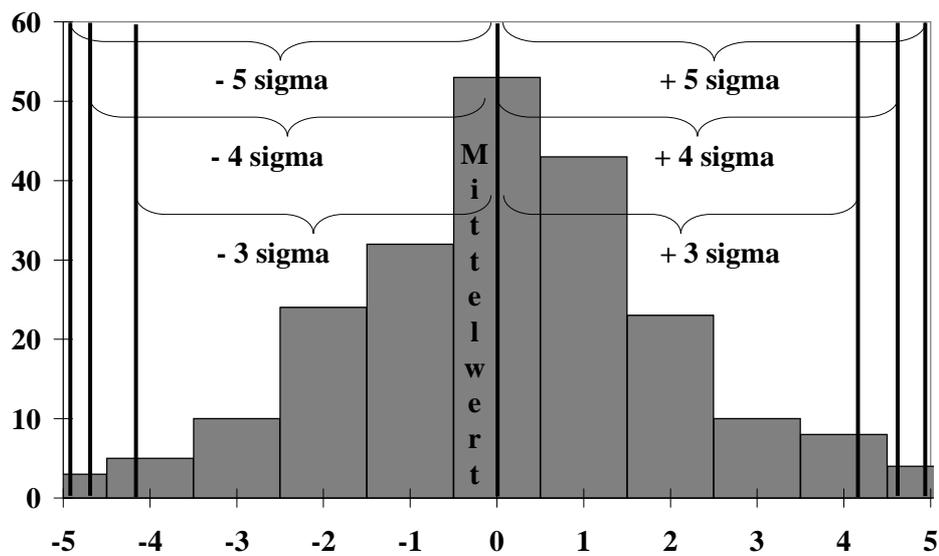


Abbildung 11: Grafische Darstellung der Fähigkeit

4.3.2 Umsetzung von MFU und PFU am HPT

Die Berechnung der Fähigkeitskennzahlen erfolgt im Anschluss an die Vorlaufuntersuchung zur Erstellung von Qualitätsregelkarten QRK. Im folgenden Kapitel (Kapitel 4.4) wird die Vorgehensweise zur Erstellung QRK erläutert. Kapitel 4.4.5 zeigt anhand eines praktischen Beispiels die Vorgehensweise zur Erstellung von QRK sowie die zugehörige Vorlaufuntersuchung und Prüfung auf Fähigkeit des vorgestellten Gerätes.

4.4 Statistische Prozesskontrolle - Qualitätsregelkarten

4.4.1 Grundlagen

Qualitätsregelkarten (QRK) sind ein wichtiges Instrument zur Überwachung eines Prozesses bezüglich seiner Streuung und damit der Qualität. QRK werden im PDCA-Kreis nach Deming in den Bereich Do-Qualitätslenkung eingeordnet (siehe Tabelle 1 Seite 13).

Soll ein QMS in einem Labor neu eingeführt werden, sind QRK eines der ersten Instrumente, die etabliert werden sollten, da sie sehr zügig den IST-Zustand der Geräte anzeigen und somit den wichtigsten Faktor für ein Labor, nämlich die Produktiv-Geräte, charakterisieren. Außerdem sind QRK ein relativ einfach einzusetzendes Mittel mit großer Aussagekraft, was im Folgenden detaillierter dargestellt wird [Bow99], [Che00].

Wird ein Prozess aufgrund der Maschinenfähigkeitsuntersuchung als fähig eingestuft, gilt es den einmal erreichten Zustand aufrecht zu halten oder, wenn möglich, zu verbessern. Qualitätsregelkarten (QRK) sind eine grafische Methode zur Darstellung und ständigen Überwachung eines fähigen Prozesses über einen längeren Zeitraum. Oberstes Ziel ist dabei, festzustellen, ob sich ein laufender Prozess signifikant verändert. Und wenn ja, in welche Richtung die Veränderung erfolgt. Um dies zu signalisieren, werden meist die Prozessparameter „Lage“ und „Streuung“ herangezogen. Allein durch die grafische Darstellung der Messwerte lässt sich das Prozessverhalten und somit die Qualitätsleistung des Prozesses schon sehr gut abschätzen. Ergänzende Auswertungen, gestützt auf die in den QRK aufgenommenen Messwerte, ermöglichen eine aussagekräftige Beurteilung der Qualitätsleistung des zu bewertenden Prozesses [Lin05], [Kam04].

QRK dienen also als Frühwarnsystem bei der Überwachung von Streuung und Qualität des Prozesses. Es wird versucht, zwischen der unvermeidbaren zufälligen Streuung und der auf Störung des Prozesses beruhenden systematischen Abweichung zu unterscheiden. Allerdings ist eine direkte Prozessverbesserung nicht möglich, da QRK nur Fehler und Verbesserungspotential für einen Prozess aufzeigen. Eine Prozessverbesserung kann durch Statistische Versuchsmethodik wie ein Design of Experiments (DoE, Kap. 4.5) erzielt werden.

Zwei unterschiedliche Arten von QRK werden unterschieden (Abbildung 12):

- Shewhart-QRK:
Hier wird überwacht, ob ein Prozess „beherrscht“ ist, d.h. die Werte, die in die Karten eingetragen werden, streuen zufällig.
- modifizierte Shewhart-QRK oder Annahme-QRK:
Hier wird überwacht, ob ein Prozess einen zu hohen Anteil an Werten außerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs hat.

Shewhart-QRK werden zusätzlich eingeteilt nach der Unterscheidung der Art des überwachten Merkmals in qualitative und quantitative QRK (siehe Abbildung 12).

Die erfassten Messwerte (z.B. Anzahl fehlender Einheiten, Anzahl Fehler je Einheit, Urwerte, Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen und Spannweite von Stichproben) werden zur Lage- und Streuungsbeurteilung über der Zeit dargestellt und mit Grenzlinien (sog. Eingriffsgrenzen) verglichen. Anhand dieser Vergleiche kann eine Aussage über die Stabilität der Pro-

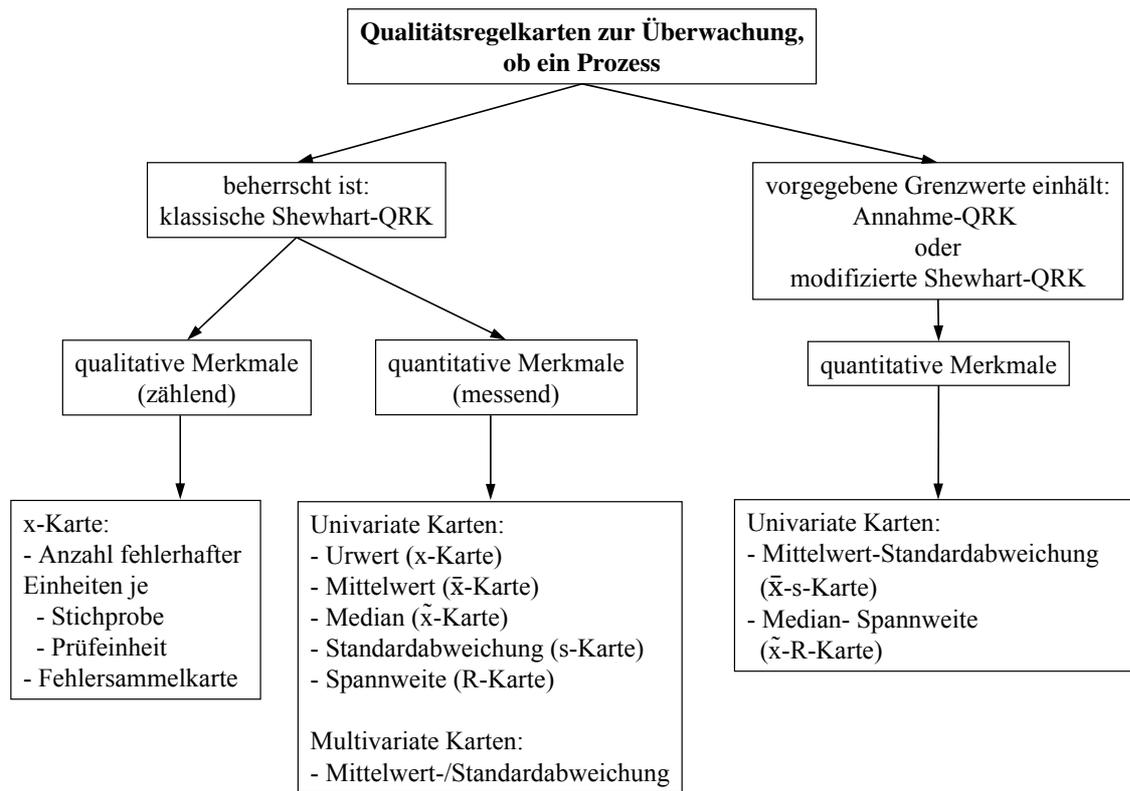


Abbildung 12: Arten von QRK

zesse sowie der Signifikanz der Veränderungen getroffen werden.

Bei QRK für qualitative Merkmale wird eine Zählung der fehlerhaften Einheiten in der Stichprobe vorgenommen. Die Fehlerzahl wird in die QRK eingetragen und mit den im Vorlauf berechneten Eingriffs- und Warngrenzen verglichen.

Bei QRK für quantitative Merkmale werden die Qualitätsmerkmale gemessen und nach ihrer Lage bezüglich Mittellinie und Grenzen beurteilt [Kam04], [Lin05], [Hei64].

Vorgehen zur Erstellung von QRK

Grundsätzlich sollte das Vorgehen zur Erstellung von QRK immer folgende Schritte beinhalten:

1. Sind die zu kontrollierenden Merkmale des Prozesses qualitativ oder quantitativ?
2. Dies führt zur Entscheidung, welche Art von QRK in Frage kommt (Kapitel 4.4.2).
3. Durchführung einer Vorlaufuntersuchung zur Schätzung der Verteilungsparameter μ und σ (Kapitel 4.4.5.3).
4. Daraus Berechnung der Mittellinie und der Grenzen der gewählten QRK (Kapitel 4.4.2).

Aufbau von QRK

Grundsätzlich ist der Aufbau von QRK immer gleich (siehe Abbildung 13). Zur Darstellung der Qualitätsregelkarte wird auf der horizontalen Achse alternativ die Nummer der Stichprobe, der Zeitpunkt der Stichprobenentnahme oder andere eindeutig zuweisbare Informationen zur Stich-

probe aufgetragen. Bei manuell geführten Karten werden 25 bis 30 Stichproben dargestellt. Bei kontinuierlich veränderlichen Merkmalen bestimmt der jeweilige Kennwert die Skalierung der Ordinate. In Tabelle 7 werden die einzelnen Komponenten aus Abbildung 13 erläutert.

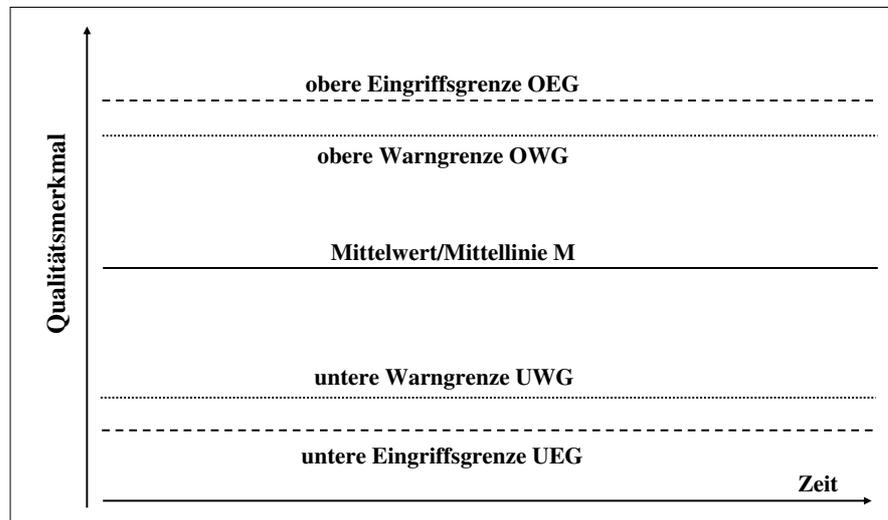


Abbildung 13: Grundsätzlicher Aufbau von QRK

Y-Achse:	Auf der Y-Achse wird das zu kontrollierende Qualitätsmerkmal aufgetragen. Meist sind dies Messergebnisse.
X-Achse:	Auf der X-Achse wird der Zeitpunkt der Messung zum zugehörigen Y-Wert aufgetragen.
Mittellinie M:	Als Mittellinie M wird (meist) der aus den Vorlaufuntersuchungen berechnete Mittelwert μ eingetragen (siehe Beschreibung der QRK in den folgenden Kapiteln).
OEG/UEG:	Untere und Obere Eingriffsgrenze: „In eine Qualitätsregelkarte eingetragene Höchst- oder Mindestwerte, bei deren Über- oder Unterschreitung eine Untersuchung der Ursache und gegebenenfalls eine Korrektur des Prozesses nötig ist. Die Berechnung der Eingriffsgrenzen erfolgt auf Basis des 99%-Zufallsstrebereichs“ [Lin05]
OWG/UWG:	Untere und Obere Warngrenze: „In eine Qualitätsregelkarte eingetragene Höchst- oder Mindestwerte, bei deren Über- oder Unterschreitung der Prozess mit einer erhöhten Aufmerksamkeit zu beobachten ist. Die Berechnung der Warngrenzen erfolgt auf Basis des 95%-Zufallsstrebereichs“ [Lin05]

Tabelle 7: Komponenten von QRK

4.4.2 Arten von QRK für quantitative Merkmale

Im Folgenden werden die in Abbildung 12 dargestellten QRK für quantitative Merkmale kurz beschrieben. Da für diese Arbeit keine QRK für qualitative Merkmale verwendet wurden, werden diese hier nicht behandelt. Für ausführliche Informationen zu QRK sei auf [Lin05], [Tim04], [Kam04] und [Tra00] verwiesen.

Zur Berechnung der Eingriffs- und der Warn Grenzen sowie der Mittellinie werden der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ benötigt.

Der Mittelwert μ wird mittels des Schätzers $\hat{\mu}$ aus Gleichung 4 berechnet. Ebenso die Standardabweichung σ , die mittels des Schätzers $\hat{\sigma}$ aus Gleichung 5 berechnet wird.

Urwert-Karte oder x-Karte

Die Urwert- oder Extremwert-Karte überwacht simultan Lage und Streuung, weshalb es nicht nötig ist, eine s-Karte (siehe Seite 48) zu führen. Sie reagiert sensitiv auf eine Veränderung sowohl des Erwartungswerts μ als auch auf σ . Allerdings kann sie nur eine Vergrößerung von σ anzeigen.

Es werden die Grenzen des symmetrisch um μ liegenden Intervalls ermittelt, in dem sich mit 99%iger Wahrscheinlichkeit alle n Werte einer Stichprobe des Umfangs n befinden.

Die Eingriffsgrenzen können rechnerisch ermittelt werden:

Obere bzw. Untere Eingriffsgrenze OEG / UEG:

$$OEG = \mu + E_E \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UEG = \mu - E_E \cdot \sigma \quad (6)$$

Obere bzw. Untere Warn Grenze OWG / UWG:

$$OWG = \mu + E_W \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UWG = \mu - E_W \cdot \sigma \quad (7)$$

Mittellinie M:

$$M = \mu \quad (8)$$

Der Mittelwert μ sowie die Standardabweichung σ sind aus der Vorlaufuntersuchung bekannt. E_E und E_W sind Konstanten und können aus der Verteilungsfunktion der Normalverteilung berechnet werden (siehe Anhang F oder z.B. [Tim04], [Lin05]). Die Berechnung wird hier nicht aufgeführt, da es Tabellen für diverse Stichprobengrößen gibt, aus denen die Werte abgelesen werden können (siehe z.B. [Tim04]).

Die Urwert-Karte hat den Vorteil, dass sie sehr einfach zu führen ist. Es gibt keine komplizierten Berechnungen, da die gemessenen Werte direkt in die Karte eingetragen werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass alle Messwerte eingetragen und damit dokumentiert werden. Als Nachteil kann gesehen werden, dass eine normalverteilte Fertigung vorausgesetzt wird, was nicht unbedingt realistisch ist. Außerdem ist die Karte relativ unempfindlich und kann sehr schnell unübersichtlich werden, wenn viele Messwerte vorhanden sind [Die03].

Median-Karte oder \tilde{x} -Karte

Die Median- oder Zentralwert-Karte dient zur Überwachung der Fertigungslage μ . Der Median (Zentralwert) \tilde{x} wird in die QRK aus Stichproben des jeweils gleichen Umfangs n eingetragen. Die Einriffs- und Warngrenzen können wieder berechnet werden. Die zugehörigen Konstanten C_E und C_W können berechnet oder entsprechenden Tabellen entnommen werden (siehe siehe Anhang F oder z.B. [Tim04]). Mittelwert und Standardabweichung sind wiederum aus Vorlaufuntersuchungen bekannt.

Die Grenzen berechnen sich wie folgt:

Obere bzw. Untere Eingriffsgrenze OEG / UEG:

$$OEG = \mu + C_E \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UEG = \mu - C_E \cdot \sigma \quad (9)$$

Obere bzw. Untere Warngrenze OWG / UWG:

$$OWG = \mu + C_W \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UWG = \mu - C_W \cdot \sigma \quad (10)$$

Mittellinie M:

$$M = \mu \quad (11)$$

Der Vorteil der Median-Karte ist, dass sie einfach zu führen ist, da die Zentralwerte leicht bestimmt werden können. Die Mediankarte ist allerdings nicht so empfindlich auf Störungen wie die Mittelwertkarte und kann, wie die Urwertkarte, schnell unübersichtlich werden [Die03].

Spannweitenkarte oder R-Karte

Die Spannweitenkarte dient zur Überwachung der Streuung bzw. der Gleichmäßigkeit des zu überwachenden Prozesses, d.h. sie überwacht die Standardabweichung σ . Eingetragen wird die Spannweite R (von engl. range) aus Stichproben des jeweils gleichen Umfangs n . Die Grenzen können wiederum berechnet oder die Werte für D_{OEG} und D_{UEG} aus Tabellen entnommen werden (siehe siehe Anhang F oder z.B. [Tim04]).

Die Grenzen berechnen sich wie folgt:

Obere bzw. Untere Eingriffsgrenze OEG / UEG:

$$OEG = D_{OEG} \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UEG = D_{UEG} \cdot \sigma \quad (12)$$

Obere bzw. Untere Warngrenze OWG / UWG:

$$OWG = D_{OWG} \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UWG = D_{UWG} \cdot \sigma \quad (13)$$

Mittellinie M:

$$M = d_n \cdot \sigma \quad (14)$$

Die Spannweiten-Karte wird meist zusammen mit der Median-Karte verwendet.

Mittelwert-Karte oder \bar{x} -Karte

Die Mittelwert-Karte dient zur Überwachung des Mittelwertes des Prozesses oder der sog. Fertigungslage μ . In die Karte wird der Mittelwert \bar{x} aus Stichproben des jeweils gleichen Umfangs n eingetragen. Die Grenzen können wiederum berechnet oder die Werte für A_E und A_W aus Tabellen entnommen werden (siehe siehe Anhang F oder z.B. [Tim04]), [Pha06], [Hei64]).

Die Grenzen berechnen sich wie folgt:

Obere bzw. Untere Eingriffsgrenze OEG / UEG:

$$OEG = \mu + A_E \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UEG = \mu - A_E \cdot \sigma \quad (15)$$

Obere bzw. Untere Warngrenze OWG / UWG:

$$OWG = \mu + A_W \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UWG = \mu - A_W \cdot \sigma \quad (16)$$

Mittellinie M:

$$M = \mu \quad (17)$$

Die Mittelwert-Karte wird meist zusammen mit der Standardabweichungs-Karte verwendet. Der Vorteil der Mittelwertkarte ist, dass sie empfindlicher ist als die Median-Karte und dass Abweichungen der Verteilungsform von der Normalverteilung bei weitem nicht so kritisch sind, wie bei der Urwertkarte. Außerdem ist die Mittelwert-Karte ideal für den rechnergestützten Einsatz. Ein Nachteil dieser Karte ist, dass die Berechnung des Mittelwertes manuell sehr aufwändig ist. Außerdem werden Einzelwerte nicht dokumentiert, was bei rechnerunterstützten Systemen allerdings nicht kritisch ist, da hier meist alle Werte gespeichert werden [Tim04], [Lin05].

Eine Kombination aus Mittelwert- und Standardabweichungskarte wird wegen ihrer hohen Aussagekraft in der Praxis meist verwendet. Allerdings ist dies nur zu empfehlen, wenn die Auswertung rechnergestützt ist.

Standardabweichungskarte oder s-Karte

Die Standardabweichungskarte dient ebenso wie die Spannweitenkarte zur Überwachung der Gleichmäßigkeit, also der Standardabweichung σ , eines Prozesses. Es werden die Standardabweichungen der Stichproben jeweils gleichen Umfangs n in die Karte eingetragen. Die Grenzen können wiederum berechnet oder die Werte für B_{OEG} und B_{UEG} aus Tabellen entnommen werden (siehe siehe Anhang F oder z.B. [Tim04]).

Die Grenzen berechnen sich wie folgt:

Obere bzw. Untere Eingriffsgrenze OEG / UEG:

$$OEG = B_{OEG} \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UEG = B_{UEG} \cdot \sigma \quad (18)$$

Obere bzw. Untere Warngrenze OWG / UWG:

$$OWG = B_{OWG} \cdot \sigma \quad \text{bzw.} \quad UWG = B_{UWG} \cdot \sigma \quad (19)$$

Mittellinie M:

$$M = a_n \cdot \sigma \quad (20)$$

Die Spannweiten-Karte wird meist zusammen mit der Mittelwert-Karte verwendet.

4.4.3 Bewertung von QRK

Wenn bei einer Urwertkarte wenigstens ein Urwert außerhalb der Eingriffsgrenzen liegt, bei einer Median-Karte der Wert \tilde{x} außerhalb der Eingriffsgrenzen liegt oder bei einer Mittelwert-Karte der Wert \bar{x} außerhalb der Eingriffsgrenzen liegt, erfolgt ein Eingriff in den Prozess [Tim04] und [Lin05]. Außerdem kann durch die Betrachtung von mehreren aufeinanderfolgenden Messungen eine so genannte Trendanalyse der QRK stattfinden. Dabei sind Kriterien definiert worden, durch die nicht beherrschte Prozesse identifiziert werden können.

Zusammengefasst heißt dies, dass ein Prozess genauer betrachtet werden sollte, wenn

- der Mittelwert die Eingriffsgrenzen über- oder unterschreitet
- 7 aufeinanderfolgende Punkte auf der gleichen Seite des Durchschnitts sind (Run)
- 7 oder mehr aufeinanderfolgende Punkte eine zunehmende oder abnehmende Tendenz aufweisen (Trend)
- wiederkehrende Gänge im Verlauf der Messwerte auftreten (Schwingung)
- im mittleren Drittel von OEG-UEG deutlich mehr oder weniger als 68% aller Messwerte liegen (Middle Third)

Abbildungen 14 bis 19 veranschaulichen diese Beschreibungen.

Die Anzahl der Punkte (bei Trend, Run, Schwingung, Middle Third) ist festgelegt und der mathematische Hintergrund dazu wird z.B. in [Pfe96] oder [Die03] genauer erklärt.

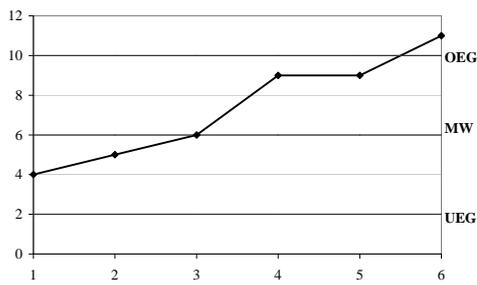


Abbildung 14: Trends bei QRK: Mittelwert außerhalb der Grenzen

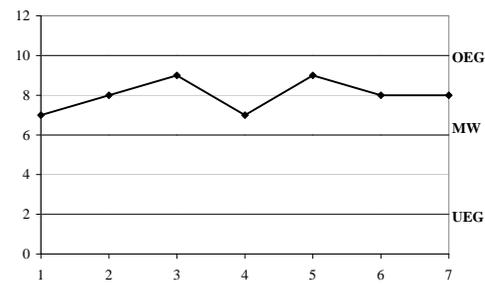


Abbildung 15: Trends bei QRK: Run

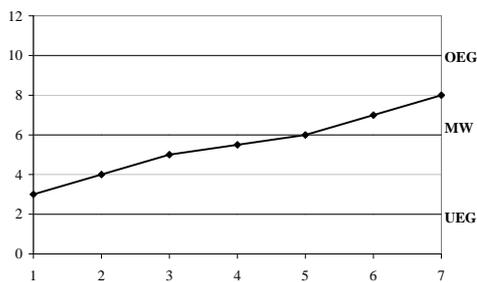


Abbildung 16: Trends bei QRK: Trend

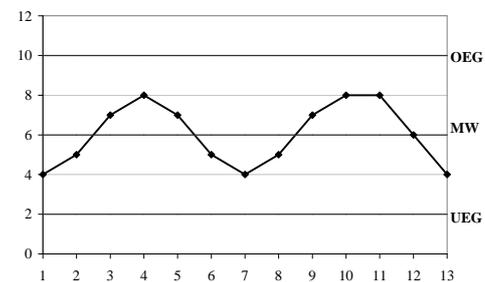


Abbildung 17: Trends bei QRK: Schwingung

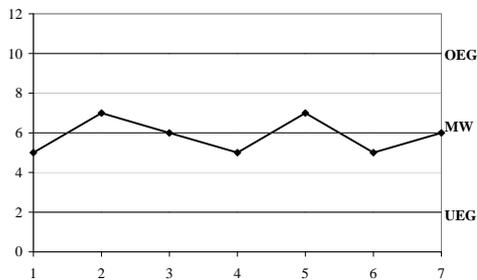


Abbildung 18: Trends bei QRK: Middle Third 1

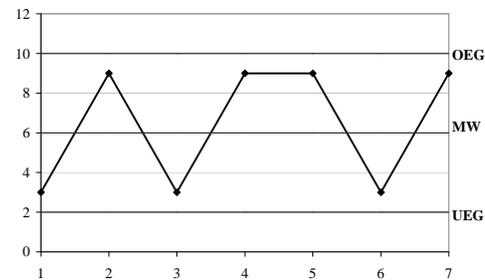


Abbildung 19: Trends bei QRK: Middle Third 2

4.4.4 Vorlaufuntersuchung zur Schätzung von Mittelwert μ und Standardabweichung σ

Die Vorlaufuntersuchung dient dazu, aus der Verteilung der gemessenen Parameter die Mittellinie und die Grenzen für die QRK zu berechnen.

Dabei nähert sich die Verteilung der Anzahl von Messwerten bei genügend vielen Messwerten meist einer Normalverteilung an (Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung). Im Allgemeinen sind μ und σ der vorausgesetzten Normalverteilung nicht bekannt. Aus diesem Grund wird eine Vorlaufuntersuchung zur Schätzung der Verteilungsparameter, die zur Berechnung der Mittellinie und Grenzen der QRK benötigt werden, durchgeführt. Die Vorlaufuntersuchung

sollte mit mindestens $k = 25$ Stichproben erfolgen, die einen immer gleichen Stichprobenumfang von $n = 5$ umfassen [Lin05]. Es sollte sichergestellt werden, dass der Prozess während der Untersuchung beherrscht ist, d.h. keinen Schwankungen unterliegt (siehe Kapitel 4.3).

Bei einer Änderung der geschätzten Verteilungsparameter sollten die Eingriffsgrenzen neu berechnet werden. Allgemein kann festgestellt werden, dass

- die Mittelwerte von Stichproben normalverteilter Messwerte (Parameter μ und σ) des stets gleichen Umfangs n normalverteilt sind mit den Parametern μ und der Standardabweichung $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
- bei einem normalverteilten Prozess der Mittelwert μ einer Stichprobe ein Schätzwert für den Mittelwert μ der Normalverteilung ist

Für einen umfangreicheren Einstieg in diese Thematik wird auf [Lin05] und [Tim04] verwiesen.

4.4.5 Umsetzung von QRK am HPT

Die Erstellung von QRK für das HL-Labor des HPT erfolgte nach der in Kapitel 4.4.1 dargestellten Reihenfolge und wird im Folgenden detailliert anhand eines Beispiels (ATV-Trockenoxid) dargestellt.

4.4.5.1 Vorüberlegungen

Am HPT wurde ein Standardprozess für das MOSFET-Bauelement entwickelt, der als Referenz für jegliche andere Prozesse gilt und der die Parameter für die Qualitätskontrolle der Geräte liefert (siehe Anhang A). Hierbei werden vier Silizium-Substrate der Größe 3x3cm als ein *run* zusammengefasst. Wenn möglich werden diese vier Silizium-Substrate als so genanntes *batch* gleichzeitig prozessiert. Ein Laufzettel mit detaillierten Arbeitsanweisungen dient als Hilfsmittel zur Durchführung jedes einzelnen Prozesses und kann in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) abgerufen werden.

Die Umsetzung von QRK am HPT erfordert genaue Vorüberlegungen, da sowohl Personal als auch Zeit zur Kontrolle von Geräten begrenzt ist. Aus diesem Grund wurden folgende Fragen vorab geklärt:

- Experten befragen: Welche Geräte sollen oder müssen kontrolliert werden?
- Welche Parameter sollen überwacht werden?
- Was ist der Zielwert?
- Wie können die Parameter gemessen werden?
- Mit welchem Aufwand für Messung und Kontrolle ist zu rechnen?
- Wie oft soll bzw. kann kontrolliert werden?
- Wer soll kontrollieren?

Die Entscheidung, welche Geräte mittels QRK kontrolliert werden sollen, wurde davon geleitet, welche Geräte für den MOSFET-Prozess am wichtigsten sind, welche am häufigsten benutzt werden oder für die Einführung des QM leicht kontrolliert werden können. Es wurde von den Technologen (Doktoranden, Technologieleiter und Professor) beschlossen, dass die ersten Geräte das Ellipsometer zur Kontrolle von Oxiddicken, der Oxidationsofen der Firma ATV, die Aluminium-Aufdampfanlage der Firma Leybold und die Isolator-Sputteranlage sind (siehe Tabelle 8). Deshalb wurden für diese Geräte als erstes Schritt für Schritt QRK eingeführt. In Tabelle 8 werden zusätzlich noch die entsprechenden Parametergrößen und der Zielwert, der gemessen werden soll, sowie die zur Prozessierung benötigte Zeit aufgeführt. Diese Werte sind aus dem MOSFET-Standardprozess entnommen, da dieser Prozess als Referenzprozess zur Charakterisierung der technologischen Prozesse dient (siehe Anhang A). Die Prozesszeit wird pro run angegeben, da die Geräte vier Silizium-Substrate gleichzeitig verarbeiten können. Die

Gerät	Parameter	Zielwert	Prozesszeit pro run
Ellipsometer	Schichtdicke Oxid Referenzscheibe	124 nm	15 Minuten (1 Scheibe)
ATV-Oxidationsofen	Schichtdicke Trockenoxid	20 nm	1-2 Stunden
ATV-Oxidationsofen	Schichtdicke Nassoxid	450 nm	5-6 Stunden
Leybold Aufdampfanlage	Schichtdicke Aluminium	140 nm	30 Minuten
Isolator-Sputteranlage	Schichtdicke Oxid	120 nm	30 Minuten

Tabelle 8: Mittels QRK kontrollierte Geräte

erforderlichen Parameter werden für jedes Gerät unterschiedlich gemessen. Das Ellipsometer nimmt unter den Geräten eine Sonderstellung ein, da es ein Messgerät ist, das zur Überwachung der Oxiddicke dient (ATV-Oxidationsofen und Sputteranlage Isolator). Für die Kontrolle des Ellipsometers existiert eine Referenzscheibe, deren Oxiddicke bekannt ist. Diese Scheibe wird zur regelmäßigen Kontrolle des Ellipsometers verwendet.

Die Bestimmung der Oxiddicke des Nassoxids und des Trockenoxids aus dem ATV-Oxidationsofen und des Oxids aus der Sputteranlage erfolgt mittels Ellipsometermessung.

Die Bestimmung der Dicke der Aluminiumschicht aus der Leybold-Aufdampfanlage ist komplexer und kann nicht mittels Ellipsometer erfolgen. Es muss ein Lithographieprozess mit nachfolgender Ätzung erfolgen, um dann mittels Stufenmessung durch ein sogenanntes DekTak-Messgerät die Dicke der Aluminiumschicht zu bestimmen. Die QRK für die Geräte aus Tabelle 8 sind in Anhang C dargestellt.

Der Aufwand zur regelmäßigen Kontrolle der Geräte ist unterschiedlich und reicht von ein bis zwei Stunden reiner Arbeitszeit bis zu einem halben Tag. In Tabelle 9 ist der Zeitaufwand pro Scheibe und pro run für die einzelnen Geräte dargestellt. Dabei wird die reine Arbeitszeit inklusive der Wartezeiten, in denen z.B. der Prozess alleine läuft, berücksichtigt. Außerdem wird die Anzahl der Messpunkte pro Scheibe angegeben.

Die Messzeit pro Messpunkt beträgt für die Messung der Oxiddicke mittels Ellipsometer ca. 10

Minuten und für die DekTak-Messung der Aluminium-Schichtdicke ebenfalls ca. 10 Minuten.

Gerät	Messpunkte	Wartezeit	Gesamtaufwand pro Scheibe	Gesamtaufwand pro run
ATV-Oxid trocken	9	1 Std	2 Std + 1,5 Std = ca. 3,5 Std	2 Std + 4 · 1,5 Std = ca. 8 Std
ATV-Oxid nass	9	5 Std	6 Std + 1,5 Std = ca. 7,5 Std	6 Std + 4 · 1,5 Std = ca. 12 Std
Leybold Aluminium	5	keine	30 min + 50 min = 80 min	30 min + 4 · 50 min = ca. 4 Std
Sputteranlage Isolator	5	keine	30 min + 50 min = 80 min	30 min + 4 · 50 min = ca. 4 Std

Tabelle 9: Zeitaufwand für Kontrolle

Die Häufigkeit der Kontrolle ist ein weiterer Punkt, der stark von der Anzahl des Personals im Labor abhängig ist. Bei einem kleineren Labor mit z.B. einem oder zwei fest angestellten Mitarbeitern und bis zu sechs Doktoranden, die im HL-Labor arbeiten, ist eine regelmäßige Kontrolle im Abstand von zwei bis drei Wochen für fünf Geräte realistisch. Dabei liegt der Zeitaufwand für alle in Tabelle 9 genannten Geräte pro run bei 3-4 Tagen inklusive Wartezeit während der Prozessierung. Ohne Wartezeiten liegt der Zeitaufwand bei ca. 3 Tagen.

Wenn mehrere Messpunkte oder/und mehrere Silizium-Substrate kontrolliert werden sollen, ist schnell ersichtlich, dass das Führen von QRK sehr zeitintensiv und für einige Prozesse auch durch zusätzlich nötige Prozess-Schritte sehr aufwändig ist. Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, wenn es eine Person gäbe, die für die Durchführung der Kontrollen verfügbar wäre. Falls dies nicht möglich ist, sollte die Arbeit von den jeweiligen geräteverantwortlichen Doktoranden durchgeführt werden, da sich diese am besten mit dem Gerät auskennen. Allerdings darf der zusätzliche Zeitaufwand nicht unterschätzt werden und der jeweilige Doktorand sollte dies in seinem Arbeitsplan berücksichtigen und damit einverstanden sein, Zeit für die Qualitätskontrolle zu opfern.

Eine weitere Überlegung nach Einführung von QRK sollte sein, ob die ursprünglich gewählte Anzahl an Messpunkten sowie die Messfrequenz nach wie vor passend sind. Wenn Geräte nach Expertenmeinung (d.h. nach Meinung des Geräteverantwortlichen) als stabil und der Prozess als homogen angesehen werden können, kann eine Reduzierung der Messpunkte und eine Verlängerung des Messintervalls erfolgen. Die Entscheidung Messpunkte zu verringern sollte in regelmäßigen Intervallen geprüft werden, indem alle Messpunkte gemessen und auf Homogenität über der Scheibe geprüft werden. Das Messintervall sollte nie länger als drei bis vier Wochen sein, da ansonsten keine Gleichmäßigkeit des Prozesses garantiert werden kann. Diese Maximallänge kann beibehalten werden, wenn es keine ersichtlichen Schwankungen bei den regelmäßigen Kontrollen oder anderen Prozessen gibt.

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels (*ATV-Ofen Trockenoxid*) dargestellt, wie das Vorgehen für den Aufbau einer QRK in der Praxis ablaufen kann.

4.4.5.2 Erstellung von QRK am Beispiel ATV-Oxid Trockenoxid

Da keine Mittelwerte oder Standardabweichungen aus den Messwerten berechnet werden können (der Stichprobenumfang ist gleich 1), fiel die Entscheidung welche QRK geeignet ist, auf eine Urwert-Karte. Dieser Kartentyp wird zwar in der Industrie wenig verwendet, ist aber für die Überwachung im Labor durchaus geeignet. Zusätzlich zur Überwachung der einzelnen Silizium-Substrate wird aus den Ergebnissen der Vorlaufuntersuchung eine Grafik erstellt, welche die Dickenverteilung über den einzelnen Silizium-Substrate und über dem gesamten run darstellt. Diese Darstellung der Homogenität dient als Anhaltspunkt für die weitere Prozessierung, z.B. das Ätzen und ist beinahe ebenso wichtig wie die QRK selbst.

Nach der Vorlaufuntersuchung wird von den Experten aufgrund der Dickenverteilung über die einzelnen Silizium-Substrate und über den gesamten run entschieden, ob der Prozess verbessert werden muss, wie viele Messpunkte zur Kontrolle nötig sind und wie oft kontrolliert werden soll.

4.4.5.3 Vorlaufuntersuchung zur Schätzung von Mittelwert μ und Standardabweichung σ

Die Vorschrift zur Erstellung von QRK geht von industrieller Serienproduktion aus und verlangt für die Vorlaufuntersuchungen zur Schätzung von μ und σ einen genügend großen Stichprobenumfang. Dieser Stichprobenumfang sollte sich auf mindestens 25 zufällige Proben im Umfang von $n = 5$ pro Merkmal belaufen, d.h. $25 \cdot 5 = 125$. Dies ist für ein Labor wie den HPT praktisch unmöglich einzuhalten, da der Umfang von 125 Stichproben in etwa der Jahresproduktion entspricht.

Aus diesem Grund muss die Anzahl der Stichproben in dem Maße verringert werden, dass sie dem realistischen Produktionsumfang am HPT angepasst wird. Dies bedeutet, dass zwar 25 Stichproben genommen werden, diese aber vom Umfang $n = 1$ sind und nicht zufällig aus der Produktion entnommen werden, da keine Serienproduktion am HPT betrieben wird.

Die Vorlaufuntersuchung wird mit den Standard-Parametern des MOSFET-Prozesses für das ATV-Trockenoxid durchgeführt. Die zugehörigen Parameter werden in Tabelle 10 aufgeführt.

Zielwert	Oxiddicke $d_{ox} = 20 \text{ nm}$
Prozesszeit:	10 min
Prozesstemperatur:	1000°C
Gasfluss 1: N_2 :	2 l/min
Gasfluss 2: N_2 :	2 l/min
Gasfluss 3: O_2 :	2 l/min
Gasfluss 4: O_2 mit H_2O durch Bubbler angereichert	0 l/min

Tabelle 10: Parameter Standardprozess Trockenoxid

Bei der Qualitätskontrolle ist es wichtig, dass die Prozesse immer gleich ablaufen. Das heißt, dass die Silizium-Substrate immer in der gleichen Reihenfolge und Orientierung im jeweiligen Gerät prozessiert werden sollten. Dies geschieht, indem die Silizium-Substrate auf der Rückseite mit einer eingeritzten Nummer versehen werden. Damit kann sowohl die Orientierung *oben-unten* als auch eine immer gleich bleibende Reihenfolge der Messpunkte gewährleistet werden. In Abbildung 20 wird die Anordnung der Messpunkte auf jeder Scheibe mit der Angabe der Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten dargestellt, wobei Punkte 1, 2 und 3 *oben* sind.

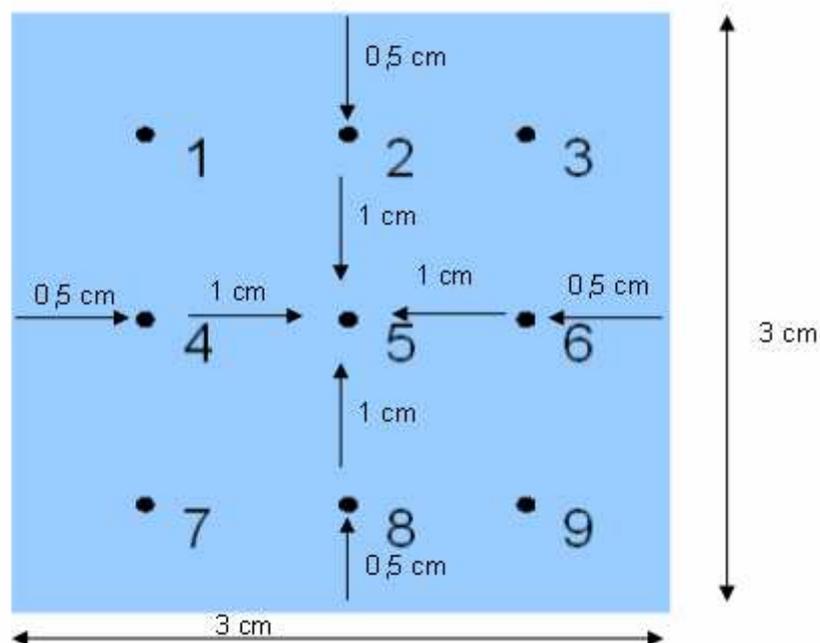


Abbildung 20: Verteilung der Messpunkte 1 bis 9 auf den Silizium-Substrate

Für die Qualitätskontrolle im ATV-Oxidationsofen muss schon bei der Voruntersuchung darauf geachtet werden, dass die Silizium-Substrate immer an derselben Stelle im Halter stehen. Auch müssen immer je zwei 4-Zoll „dummy“-Scheiben (d.h. der Durchmesser der Scheiben beträgt 4 Zoll) mit je einer Lücke von einer Scheibe vor und hinter den zu prozessierenden Silizium-Substrate stehen, was in Abbildung 21 veranschaulicht wird.

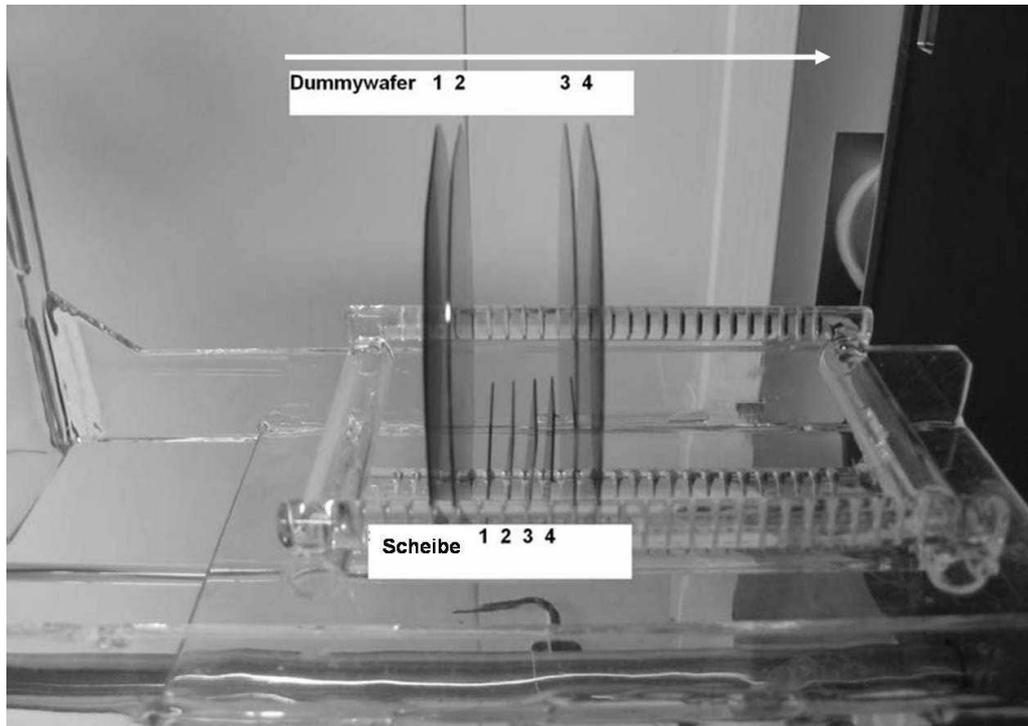


Abbildung 21: Einschubrichtung der Silizium-Substrate in ATV-Oxidationsofen

Wenn gewährleistet ist, dass die Silizium-Substrate immer in der gleichen Weise prozessiert werden, kann mit der Voruntersuchung begonnen werden.

Hierfür wurde der Standard-Trockenoxid-Prozess (siehe Tabelle 10) 25 mal gefahren [Liu06]. Mittels Ellipsometermessung wurde die Oxiddicke an den neun Messpunkten bestimmt und in Tabelle 11 festgehalten. Aus diesen Werten wurde eine Grafik erstellt, welche die mittlere Dickenverteilung je Scheibe zeigt (siehe Abbildung 22).

In Abbildung 22 erkennt man, dass die Oxiddicke über den Silizium-Substrate nicht ganz homogen verteilt ist. Dies wurde in einer Diskussionsrunde und unter den Experten für den ATV-Ofen besprochen und als akzeptable Abweichungen eingestuft (siehe Kapitel 4.6 und 4.7). Dabei wurde die Wichtigkeit betont, zu wissen, dass eine Abweichung existiert und dass es eine Grafik gibt, nach der man sich in den Folgeprozessen richten kann.

Lauf	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9
1	17,50	17,31	18,00	16,76	16,82	16,97	16,77	16,49	16,85
2	18,11	18,81	18,81	17,56	17,64	17,55	17,26	16,89	17,17
3	19,82	19,99	19,89	19,35	19,45	19,11	18,82	18,06	18,64
4	18,11	18,28	18,52	18,19	18,01	17,98	17,97	17,30	17,70
5	18,93	19,74	20,25	18,73	18,65	18,88	18,30	17,71	18,19
6	18,58	19,44	20,16	18,83	19,97	18,22	18,31	18,18	19,51
7	21,12	20,52	19,86	19,29	19,33	19,14	18,56	17,78	18,46
8	21,25	21,99	21,76	20,44	20,95	21,32	19,97	19,19	19,57
9	19,26	19,71	19,80	18,97	19,18	19,13	18,55	17,85	18,37
10	20,06	20,29	19,74	19,79	19,77	19,48	19,33	18,12	18,75
11	18,90	19,02	18,85	18,64	18,45	18,68	18,32	17,77	18,49
12	19,32	19,49	19,64	18,98	18,65	19,14	18,61	18,28	18,48
13	19,19	19,43	19,82	19,17	19,21	19,08	19,10	17,95	18,50
14	19,70	20,29	20,35	19,47	19,38	19,57	19,20	18,03	18,63
15	19,80	19,60	19,61	19,41	19,02	19,27	19,08	18,20	18,87
16	20,84	20,80	20,78	20,25	20,28	20,61	19,47	18,84	19,94
17	21,06	20,69	21,01	20,19	19,86	20,12	19,48	18,76	19,25
18	19,72	19,33	19,66	19,01	18,44	19,11	18,69	17,86	18,66
19	20,01	19,42	19,84	19,17	18,61	19,01	18,98	18,06	18,82
20	20,03	20,12	20,16	19,61	19,53	19,65	18,91	18,29	18,92
21	19,49	19,12	19,35	19,22	18,69	18,88	19,15	18,28	18,87
22	19,45	19,63	19,51	19,14	18,91	19,22	18,89	18,39	18,94
23	22,29	22,84	21,62	22,35	23,52	22,84	20,74	19,63	21,32
24	19,85	19,80	19,73	19,48	19,13	19,24	19,16	18,88	18,92
25	19,56	19,54	19,52	19,17	18,75	18,97	19,02	18,32	18,72
μ	19,68	19,81	19,85	19,25	19,21	19,25	18,83	18,12	18,74
σ	1,08	1,09	0,85	1,01	1,24	1,15	0,79	0,66	0,86

Tabelle 11: Ergebnisse in [nm] Vorlaufuntersuchung ATV-Trockenoxid Scheibe 2

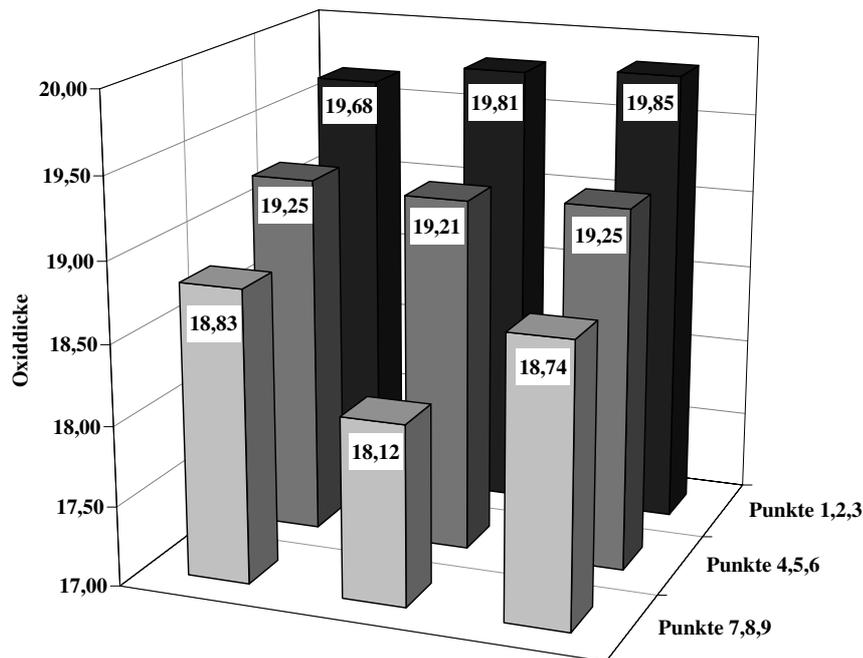


Abbildung 22: Dickenverteilung von Scheibe 2

Die Werte aus Tabelle 11 dienen zur Berechnung der Grenzen für die QRK. Vorher sollte noch ein Test auf Normalverteilung gemacht werden, da die in Kapitel 4.4.2 vorgestellten Formeln auf der Annahme basieren, dass die gemessenen Werte (zumindest annähernd) normalverteilt sind.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Test auf Normalverteilung durchzuführen [Lin05], [Fae07], [Wik07c] oder [Tim04]. Dabei ist der einfachste Test auf Normalverteilung ein zählender Test:

Regeln zum Nachweis auf Normalverteilung:

1. $2/3$ der gemessenen Werte müssen zwischen $\mu \pm \sigma$ liegen
2. 95% der gemessenen Werte müssen zwischen $\mu \pm 2\sigma$ liegen.
3. 100% der gemessenen Werte müssen zwischen $\mu \pm 3\sigma$ liegen.

In Tabelle 12 wird das Ergebnis für Scheibe 1 dargestellt:

	$\mu + \sigma$	$\mu - \sigma$	Anzahl der Werte in den Grenzen	in Prozent	normal- verteilt
zu 1.	20,30 nm	18,09 nm	172	0,76 > 2/3	ja
zu 2.	21,40 nm	16,98 nm	210	0,93 \approx 95%	ja
zu 3.	22,50 nm	15,88 nm	222	0,99 \approx 100%	ja

Tabelle 12: Zählender Test auf Normalverteilung

Ein weiterer sehr einfacher Weg, die Verteilungsfunktion festzustellen, ist es, ein Histogramm zu erstellen. Dabei werden die gemessenen Werte in Klassen eingeteilt und mit Hilfe eines Balkendiagramms aufgetragen. Zur Berechnung der Klassenbreite d wird folgende Formel verwendet, wobei die Spannweite R die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten gemessenen Wert auf der Scheibe ist: $R = x_{max} - x_{min}$ und die Klassenanzahl k sich aus der Wurzel aus der Anzahl an Messwerten berechnet: $k = \sqrt{\text{Anzahl an Beobachtungen } n}$

$$d = \frac{\text{Spannweite}}{\text{Klassenanzahl}} = \frac{R}{k} = \frac{x_{max} - x_{min}}{\sqrt{\text{Anzahl an Beobachtungen } n}} \quad (21)$$

Die erste Klasse beginnt dabei am kleinsten gemessenen Wert.

Eine genaue Beschreibung für die Vorgehensweise zur Erstellung eines Histogramms findet man unter anderem in [Lin05] oder [Tim04].

In Abbildung 23 ist das für das Trockenoxid von Scheibe 2 erstellte Histogramm dargestellt. Die Klassenbreite beträgt $d = \frac{23,52-16,49}{15} = 0,47$. In Anhang D findet sich die Tabelle mit den Klassenbreiten und zugehörigen Häufigkeiten.

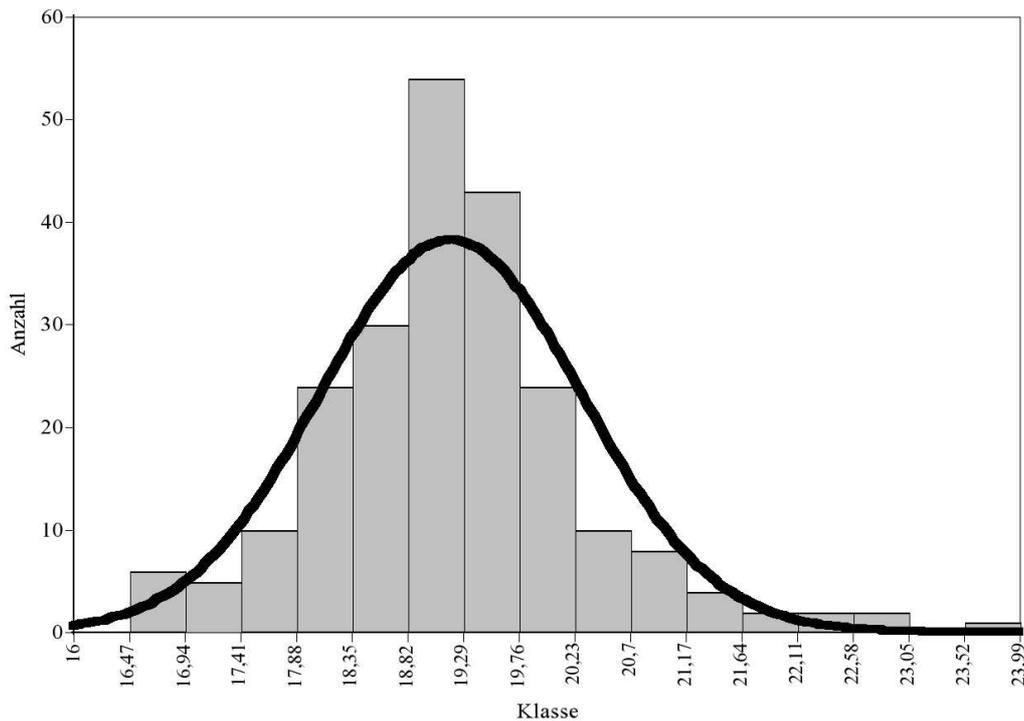


Abbildung 23: Histogramm und Gaußfit- Verteilung der Klassen für Scheibe 2

Sowohl der zählende Test aus Tabelle 12 als auch der grafische Test mittels Histogramm aus Abbildung 23 zeigt, dass der Test auf Normalverteilung erfolgreich ist. Das heißt, dass angenommen werden kann, dass die Werte normalverteilt sind.

Für das Labor am HPT reicht diese sehr einfache Art von Test auf Normalverteilung. Es ist nicht

möglich genügend Werte in der Vorlaufuntersuchung zu messen, um statistisch unwiderlegbare Aussagen treffen zu können. Trotzdem kann auch aus der Grafik eine erkennbare Tendenz hin zur Normalverteilung abgelesen werden, was ausreicht, um die Formeln 6, 7 und 8 für die Berechnung der Grenzen verwenden zu können.

4.4.5.4 Berechnung der Fähigkeitskennzahlen C_m und C_p

In Kapitel 4.3 wurden die Fähigkeitsindizes C_m und C_p vorgestellt. Diese Indizes werden in der Regel nach der Vorlaufuntersuchung berechnet, weshalb die explizite Berechnung der Werte am Beispiel ATV-Trockenoxid auch erst in diesem Kapitel erfolgt.

Die Formeln zur Berechnung von C_m und C_p sind identisch. Für dieses Beispiel wird die Prozessfähigkeit C_p berechnet (siehe auch Gleichung 2):

$$C_p = \frac{\text{Toleranzbreite}}{\text{Streubreite}} = \frac{OTG - UTG}{6\sigma} \quad (22)$$

Die Toleranzbreite für das ATV-Trockenoxid für Messpunkt 5 auf Scheibe 2 wird aus Formel 23 berechnet und ist nicht identisch mit den später berechneten Eingriffsgrenzen für die Qualitätsregelkarten (siehe Kapitel 4.4.5.5).

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_B + \gamma_n \sqrt{2\Phi_B} \quad (23)$$

mit

$$V_{FB} = \Phi_M - \chi_{Si} - \frac{E_g}{2q} - \Phi_B - \frac{Q_f}{C_0} \quad (24)$$

Die einzelnen Terme und zugehörigen Werte können in Anhang E nachgelesen werden. Nach [Fab08] hängt die Einsatzspannung V_{th} bei den in Anhang E gewählten Parametern für den Standard-MOSFET Prozess nur sehr schwach (ca. 3mV pro nm) von der Dicke des (Trocken-)Oxids ab. Typischerweise werden MOSFETs als defekt angesehen, wenn sich ihre Einsatzspannung um $\pm 100\text{mV}$ vom Sollwert verändert hat. Dieser Wert wurde als Toleranzgrenze festgelegt und die zugehörige Schwankung der Gateoxiddicke berechnet. Die Einsatzspannung bei 19nm Gateoxiddicke liegt bei etwa 115mV. Das heißt, dass die tolerierte Schwankungsbreite gleich 15-215mV ist.

Für die Oxiddicke heißt dies:

$$V_{th} \pm 100\text{mV} = 19\text{nm} \pm 7\text{nm} \quad (25)$$

Daraus ergibt sich folgende Prozessfähigkeit:

$$T = OTG - UTG = 26\text{nm} - 12\text{nm} = 14\text{nm} \quad (26)$$

Der Wert für 6σ ist (aus Tabelle 11):

$$6\sigma = 6 \cdot 1,24 = 7,44 \quad (27)$$

Daraus folgt die Berechnung von C_m :

$$C_p = \frac{OTG - UTG}{6\sigma} = \frac{14}{7,44} = 1,88 \quad (28)$$

Der Wert für C_p zeigt an, dass laut Tabelle 6 auf Seite 41 die Maschinenfähigkeit für den ATV-Trockenoxid-Prozess gegeben ist und in einem Bereich sehr nahe des Mittelwertes liegt (siehe Kapitel 4.3). Dies wird in Abbildung 24 grafisch verdeutlicht. Es sind die $\pm 3\sigma$ -Grenzen sowie der Mittelwert aller Messwerte von Scheibe 2 eingezeichnet.

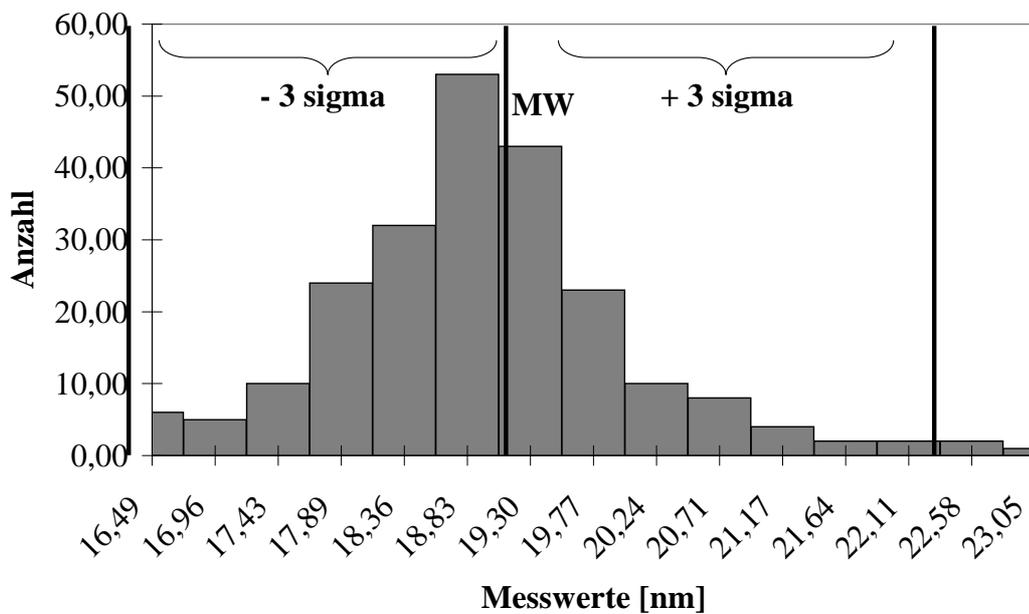


Abbildung 24: Grafische Darstellung der Prozessfähigkeit des ATV-Ofens

Die Oxiddicke ist zwar kein k.o.-Kriterium für die Charakterisierung von MOSFETs, dient aber dazu, den Oxidationsofen mit einfachen Methoden zu überwachen und damit zu gewährleisten, dass dieser zuverlässig arbeitet. Für eine genauere Kontrolle der Lage der Einsatzspannung müssten die Oxidladungen des gewachsenen Oxids kontrollierbar sein, was ein sehr komplexes Problem darstellt [Zhu06] und ein nächster Schritt für die Erweiterung des bisherigen QMS sein könnte.

Für das HPT-Labor sind Fähigkeitskennzahlen ein wichtiges Hilfsmittel, um die Kontrollierbarkeit von Prozessen und Geräten sicherzustellen. Wenn ein Gerät als fähig eingestuft wird, können neue Prozesse zuverlässig getestet werden.

4.4.5.5 Berechnung der Mittellinie und der Grenzen

Die Berechnung der Mittellinie und der Grenzen der QRK erfolgte mittels den Formeln 6, 7 und 8. In Tabelle 13 werden die Ergebnisse der Berechnungen für Scheibe 1 des ATV-Trockenoxids aufgelistet. Die Konstanten $E_E = 2,576$ und $E_W = 1,960$ wurden aus den Tabellen in [Tim04] entnommen und sind in Anhang F wiedergegeben. Die Werte für μ und σ pro Messpunkt auf Scheibe 1 werden aus Tabelle 11 abgelesen.

Die berechneten Werte für die Mittellinie und die Grenzen werden schließlich in die Qualitätsregelkarte, wie in Abbildung 13 auf Seite 45 beschrieben, eingezeichnet und beschriftet.

Messpunkt	μ	OEG	UEG	OWG	UWG
1	19,68 nm	22,5 nm	16,9 nm	21,8 nm	17,6 nm
2	19,81 nm	22,6 nm	17,0 nm	20,9 nm	17,7 nm
3	19,85 nm	22,0 nm	17,7 nm	21,5 nm	18,2 nm
4	19,25 nm	21,9 nm	16,6 nm	21,2 nm	17,3 nm
5	19,21 nm	22,4 nm	16,0 nm	21,6 nm	16,8 nm
6	19,25 nm	22,2 nm	16,3 nm	21,5 nm	17,0 nm
7	18,83 nm	20,9 nm	16,8 nm	20,4 nm	17,3 nm
8	18,12 nm	19,8 nm	16,4 nm	19,4 nm	16,8 nm
9	18,74 nm	21,0 nm	16,5 nm	20,4 nm	17,1 nm

Tabelle 13: Berechnung der Mittellinie und Grenzen für Scheibe 2

4.4.5.6 Führen der QRK

Nachdem die Mittellinie und die Grenzen berechnet wurden, kann für jeden Messpunkt eine QRK erstellt werden. In Abbildung 25 wird beispielhaft an Messpunkt 5 (Mitte der Scheibe) der Silizium-Substrate 2 im jeweiligen run mit vier Silizium-Substrate eine QRK dargestellt (siehe Abbildung 21).

Die Linie mit den Markierungspunkten stellt die in ca. 3-wöchentlichem Abstand aufgenommenen Messpunkte und zugehörigen Messwerte dar. Die gemessenen Werte werden auf der Ordinate, das Datum der Messung auf der Abszisse eingetragen.

Es ist klar erkennbar, dass sich das Gerät in kontrolliertem Zustand befindet. Solange die Messwerte sich nicht über- oder unterhalb der Eingriffs- oder Warngrenzen bewegen, kann das Gerät ohne Vorbehalte für die Prozessierung verwendet werden.

Nach gründlicher Prüfung wurde entschieden, dass zur Überwachung des ATV-Ofens ein Punkt pro Scheibe ausreicht. Die Entscheidung fiel auf den Mittelpunkt der Silizium-Substrate, also Punkt 5.

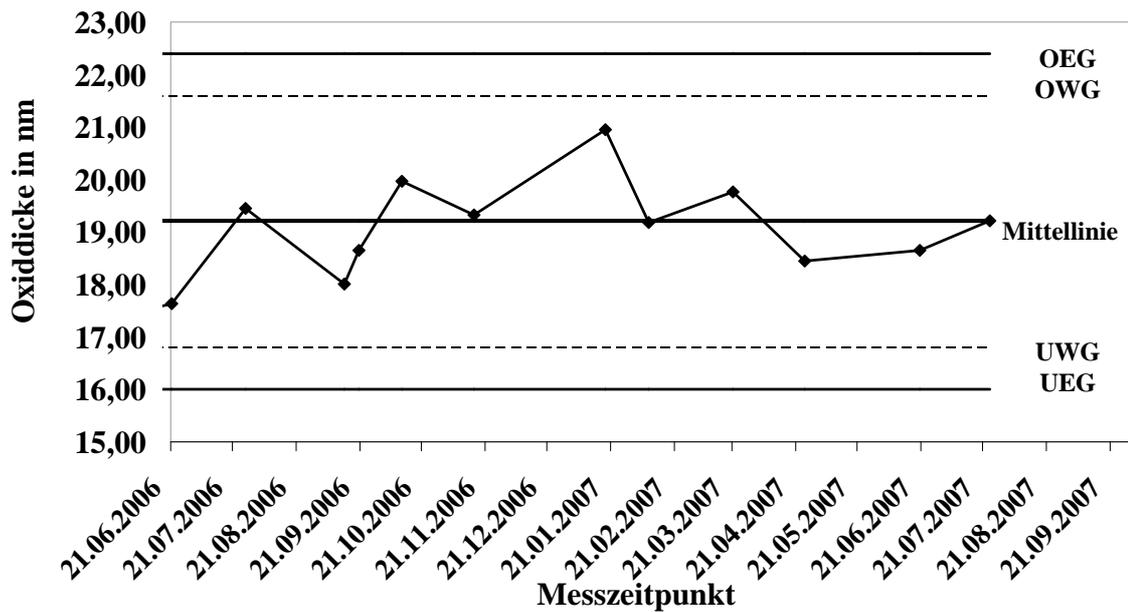


Abbildung 25: Qualitätsregelkarte für Messpunkt 5 auf Scheibe 2 im jeweiligen run

4.4.6 Fazit Statistische Prozesskontrolle am HPT

Grundsätzlich sind QPK sehr gut für den Einsatz im Labor geeignet. QPK geben für den „Standard“-Prozess die nötige Sicherheit, dass die Erwartungen an die Qualität des Prozesses erfüllt werden. Bei der Herstellung neuartiger Bauelemente ist die Zuverlässigkeit der einzelnen Prozesse gegeben, so dass sichergestellt ist, dass bei den neuartigen Bauelementen keine Artefakte aus den bekannten Prozessen auftreten. Allerdings sollte auf einige Punkte geachtet werden:

1. Die Anwendung und Ausführung der Untersuchungen streng nach Lehrbuch sind in den meisten Fällen für Labore nicht machbar, da keine Serienproduktion besteht. Somit kann keine statistisch relevante Anzahl an Stichproben gezogen werden. Dies sollte aber nicht verhindern, dass QPK eingeführt werden.
2. Die Einführung von QPK sollte in sinnvollem Umfang erfolgen, d.h. es sollten die wichtigsten und kritischsten Geräte zuerst in Angriff genommen werden. Diese sollten dann mit zeitlich, personell und materiell vertretbarem Aufwand charakterisiert werden.
3. Der Aufwand zur Führung von QPK ist relativ hoch (d.h. ca. 3 Tage für 4 Geräte) und sollte mit Experten bestimmt werden. Danach sollte bestimmt werden, welcher (zeitliche) Aufwand für das Labor als vertretbar angesehen wird.
4. Nach Prüfung von Aufwand für Prozesse sowie Messungen und Notwendigkeit sollte eine geeignete QPK festgelegt werden.
5. Es gibt Software, die das Anlegen und Führen von QPK erleichtert. Vor dem Kauf einer solchen Software sollte genau geprüft werden, ob sie den Anforderungen genügt oder

evtl. für den Einsatz im Labor überdimensioniert ist. Zum Start reicht es aus, z.B. ein selbst programmiertes MS-Excel sheet zu verwenden. Für den späteren, professionellen Gebrauch empfiehlt es sich, die QRK in ein rechnergestütztes QM-System zu integrieren. Dies kann z.B. eine Wissensdatenbank sein, in welche die im Labor benötigten QM-Funktionen integriert wurden (siehe Kapitel 5)

6. Wenn es sich im Laufe der Zeit herausstellt, dass die gewählte QRK zu aufwändig zu führen ist oder z.B. weniger Messpunkte zur Kontrolle des Gerätes ausreichen, kann auf eine andere QRK umgestiegen werden. Es müssen keine neuen Vorlaufuntersuchungen gestartet werden, wenn der Wechsel nur Messpunkte ausschließt und von einem Experten veranlasst wurde.
7. Wenn Geräte nach Expertenmeinung (d.h. nach Meinung des Geräteverantwortlichen) als stabil und der Prozess als homogen angesehen werden können, kann eine Reduzierung der Messpunkte und eine Verlängerung des Messintervalls erfolgen. Die Entscheidung, Messpunkte zu verringern sollte in regelmäßigen Intervallen geprüft werden, indem alle Messpunkte gemessen und auf Homogenität über der Scheibe geprüft werden. Das Messintervall sollte nie länger als drei bis vier Wochen sein, da ansonsten keine Gleichmäßigkeit des Prozesses garantiert werden kann. Diese Maximallänge kann beibehalten werden, wenn es keine ersichtlichen Schwankungen bei den regelmäßigen Kontrollen oder anderen Prozessen gibt.
8. Es ist wichtig, regelmäßige Kontrollen an den Geräten durchzuführen.
9. Es sollten alle Vorkommnisse und Beobachtungen zusätzlich zu den Messergebnissen dokumentiert werden. Dies kann z.B. eine Fremdnutzung sein, die zwischen den Kontrollpunkten stattfand oder ein beobachteter Stromausfall. Diese Informationen sind wichtig, um bei evtl. auftretenden Problemen oder Fehlern auf mögliche Ursachen schließen zu können.
10. Die Kontrolle von Geräten und das Wissen um die Qualität der Prozesse ist das wichtigste Instrument für ein Labor und sollte deshalb gewissenhaft durchgeführt werden, auch wenn es manchmal subjektiv so scheint, dass der Aufwand dafür zu groß ist.
11. Die QRK sollten entweder direkt an den Geräten verfügbar sein oder mittels im Labor vorhandenem PC abrufbar sein. Dies dient dazu, vor Prozessbeginn den Status des Gerätes „live“ abzufragen. Somit kann sofort entschieden werden, ob ein geplanter Prozess durchgeführt werden kann oder nicht. Die Abrufbarkeit der QRK im HL-Labor ist essentiell, da die Wissenschaftler eigenverantwortlich an unterschiedlichen Geräten arbeiten und selbst auf Qualität achten müssen. Mittels der Wissensdatenbank am HPT (siehe Kapitel 5) können diese Daten abgerufen werden.

4.5 Design of Experiments - DoE

4.5.1 Grundlagen

Design of Experiments DoE oder Statistische Versuchsplanung ist eine mächtige Methode, um komplexe Prozesse zu verbessern. Design of Experiments umfasst sowohl die methodische Planung als auch die statistische Auswertung von Versuchen. Ziel hierbei ist es, das Zusammenspiel von Ursachen und Wirkungen mit einer möglichst geringen Anzahl von Versuchsdurchläufen herauszufinden [Kam99] [Kle06] [Lin05].

Ein Prozess lässt sich als Black-Box-System darstellen, welches drei Eingänge und einen Ausgang besitzt. Die Eingänge werden durch die Stellgrößen M , Steuergrößen z und Störgrößen x verkörpert (siehe Abbildung 26). Die Zielfunktion, welche alle wichtigen Aussagen enthält, wird am Ausgang abgegriffen [Wem06].

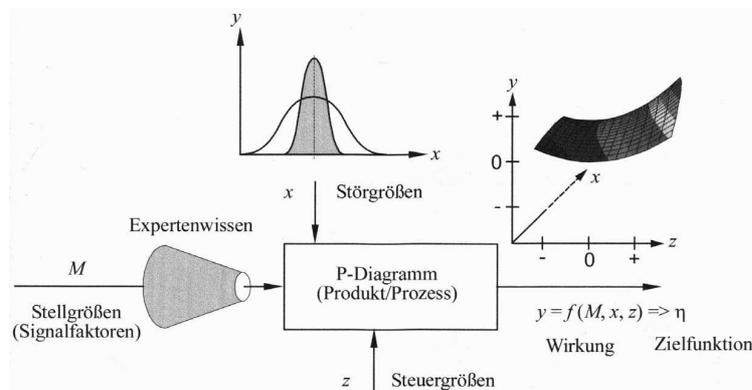


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Systemgrößen und Systemwirkung aus [Kle07]

Design of Experiments hat sich im Laufe der Zeit (16. Jahrhundert bis heute) zu einem sehr mächtigen und teils schwierig anzuwendenden Werkzeug entwickelt. Es existiert eine Vielzahl an Verfahren zur Planung und Optimierung von Produkten und Prozessen. Dabei werden Versuchspläne hauptsächlich nach zwei Kriterien geordnet: „Anzahl der Einflussfaktoren“ und „Ordnungsgrad des statistischen Modells“ [Lin05].

In den Anfängen des DoE (Beginn des 20. Jahrhunderts) wurden so genannte einfaktorielle Versuchspläne verwendet, die jeweils nur einen Faktor nacheinander untersuchen. Der Wert mit dem besten Ergebnis wird für jeden Faktor festgehalten. Nach diesem Verfahren geht man alle Eingabeparameter durch, bis der jeweils optimale Wert feststeht. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die Ergebnisse leicht und ohne Software verständlich sind, wenig Vorwissen benötigt wird und weitere Faktoren schnell ergänzt werden können. Allerdings überwiegen die Nachteile. Es ist in den wenigsten Fällen möglich, das Optimum zu finden, die Versuchspunkte sind sehr ungleichmäßig über den Versuchsraum verteilt und mögliche Wechselwirkungen zwischen den Parametern werden nicht berücksichtigt. Durch dieses Verfahren wird selten der best mögliche Prozess gefunden [Bib07], [Mas07].

Die Entwicklung der Statistik erlaubte es schließlich, immer komplexere Verfahren und damit Versuchspläne zu entwickeln. Die „modernen“ Versuchspläne decken mit wenigen zu untersuchenden Punkten den gesamten Versuchsraum ab und verwenden statistische Verfahren wie die Regressionsanalyse, um das Optimum zu finden. Ein Vergleich zwischen der Abdeckung des Versuchsraumes durch einen einfaktoriellen und einem modernen Versuchsplan ist in Abbildungen 27 und 28 dargestellt.

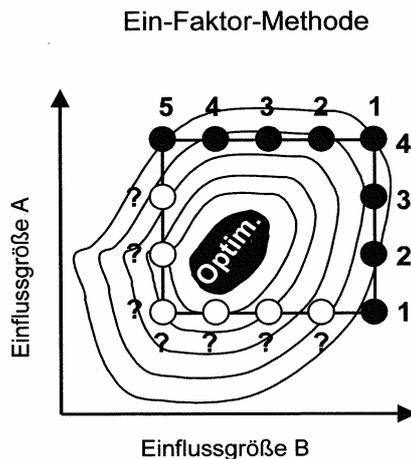


Abbildung 27: Versuchsraumabdeckung einfaktorieller Versuchsplan nach [Lin05]

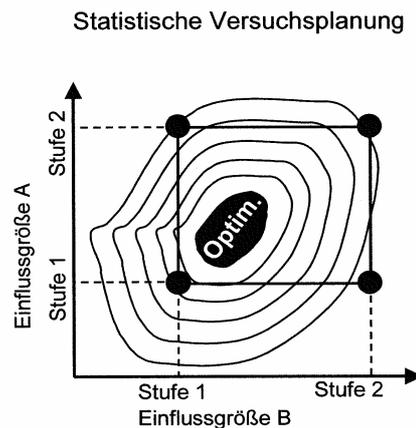


Abbildung 28: Versuchsraumabdeckung moderne Versuchsplanung - DoE nach [Lin05]

Der Grundgedanke des DoE ist, dass die Wechselwirkungen, die mehrere Einflussgrößen auf eine Zielgröße haben, in **einem** Versuch untersucht werden. Dabei müssen die Einflussgrößen unabhängig voneinander sein oder zu einer Größe zusammengefasst werden.

Jede Versuchsdurchführung eines DoE kann in folgende Schritte aufgeschlüsselt werden [Kle06], [Lin05]:

- | | |
|-----------------------|--|
| Systemanalyse: | <ul style="list-style-type: none"> - Verfahrensanalyse - Zielgrößenanalyse - Ermittlung wichtiger Verfahrensparameter:
Zielgrößenmerkmale, Störgrößen, Wechselwirkungen |
| Versuchsstrategie: | <ul style="list-style-type: none"> - Optimierungsstrategie - Wahl des Versuchsplans |
| Versuchsdurchführung: | <ul style="list-style-type: none"> - Versuche durchführen - Versuchsergebnisse erfassen |
| Versuchsauswertung: | <ul style="list-style-type: none"> - Statistische Auswertung der gewonnenen Daten - grafische Darstellung - Resultierende Schlussfolgerung und Empfehlung |

Die Aufgabe der statistischen Auswertung ist die Untersuchung, ob die Zielgröße tatsächlich von allen Einflussgrößen abhängt, oder ob einzelne Einflussgrößen keine Änderung bewirken und damit ausgeschlossen werden können. Dies wird mittels Signifikanztest oder Varianzanalysemodell festgestellt. Außerdem soll der Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflussgrößen untersucht werden, was mittels Regressionsanalyse durchgeführt wird. Die Regressionsanalyse ist für komplexere Aufgaben rechnerisch sehr aufwändig und kann teilweise nur noch rechnerunterstützt gelöst werden [Lin05], [Pha06].

Es gibt moderne Versuchspläne, die klassisch immer wieder Anwendung finden:

- Vollständige oder Vollfaktorielle Versuchspläne
- Fraktionelle oder Teilfaktorielle Versuchspläne
- Orthogonale Versuchspläne
- D(eterminanten)-Optimale Versuchspläne
- Plackett-Burman Versuchspläne
- Zentral-Zusammengesetzte Versuchspläne
- Box-Behnken Versuchspläne
- Mischungspläne

Die zwei bekanntesten Versuchspläne sind der Vollfaktorielle und der Teilfaktorielle Versuchsplan, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Der Vollfaktorielle Versuchsplan berücksichtigt alle Faktorstufenkombinationen und damit alle Wechselwirkungen zwischen den Eingabeparametern. Dies wird erreicht, indem alle Kombinationen von möglichen Einstellungen für alle Werte getestet werden. Dadurch ist eine hohe Aussagekraft gegeben, jedoch steigt der Aufwand mit steigender Anzahl von Eingabeparametern exponentiell an.

Dieser Nachteil kann durch den Teilfaktoriellen Versuchsplan aufgehoben werden, der eine Teilmenge des Vollfaktoriellen Versuchsplans darstellt. Hierbei wird das Wissen um Abhängigkeiten der Parameter untereinander mit in das Design implementiert. Dies führt zu einer Reduzierung der Versuchsanzahl. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass der zu optimierende Prozess sehr gut bekannt sein muss. Außerdem werden Effekte miteinander vermischt und können nicht auseinander gehalten werden, was zu einer Fehlinterpretation von Ergebnissen führen kann.

Die meisten Versuchspläne können „per Hand“, teils mit Hilfe von Tabellen, aufgestellt und ausgerechnet werden. Eine Ausnahme bilden hierbei die D-Optimalen Versuchspläne, die vor allem dann eingesetzt werden, wenn andere Versuchspläne nicht verwendet werden können, d.h. keine orthogonalen Matrizen aufweisen. Aufgrund der hohen Komplexität des Algorithmus kann dieses Design nur mit entsprechender Versuchsplanungssoftware wie z.B. CornerstoneTM oder STATISTICA realisiert werden [Cor06], [Sta].

Eine genaue Beschreibung der oben genannten Versuchspläne findet sich u.a. in [Lin05], [Mas07], [Wem06], [Ham00], [Mas03], [Bar94] und [Ros88].

Am HPT wurden bereits Experimente mit so genannten Taguchi- oder L18-Versuchsplänen

durchgeführt [Sch02]. Diese Pläne können per Hand mit Hilfe von Tabellen aufgestellt und rechnerisch der beste Versuch bestimmt werden.

Der D-Optimale Versuchsplan wird in Kapitel 4.5.2 genauer beschrieben, da dieser Plan am HPT zur Prozessoptimierung verwendet wird.

4.5.2 D-Optimale Versuchspläne

Der D-Optimale Versuchsplan folgt im Gegensatz zu den anderen bereits genannten Plänen nicht einem bestimmten Schema, sondern wird iterativ aufgebaut. Ein D-Optimaler Versuchsplan zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus, wie z.B. die freie Wahl der Stufen der Faktoren, die Stufenabstände, sowie die Verteilung der Versuchspunkte (siehe Abbildung 29) oder das mathematische Modell. Der Plan kann sowohl um Faktoren erweitert werden als auch bestimmte Punkte im Raum ausschließen [Kle07], [Wem06].

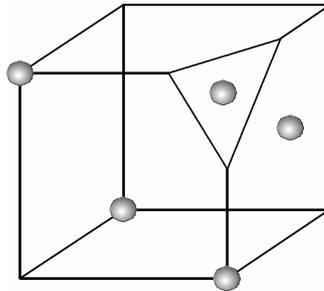


Abbildung 29: Versuchsraumabdeckung D-Optimaler Versuchsplan

Die Vorgehensweise zur Durchführung von D-Optimalen Versuchen ist in der Regel immer gleich. Dabei werden manche Schritte von der Software intern durchgeführt, so dass der Benutzer davon nichts bemerkt. Die Durchführung von D-Optimalen Versuche erfordert folgende Schritte:

1. Definition von Ziel- und Einflussgrößen
2. Definition des Modells (Regressionsgleichung)
3. Hinzufügen von bereits durchgeführten Versuchen und Ergebnissen
4. Erzeugung der Kandidaten-Menge, aus denen die Versuchsläufe stammen können (wird von der Software übernommen)
5. Auswahl eines D-Optimalen Versuchsplans (wird von der Software übernommen)
6. Evaluierung des erzeugten Versuchsplans

Eine detaillierte Beschreibung zur Durchführung von D-Optimalen Versuchen findet sich in der Regel in der Hilfedatei der verwendeten Software oder z.B. in [Wem06], [Bar94], [Ham00] oder [Mas03].

Im folgenden Kapitel 4.5.3 wird das Vorgehen zur Durchführung eines DoE am HPT

mittels eines D-Optimalen Versuchsplans dargestellt. Als Beispiel dient ein von einem Studenten durchgeführtes DoE an einem Gerät im Reinraum. Als Software wurde CornerstoneTM benutzt.

4.5.3 Umsetzung am HPT

Beispielhaft für die Durchführung eines DoE wird die Optimierung eines Trockenätzprozesses („Spitzenprozesses“) an der Trockenätzanlage R.I.B.-Etch 160 (Reactive Ion Beam Etch) im Folgenden vorgestellt. Ziel des zu optimierenden Spitzenprozesses ist es, sowohl die Ätzrate als auch die Selektivität zum geätzten Material zu maximieren. Bei der Ätzung entstehen pyramidenartige Strukturen, die am oberen Ende ein möglichst schmales Plateau aufweisen sollen (siehe Abbildung 31), das mit einem nachfolgenden Prozess-Schritt zu einer Spitze geformt werden soll. Eine genaue Beschreibung des Prozesses ist in [Bib07] zu finden.

Die Durchführung eines DoE ist an einige Voraussetzungen gebunden. Es muss sichergestellt werden, dass das verwendete Gerät (möglichst) zu 100% reproduzierbare Ergebnisse liefert. Dies ist bei industriellen Anlagen aufgrund der Standardisierung der Geräte gegeben. Bei Geräten in universitären Reinräumen ist diese Voraussetzung nur sehr schwer zu erfüllen, da die Geräte u.a. zu Forschungszwecken teilweise umfunktioniert wurden und immer verschiedene Prozesse untersucht und unterschiedliche Einstellungen vorgenommen werden.

Bei der Trockenätzanlage am Lehrstuhl ist ein zusätzliches Hindernis, dass die bei der Versuchsdurchführung vorgegebenen Eingabewerte aufgrund von Verschleiß am Gerät teilweise nicht einstellbar sind.

Aufgrund dieser Einschränkungen war von Anfang an klar, dass es möglich ist, dass das Ergebnis des DoE evtl. nicht die idealen Parameter liefert. Am HPT war bekannt, welche Einstellungen am Gerät vorgenommen werden können und welche Kombinationen erlaubt sind und welche nicht. Aber es gab für den Spitzenprozess keinerlei Erfahrungen, welche Parametereinstellungen sinnvoll sind.

Aus diesem Grund fiel die Entscheidung, trotzdem ein DoE durchzuführen, da ein DoE eine optimale Kombination an Parametern liefert, um mit möglichst wenigen Versuchen das Optimum zu erreichen.

Im Folgenden wird das durchgeführte DoE Schritt für Schritt erklärt. Dabei wird nicht auf die Eigenheiten der verwendeten Software CornerstoneTM eingegangen, sondern das Augenmerk darauf gelegt, wie die Abfolge für ein DoE ist und worauf bei der Interpretation der Ergebnisse geachtet werden muss.

Problemstellung

Als Problemstellung für das durchzuführende DoE wurde die Maximierung der Ätzrate ER_{S_i} festgelegt. In Tabelle 14 werden die Parameter der Trockenätzanlage und die möglichen Einstellwerte aufgeführt. Diese Einstellgrößen (oder Faktoren) werden zusammen mit den Zielwerten ER_{S_i} und Selektivität eingegeben und definiert, d.h. die möglichen Einstellungen werden festgelegt. Im Anschluss daran wird das gewünschte Design gewählt. In diesem DoE

ist nur ein D-Optimales Design möglich, da die Werte nicht orthogonal sind, d.h. nicht für jede Einstellung gleich viele unterschiedliche Werte zur Verfügung stehen. Es gibt nur eine n- oder p-Dotierung, aber drei verschiedene Einstellmöglichkeiten für z.B. IBV (siehe Tabelle 14). Außerdem können noch zusätzliche Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Parameter	Mögliche Einstellungen
Dotierung	n oder p
Gas: Chlor [%]	20, 40, 60
Gas: Argon [%]	20, 40, 60
I.B.V. (Beschleunigungsspannung)[V]	250, 300, 350, 400, 450, 550
MW (Mikrowellenleistung)[W]	120, 200, 300
Acc(eleration) [V]	-15, -50, 0

Tabelle 14: Parameter und Einstellungen für die Trockenätzanlage

Bei einem Vollfaktoriellen Versuch müsste jede einzelne Einstellung miteinander kombiniert werden. Wenn die Dotierung nicht beachtet wird, wären dies $5^3 = 125$ Kombinationen.

In Tabelle 15 werden die durch das D-Optimale Design errechneten Parameterkombinationen, die den gesamten Versuchsraum optimal abdecken, aufgeführt.

Versuch	Dotierung	Chlor [%]	Argon [%]	IBV [V]	MW [W]	Acc [V]
1	n	20	60	300	120	0
2	n	60	60	400	120	0
3	p	40	60	350	200 / 170	0
4	n	20	60	450	200	0
5	p	20	20	500	200	0
6	n	40	20	250	300	0
7	p	60	40	300	300 / 190	0
8	p	40	40	450	120	-50
9	n	40	40	500	120	-50
10	n	60	20	300	200	-50
11	n	60	40	350	200 / 180	-50
12	p	20	60	250	300 / 170	-50
13	n	40	40	400	300 / 205	-50
14	p	60	20	250	120	-150
15	n	20	40	250	200	-150
16	p	40	60	300	200 / 180	-150
17	p	20	20	400	200	-150
18	n	20	20	350	300	-150
19	n	60	20	450	300	-150
20	n	60	60	500	300 / 195	-150

Tabelle 15: Errechnete Einstellungen für das DoE

Es ist zu erkennen, dass in Spalte „MW“ in Tabelle 15 in einigen Zeilen zwei Werte aufgeführt sind. Dies hat den Grund, dass die Einstellungen in der vorgegebenen Kombination zu einer Instabilität im Prozess führen, weshalb die Werte für MW angepasst werden mussten [Bib07].

Nach Beendigung der Versuchsreihe wurde eine Tabelle mit den Ergebnissen erstellt (siehe Tabelle 16) und an CornerstoneTM übergeben. Außerdem wurden die abgeänderten Werte für MW in der Tabelle eingetragen, so dass diese Werte zur Berechnung des besten Parametersatzes verwendet werden.

Versuch	E_{Si}	Selektivität
1	15,1	1,9
2	19,7	2,8
3	16,8	3,2
4	18,7	2,1
5	17,4	1,9
6	15,8	1,9
7	18,2	2,1
8	22,8	2,0
9	22,4	1,6
10	17,2	2,7
11	19,3	2,7
12	9,7	2,5
13	19,8	2,1
14	12,9	2,7
15	12,5	2,1
16	15,5	2,7
17	15,6	2,4
18	12,3	1,6
19	27,0	1,9
20	32,0	1,7

Tabelle 16: Ergebnisse aus den Versuchen für das DoE

Die Software übernimmt die Berechnung, mit der aus den vorhandenen Ergebnissen die Kombination an Parametern berechnet wird, die zu einer maximalen Ätzrate ER_{Si} führen. Die Parameter sowie die Ergebnisse werden in Tabelle 17 dargestellt.

Dotierung	Chlor [%]	Argon [%]	IBV [V]	MW [W]	Acc [V]	E_{Si}	Selektivität
n	60	60	500	195	-150	32,0	1,7

Tabelle 17: Berechnete optimale Parameter und Einstellungen für die Trockenätzenanlage

Die berechnete optimale Parameterkombination ist eine Kombination, die bereits durch Versuch 20 abgedeckt wurde. Dieser Versuch liefert nach einem Vergleich mit den restlichen 19 Versuchen tatsächlich die beste Parameterkombination. In Abbildung 30 ist die Spitze aus Versuch 9 (zweit höchste Ätzrate) abgebildet. Hier ist zu sehen, dass die Spitze sehr breit ist und auch ein sehr breites Plateau aufweist. Dies würde eine sehr intensive Nachprozessierung erfordern, bei der damit zu rechnen wäre, dass keine Pyramide mit einem spitzen oberen Bereich entsteht. In Abbildung 31 ist die Spitze aus Versuch 20 (beste Parameter) abgebildet. Diese Spitze hat die Form einer Pyramide mit einem sehr kleinen Plateau, was Ziel des Versuchs war.

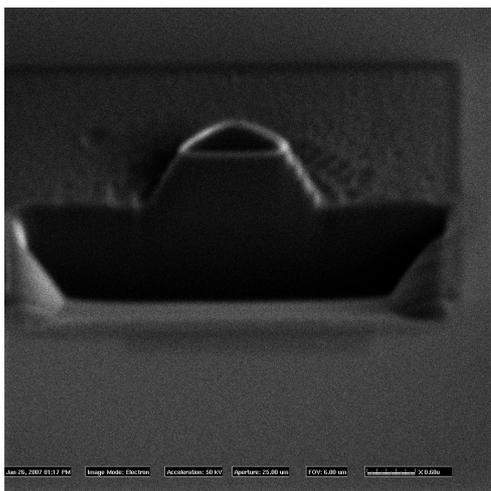


Abbildung 30: Spitze aus Versuch 9 - aus [Bib07]

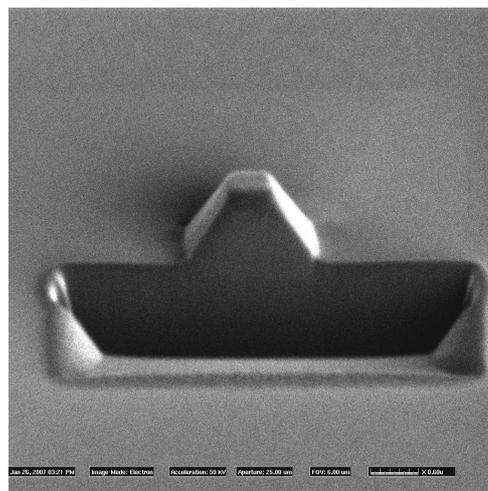


Abbildung 31: Spitze aus Versuch 20 - aus [Bib07]

4.5.4 Fazit DoE am HPT

Das Werkzeug Design of Experiments ist ein mächtiges Hilfsmittel, durch welches eine Erleichterung und Systematisierung bei der Versuchsdurchführung erreicht werden kann.

Ein DoE ist für den Einsatz am HPT gut geeignet, um das Prozessverhalten von Geräten zu charakterisieren und neue Prozesse zu testen. Folgende Kriterien sollten beachtet werden, um ein DoE durchzuführen:

- Kenntnisse über Reproduzierbarkeit der Geräte und Prozesse ist unabdingbare Voraussetzung.
- Ergebnisse müssen immer hinterfragt werden.
- Geräte sollten nur in „warmem“ Zustand für ein DoE verwendet werden.
- Nach einem Umbau von Geräten sollte ein DoE durchgeführt werden.
- Nach einem DoE sollte der Prozess bzw. das Gerät mittels SPC weiter kontrolliert werden.
- DoE ist zwar zeitintensiv, spart aber trotzdem durch die vorhandene Systematik mehr Zeit als bei Nicht-Verwendung.

Eine genaue Kenntnis der Reproduzierbarkeit der Geräte, die für ein DoE verwendet werden sollen, ist sehr wichtig. Ergebnisse können nur als sicher bewertet werden, wenn das Gerät in einem bestimmten Bereich immer gleich arbeitet. Ansonsten können durch Prozess-Schwankungen, die vom Gerät verursacht werden, die Ergebnisse verfälscht und falsche Schlüsse daraus gezogen werden.

Aus diesem Grund sollte sich nicht „blind“ auf Ergebnisse verlassen werden, sondern alle Ergebnisse grundsätzlich hinterfragt und auf Plausibilität geprüft werden. Dies kann nur mit einem Verständnis der angewendeten Methodik und Mathematik erfolgen.

Ein DoE sollte auch nur an Geräten in „warmem“ Zustand durchgeführt werden. Industrieanlagen werden permanent genutzt und stehen in (meist für genau einen Prozess) eingefahrenem Zustand zur Verfügung. In einer universitären Umgebung kann es durchaus immer wieder vorkommen, dass Geräte über Tage oder längere Zeiträume nicht benutzt werden. Deshalb sollte immer darauf geachtet werden, dass ein DoE nur an einem Gerät durchgeführt wird, bei dem sichergestellt ist, dass es sich in eingefahrenem und warmen Zustand befindet.

In einer universitären Umgebung werden Geräte öfter „zweckentfremdet“, d.h. sie werden umgebaut, um neue Prozesse testen zu können. In diesem Fall eignet sich ein DoE hervorragend, um mit zeitsparenden Mitteln genügend Versuche durchführen zu können, um einen möglichst idealen Parametersatz zu erlangen.

Nachdem ein passender Parametersatz für ein Gerät bzw. einen Prozess gefunden wurde, sollte dieser auch mittels SPC weiter kontrolliert werden, um zu gewährleisten, dass das Gerät einwandfrei arbeitet, regelmäßig benutzt wird und so für weitere Prozesse zur Verfügung steht. Die Durchführung eines DoE kann je nach Prozess einige Tage in Anspruch nehmen. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass eine Systematik angewendet wird, die garantiert den gesamten Faktorraum abdeckt und passende Ergebnisse liefert. Zwar kann bei wenigen Einstellgrößen und extrem großen Vorwissen auch ein „Schnellschuss“ mit einigen wenigen Versuchen ein gutes Ergebnis erzielen. Aber die Gefahr besteht bei diesem Verfahren, dass das Optimum verfehlt und dies nicht erkannt wird. Auch kann passieren, dass aufgrund zu wenigen Wissens immer mehr Versuche in dem Glauben durchgeführt werden, dass das Optimum bald gefunden wird. In diesem Fall führt das Nicht-Verwenden eines DoE zu einem enormen Zeitverlust.

4.6 Methoden zur Fehlervermeidung

4.6.1 Fehlermanagement

Ein Fehler ist nach DIN das Nichterfüllen einer Anforderung [Din05].

In der Produktion ist es wichtig, mit möglichst wenigen Fehlern zu produzieren. Dabei sollten Fehler am Anfang der Produktion erkannt und durch Korrekturmaßnahmen verhindert werden. Am besten ist es, wenn Fehler überhaupt nicht auftreten, was unrealistisch ist. Aus diesem Grund sollte ein möglichst effektives Fehlermanagement (FM) eingeführt werden, das durch Anwendung von geeigneten Methoden Fehler vor Beginn der Produktion, möglichst bereits beim Design des Produktes, aufdecken und verhindern kann. Falls dies nicht gänzlich gelingen sollte, ist das FM dafür zuständig, bei Auftreten eines Fehlers geeignete Korrekturmaßnahmen in der Produktion zu veranlassen, um den Fehler zu beseitigen und weitere (Wiederhol-)Fehler zu verhindern [Lin05], [Pfe96].

In Tabelle 18 werden Schritte zur effektiven Fehlerbehandlung nach [Lin05] aufgezeigt:

1.	Lenkung fehlerhafter Produkte durch	- Kennzeichnung - Aussondern - Beurteilung und Korrektur - Benachrichtigung der betroffenen Stellen
2.	Sofortmaßnahme	
3.	Fehlerdiagnose	- Probleme eindeutig formulieren - Ausgangssituation untersuchen - Kernproblem identifizieren - Daten erfassen und auswerten
4.	Ursachenanalyse	- Hauptursache analysieren - Symptome und Folgeerscheinungen abgrenzen - Anwendung von Qualitätstechniken
5.	Korrekturmaßnahmen erarbeiten	- Vorhandene Lösungen anwenden - Neue Lösungen suchen - Dauerhafte Verbesserungen festlegen
6.	Korrekturmaßnahmen umsetzen	- Verantwortlichkeiten festlegen - Korrekturmaßnahmen einführen
7.	Erfolgskontrolle	- Wiederauftreten verhindern - Kontrollen planen und durchführen

Tabelle 18: Schritte zur effektiven Fehlerbehandlung

Im Fehlermanagement werden Fehler in drei Klassen eingeteilt:

- Kritische Fehler: Fehler, die schwerwiegende Folgen haben und bei ihrem Auftreten Menschen gefährden.
- Hauptfehler: Fehler, die nicht kritisch sind, aber Folgen wie Ausfall oder Unbrauchbarkeit verursachen (Geräte, Produkte).

- Nebenfehler: Fehler, der die Brauchbarkeit eines Produktes (wahrscheinlich) nicht besonders herab setzt bzw. den Betrieb oder Gebrauch nur geringfügig beeinflusst [Lin05].

Fehler sollten systematisch behandelt werden, da sie meist eine Fülle von Informationen mit sich bringen, die geordnet und analysiert werden müssen. Zur Auswertung von Fehlern können QM-Methoden wie FMEA (siehe Kapitel 3.4.8), die 8D-Methode (siehe Kapitel 4.6.4) oder auch ein Ishikawa-Diagramm (siehe Kapitel 4.8) zu Hilfe genommen werden.

Umsetzung am HPT

Fehlermanagement FM ist eine Methode, die als Oberbegriff für verschiedene Methoden dient, um Fehler zu vermeiden oder auszuschließen. Vor allem aber sollte FM als Arbeitsphilosophie von allen Mitarbeitern verinnerlicht und umgesetzt werden. Dabei zählt nicht nur die Anwendung von Methoden, sondern die aktive Beteiligung an Fehlervermeidung und Lösungsansätzen zur Fehlerbehebung.

Durch ein kontinuierliches FM können Fehler von der Vorüberlegung bis hin zur Produktion (oder Prozessierung) vermieden werden. Zur Vermeidung von unbeabsichtigten Fehlern wird die Methode Poka Yoke, das in Kapitel 4.6.3 diskutiert wird, am HPT erfolgreich verwendet. Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse FMEA (siehe Kapitel 3.4.8) wird für eine umfassende und frühzeitige Fehlerdiagnose zur Befriedigung von Kundenwünschen verwendet. Diese Methode ist für die Anwendung am HPT nur bedingt geeignet (siehe Kapitel 3.4.8). Andere am HPT verwendete Methoden wie die 5S-Methode oder die 8D-Methode werden in den Kapiteln 4.6.2 und 4.6.4 ausführlicher beschrieben.

Fehlermanagement wird von allen Mitarbeitern des HPT aktiv betrieben, indem sowohl bei (Vor-)Überlegungen als auch bei der Prozessierung immer penibel auf Korrektheit in der Durchführung und sauberes Arbeiten geachtet wird. Auch wird eine aktive Kommunikationspolitik verfolgt. Dabei wird jeder aufgetretene Fehler in der Technologierunde (siehe Kapitel 4.7) angesprochen und Maßnahmen zur Ursachenbekämpfung und Behebung des Fehlers diskutiert.

Insgesamt konnte seit der Einführung des QMS am HPT beobachtet werden, dass Fehlermanagement wesentlich intensiver und aktiver betrieben wird als vorher. Dies zeigt sich in der intensiveren Kommunikation unter den Mitarbeitern und in den immer länger und ausführlicher werdenden Technologierunden. Auch kann beobachtet werden, dass eine Dokumentation von Problemen und Lösungen in der Wissensdatenbank erfolgt, soweit sie allgemein anwendbar sind. Spezielle (und vor allem nicht genau erforschte) Probleme werden allerdings nur zögerlich dokumentiert, da eine Hemmung besteht, Teillösungen festzuhalten. Als nächster Schritt ist vorgesehen, die Mitarbeiter zu motivieren, auch Teillösungen zu dokumentieren und in einen speziellen Bereich der Wissensdatenbank zu schreiben, der evtl nicht für jeden zugänglich ist. Dies würde dazu beitragen, dass Wissen (auch nur Teilwissen) für Nachfolger dokumentiert wird, die darauf aufbauend weiter an einer Lösung arbeiten können.

4.6.2 5 S - Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke

Die Methode der 5 S kommt aus Japan und dient dazu, mit fünf Aktivitäten die Instandhaltung von Produktionsmitteln zu stabilisieren [Lin05], [Kam99]:

Seiri heißt „Ordnung schaffen“ und hat zum Ziel, Unnötiges von Arbeitsplatz zu entfernen. Dazu können überflüssiges Werkzeug, aber auch Papiere und Dokumente zählen.

Seiton heißt „Ordnungsliebe“. Es wird darauf geachtet, dass Werkzeug immer in einwandfreiem Zustand ist und am richtigen Platz liegt.

Seiso heißt „Sauberkeit“. Sauberkeit von Maschinen und vom Arbeitsplatz steht an erster Stelle.

Seiketsu heißt „persönlicher Ordnungssinn“ und zielt darauf ab, dass jeder Mitarbeiter auf Ordnung achtet und sich diese zur Gewohnheit macht.

Shitsuke heißt „Disziplin“. Regeln und Abläufe sind penibel einzuhalten.

Umsetzung am HPT

Die Methoden der 5 S werden im universitären Labor in dem Sinn angewendet, dass es klare Vorschriften für das Verhalten am Arbeitsplatz HL-Labor gibt, die auch die Handhabung von „Werkzeug“ mit einbeziehen, was hier eher Chemikalien und Gefäße als Hammer und Schraubenzieher sind.

Ordnung ist im HL-Labor das wichtigste Handwerkszeug, da viele unterschiedliche Prozesse von unterschiedlichen Personen auf sehr engem Raum durchgeführt werden. Deshalb ist ein aufgeräumter Arbeitsplatz, beschriftete Gefäße und Sauberkeit sowohl bei der Arbeit als auch beim Aufräumen unbedingt nötig. Dieses Verhalten wird jedem, der im HL-Labor arbeitet, von Anfang an eingeschärft und von allen gegenseitig kontrolliert.

Eine Einschränkung gibt es allerdings, was die 5 S betrifft. Die fünfte Methode, Shitsuke, wird bei Standardprozessen und -abläufen penibel eingehalten. Wenn aber neue Prozesse erarbeitet und etabliert werden, können festgelegte Abläufe oder (Bedien-)regeln nicht eingehalten werden. Für neu zu testende Prozesse werden vor der Durchführung die geplanten Abläufe genau durchdacht und festgehalten. Haben sich diese etabliert, werden sie als allgemein gültige Prozesse dokumentiert und beschrieben.

Als Beispiel ist hierfür die Parametereinstellung für die Belichtung neuer Strukturen zu nennen. Das Belichtungs- oder Lithographiegerät muss für jede neue Struktur, die belichtet werden soll, neu eingestellt werden. Hierfür werden eine Testreihe basierend auf Erfahrungswerten gefahren und die gefundenen Parameter für die speziellen Strukturen dokumentiert und in regelmäßigen Abständen verifiziert.

Die Dokumentation von Arbeitsanweisungen und Anweisung zur Durchführung von Prozessen sowie Sicherheitsvorschriften ist in der eigens für das Labor des HPT eingeführten Wissensdatenbank detailliert dokumentiert und beschrieben. Eine Beschreibung dieses Systems findet sich in Kapitel 5.

4.6.3 Poka Yoke

Poka Yoke ist japanisch und heißt soviel wie unbeabsichtigte und zufällige Fehler (poka) vermindern (yoke). Diese Methode ist auch unter *Null-Fehler-Prinzip* bekannt und wird hauptsächlich in der Serienfertigung angewendet. Poka Yoke ist eine Methode, die keine explizite Anwendungsbeschreibung aufweist. Es ist vielmehr eine Philosophie, die in einer Produktionsstätte oder einem Labor vorherrschen sollte und andere Methoden des QM zur Umsetzung zu Hilfe nimmt.

Wichtig ist, dass die Anwender das Fehlerpotential ihrer Arbeit kennen. Fehler, die nicht im Erfahrungsschatz der Anwender liegen, können nicht verhindert werden. Poka Yoke setzt voraus, dass die Prozesse und ebenso die Fehlermöglichkeiten im Unternehmen sehr gut bekannt sind, d.h. dass Methoden wie FMEA (Kapitel 3.4.8) oder SPC (Kapitel 4.4) im Einsatz sind. Es ist ausgeschlossen, Poka Yoka am Anfang der Einführung eines neuen QMS einzuführen.

Der Grundgedanke von Poka Yoke ist, dass Fehler aus Irrtümern wie Verwechslung, Vergessen oder auch Kommunikationsmangel entstehen. Es wird versucht, Betriebsmittel fehlersicher zu machen und eine fehlerlose Fertigung zu erreichen, obwohl Faktoren vorhanden sind, die Fehler begehen können, z.B. Menschen [Her99], [Lin05], [Shi95].

Umsetzung am HPT

Eine Voraussetzung für die Einführung von Poka Yoke ist, dass Methoden wie FMEA oder SPC eingesetzt und verwendet werden. FMEA wird nicht wie in der Literatur beschrieben (siehe auch Kapitel 3.4.8) von den Wissenschaftlern angewendet, sondern aktiv von den einzelnen Doktoranden betrieben, v.a. in der Prozessentwicklung. Dabei wird ein Prozessdesign entwickelt, das versucht, mögliche Fehler während der Fertigung auszuschließen oder zu kompensieren. Statistische Prozesskontrolle wird am HPT in Form von Qualitätsregelkarten erfolgreich eingesetzt und verwendet (siehe Kapitel 4.4).

Aus diesem Grund kann Poka Yoke im weitesten Sinn als anwendbare Methode betrachtet werden, auch wenn nicht alle „formalen“ Voraussetzungen erfüllt sind.

Die Poka Yoke-Philosophie wird am HPT sehr intensiv gepflegt, da durch unbeabsichtigte Fehler Forschungsergebnisse verfälscht werden können und damit die Arbeit der Prozessentwicklung von Monaten oder Jahren zunichte gemacht werden kann. Aus diesem Grund wird bei der Arbeit im HL-Labor penibel auf Sauberkeit und korrektes Durchführen der Arbeitsschritte geachtet, um die Fehlerwahrscheinlichkeit möglichst gering zu halten.

Auch wird bereits im Stadium der Prozessentwicklung darauf geachtet, dass die Einzelprozesse möglichst stabil und robust sind, was z.B. durch ein DoE (siehe Kapitel 4.5) gewährleistet werden kann. Durch intelligentes Prozessdesign kann zusätzlich erreicht werden, dass auch trotz Fehler im Einzelprozess das gesamte Bauelement funktioniert. Allerdings können nur einzelne Prozessschritte mit dieser Methode robust gestaltet werden. Um eine genauere Aussage über diese Methode treffen zu können, müssten detaillierte Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung und daraus resultierenden Folgen für das Bauelement während des Prozesses stattfinden.

4.6.4 8D - Methode

Die 8D-Methode wurde vom Automobilhersteller Ford entwickelt und ist ein Instrument zur Analyse und Beseitigung der Ursachen von Fehlern [For92]. Die 8D-Methode ist eine Methode zur Unterstützung von Kaizen und versucht durch Vermeidung und Verminderung von Fehlern eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse eines Unternehmens zu fördern.

Durch systematisches Vorgehen sollen in der Problemanalyse die Ursache von (versteckten) Fehlern gefunden werden. Dabei werden Qualitätsprobleme gesammelt, dokumentiert und analysiert, was die Lösungsfindung erleichtert. Auch kann auf die Dokumentation früherer Fehler und deren Lösung zurückgegriffen werden.

Die 8D-Methode wird verwendet, wenn ein Problem auftritt, dessen Ursache unbekannt ist. Dabei werden folgende 8 Schritte abgearbeitet [Lin05]:

1. Zusammenstellung eines Teams aus Experten, wobei eine freiwillige Teilnahme wichtig ist und ein Teamleiter benannt werden sollte.
2. Möglichst präzise Beschreibung des Problems.
3. Sofortmaßnahmen zur Schadensbegrenzung einführen und Überprüfung der Wirkung.
4. Grundursachen ermitteln und nachweisen (Tests, Experimente ...).
5. Verbesserungsmaßnahmen festlegen.
6. Verbesserungsmaßnahmen dauerhaft einführen.
7. Wiederauftreten durch Korrekturmaßnahmen, Arbeitsanweisungen verhindern.
8. Leistung des Teams würdigen.

Umsetzung am HPT

Die 8D-Methode wird am HPT hauptsächlich bei sehr komplexen Problemen angewendet. Im Regelfall beschäftigen sich die Wissenschaftler zusammen mit ihren Studierenden (Diplom, Bachelor) mit auftretenden Problemen bei Prozessen. Bei anderen Problemen, also z.B. Problemen mit Geräten oder der Infrastruktur, wird zuerst versucht, in der Technologierunde (siehe Kapitel 4.7) eine Lösung für das Problem zu finden bzw. die Ursache zu bekämpfen. In der Technologierunde sind alle Wissenschaftler, Studierende und Techniker/Nichtwissenschaftler inklusive dem Technologieleiter versammelt, so dass gewährleistet ist, dass auftretende Probleme umfassend analysiert werden.

In 95% der Fälle werden entweder selbständig von den Wissenschaftlern oder in Gemeinschaftsarbeit in der Technologierunde die Ursachen von Problemen und eine Lösung gefunden und die Verbesserung umgesetzt. In den restlichen 5% der Fälle stellt sich meist heraus, dass das aufgetretene Problem entweder nicht relevant genug oder mit den vorhandenen Mitteln (meist Messtechnik) nicht lösbar ist.

Gefundene Ursachen und Lösungen für ein Problem werden vom Geräteverantwortlichen und von den Wissenschaftlern für Prozesse zuerst in der Technologierunde vorgestellt und anschließend in den jeweils passenden Geräte- oder Prozess-Ordner in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) eingepflegt und beschrieben.

Beispiel für die Lösung eines 95%-Problems:**Neue Passivierungsschicht für MOSFET-Standardprozess**

Im MOSFET-Standardprozess wurde bei Auswertungen der Einsatzspannung (k.o.-Kriterium für MOSFETs) festgestellt, dass die Verschiebung der Einsatzspannung nicht zu den theoretischen Überlegungen und Berechnungen passt. Dies veranlasste den Wissenschaftler, der sich hauptsächlich mit MOSFET-Technologie beschäftigt, dazu, sich zu überlegen, was diese falsche Verschiebung auslösen könnte. Nach genaueren Überlegungen kam er zu dem Schluss, dass die negativen Oxidladungen, die im Gateoxid vorhanden waren, nur aus dem letzten Prozess-Schritt, dem Sputtern, kommen konnten. Dieser Prozess-Schritt dient ausschließlich dazu, die Bauelemente auf der Scheibe vor äußeren Einflüssen zu schützen.

Im Sputterprozess wird ein Gas (Argon) ionisiert und schlägt aus einem so genannten Target Oxid heraus, das sich auf der Oberfläche der Scheibe mit den MOSFETs anlagert. Dabei kann es geschehen, dass diese beschleunigten Argon-Ionen selbst auf das Gateoxid der MOSFETs auf den Scheiben treffen und damit negative Oxidladungen verursachen, d.h. das Gateoxid zumindest teilweise zerstören.

Die Lösung für dieses Problem ist, dass nun statt des Sputteroxids ein „Spin-On-Glas“ (SOG) verwendet wird. Dieses SOG wird wie der Fotolack im Lithographieprozess aufgeschleudert und anschließend bei ca. 200°C ausgeheizt. Diese Methode ist schonender für die Bauelemente und bewirkt, dass nun die gemessene Einsatzspannung mit den theoretischen Überlegungen und Berechnungen übereinstimmt. Nach dieser Verbesserungsmaßnahme ist es möglich, eine genauere Einstellung der Einsatzspannung in der Prozessierung zu realisieren.

Beispiel für ein 5%-Problem:**Nach unten abnehmende Dickenverteilung bei der Oxidation im ATV-Oxidationsofen**

Bei der Oxidierung von Scheiben im ATV-Oxidationsofen tritt das Phänomen auf, dass alle Scheiben eine abnehmende Dicke von oben nach unten aufweisen. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Scheiben unten in dem Schiffchen, also dem Halter, stehen und somit der Sauerstoffgasstrom nicht so gleichmäßig an die Scheiben kommt wie in den oberen Gebieten, die frei stehen.

Als Lösung für dieses Problem wurden verschiedene neue Halter gezeichnet und entworfen. Dabei wurde festgestellt, dass mehrere Möglichkeiten getestet werden müssten und dies sehr viel Geld als auch Zeit in Anspruch nehmen würde, da Spezialkonstruktionen mit speziellem Material eingesetzt werden müssten. Aus diesem Grund entschieden die Experten, dass der Aufwand zu groß für die zu erwartende Verbesserung sein würde. Auch könnte man mit der Inhomogenität, die ca. 1-2 % beträgt, durchaus leben, da diese Abweichung bekannt und konstant immer gleich ist.

Die Verwendung der 8D-Methode vermischt sich stark mit der Methode des Qualitätszirkels (siehe Kapitel 4.7) und wird ausschließlich in Kombination verwendet.

4.7 Qualitätszirkel

Ein Qualitätszirkel besteht aus mehreren Mitarbeitern verschiedener Bereiche eines Unternehmens und hat als Ziel, aktiv eine Verbesserung des Arbeitsbereichs herbeizuführen. Die Gruppe sollte aus etwa drei bis zehn Mitarbeitern bestehen, die von einem Moderator geführt wird. Es werden Schwachstellen und Probleme sowie Lösungen diskutiert [Lin05].

Qualitätszirkel funktionieren nur, wenn die Unternehmensleitung eindeutig einen Auftrag gibt und die Mitarbeiter dementsprechend für diese Aufgabe frei stellt. Außerdem sollte die Teilnahme auf freiwilliger Basis der Mitarbeiter erfolgen und regelmäßig stattfinden sowie dokumentiert werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist, dass ein erfahrener Moderator die Runde leitet, damit die Treffen effizient verlaufen [Lin05].

Qualitätszirkel sind ein wichtiges Instrument zur Qualitätssicherung und -verbesserung, da die Erfahrung der Mitarbeiter bei der Problemlösung genutzt wird. Auch wird die Kommunikation und Motivation innerhalb der Gruppe sowie innerhalb der unterschiedlichen Gruppen (Qualität, Produktion, Forschung etc.) des Unternehmens gestärkt.

Umsetzung am HPT

Am HPT wird ein wöchentliches Treffen mit festem Termin abgehalten. An dieser so genannten „Technologierunde“ nehmen alle Personen teil, die in der Technologie arbeiten, also

- Professoren
- Technologieleiter
- Wissenschaftler: Doktoranden, Post-Doktoranden oder Habilitanden
- Studierende
- Nicht-Wissenschaftler: Chemisch Technische Assistentinnen etc.

Die Moderation der Runde übernimmt der Technologieleiter oder sein Vertreter. Zu Beginn des Treffens werden allgemeine Themen besprochen, wie Termine und Einteilung für den monatlichen Reinraumputz oder den abendlichen Technologierundgang. Danach wird bei jedem vorhandenen Gerät der Status (*benutzt/nicht benutzt/defekt/Verbesserung nötig*) abgefragt und Notizen dazu gemacht. Hierzu wird ein in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) hinterlegtes excel-sheet verwendet. Sollten bei einem Gerät Probleme aufgetreten oder es defekt sein, wird darüber diskutiert und Vorschläge eingeholt, wie das Problem zu beheben ist. Im Anschluss an diese allgemeinen Themen wird über Themen und Problematiken diskutiert, die bei Studierenden oder Wissenschaftlern während ihrer Arbeit in der letzten Woche auftraten.

Die Technologierunde hat sich als sehr wirksame Methode herausgestellt, sowohl prozesstechnische Probleme als auch Probleme mit Geräten zu besprechen und Lösungen zu finden. Lösungen für Probleme (allgemein und speziell) und Hinweise werden in die Wissensdatenbank aufgenommen, so dass sie für jeden zur Verfügung stehen.

4.8 Ishikawa

Das Ishikawa-Diagramm wurde von dem japanischen Professor Ishikawa entwickelt. Es ist eine Methode in Form einer Fischgräte, deshalb auch „Fischgrät-Diagramm“, das zur Visualisierung komplexer Sachverhalte sowie zur Ermittlung von Problemursachen herangezogen werden kann, deshalb auch „Ursache-Wirkungs-Diagramm“. Dabei werden mögliche Ursachen, die eine bestimmte Wirkung auslösen, gesucht und in Haupt- und Nebenursachen eingeteilt [Ish85].

Zur grafischen Darstellung werden die Ursachen in die Verursacher Mensch, Maschine, Material und Methode (Abbildung 32) eingeteilt. Diese so genannten „4M“ führen zusammen zu dem schon bekannten Problem am Ende des waagerechten Strichs des Diagramms, der Ausgangspunkt für die Erstellung eines Ishikawa-Diagramms ist. Die schrägen Pfeile sind die Pfeile der Haupteinflüsse, also die 4M. Zu jedem „M“ führen zusätzlich kleinere Pfeile, die mögliche Ursachen darstellen.

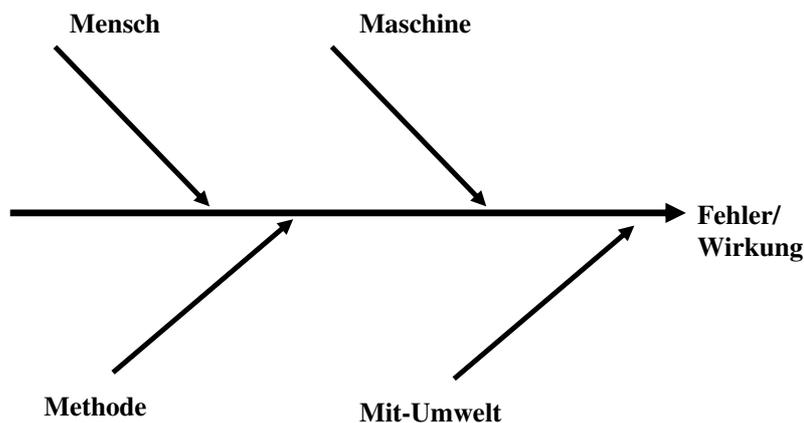


Abbildung 32: Grundsätzlicher Aufbau Ishikawa-Diagramm

Folgende Vorgehensweise hat sich beim Aufstellen von Ishikawa-Diagrammen bewährt [Lin05]:

1. Beschreibung des Problems mit Angaben über:
 - Ort: Wo ist das Problem aufgetreten?
 - Zeit: Wann ist das Problem aufgetreten?
 - Inhalt: Wie lässt sich das Problem konkretisieren?
 - Ausmaß: Welche Auswirkungen hat das Problem?
2. Notierung der Problembeschreibung
3. Aufstellung von Kategorien für die spätere Zuordnung der Ursachen:
 - Mensch, Maschine, Methode, Material, Mitwelt
4. Zusammentragen von Ursachen
5. Zuordnen der gefundenen Ursachen zu den aufgestellten Kategorien. Jede neue Ursache wird an einem neuen Pfeil als Verzweigung eingetragen.

Umsetzung am HPT

Am HPT findet das Ishikawa-Diagramm Anwendung, indem begonnen wurde, für den MOSFET-Standardprozess ein Ishikawa-Diagramm zu erstellen. Dabei wird bei den Einzelprozess-Schritten begonnen und diese Diagramme zu einem größeren Gesamtdiagramm zusammengefügt.

Abbildung 33 zeigt einen Teil des Ishikawa-Diagramms, das am HPT zur Darstellung eines Teilschrittes des MOSFET-Prozesses eingesetzt wird:

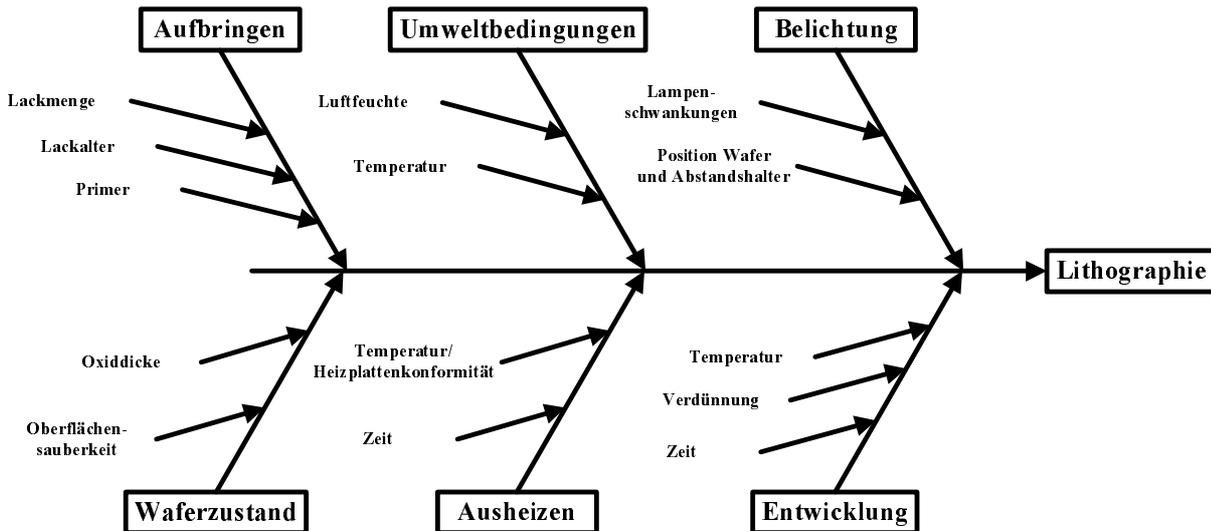


Abbildung 33: Ishikawa-Diagramm: Einzelprozess Lithographie MOSFET-Prozess nach [Sch07]

Bei Betrachtung dieses Diagramms ist schnell zu erkennen, wie komplex schon Teile des MOSFET-Prozess sind und dass ein Ishikawa-Diagramm für Einzelprozesse und für den Gesamtprozess nötig und sinnvoll ist. Vor allem neue Mitarbeiter, Doktoranden ebenso wie Studierende, können sehr stark von dieser Darstellung profitieren, da sie eine schnelle Übersicht gibt, was in jedem Einzelprozess zu beachten ist und wie sich der Gesamtprozess zusammensetzt.

Die Darstellung des Gesamtprozesses für MOSFETs als Ishikawa-Diagramm ist nicht sehr übersichtlich und wird deshalb in Anhang A als Tabelle dargestellt. Wichtig ist die Darstellung von Haupt-Einflussgrößen, die bei der Prozessierung des MOSFETs zu beachten sind. Das heißt, dass eine Aneinanderreihung der Einzelprozesse nicht ausreicht, um ein aussagekräftiges Ishikawa-Diagramm zu erstellen. Vielmehr sollten die kritischen Parameter, die zur Beschreibung des MOSFETs wichtig sind, sowie mögliche Fehlerursachen aus dem Prozess aufgetragen werden.

In Abbildung 34 wird ein Beispieldiagramm gezeigt, in dem die Haupteinflüsse, die zu einer Verringerung der Ausbeute an Bauelementen auf der Scheibe führen, aufgetragen sind. Dabei kommt es nicht darauf an, sich genau an die 4M zu halten. Wichtiger ist, dass die Haupteinflüsse, die hier eher Prozessgeräte sind, detailliert genug aufgetragen werden können. Um Übersichtlichkeit zu wahren ist es durchaus erlaubt und sogar empfehlenswert, sehr tief ver-

zweigige Einflüsse in einem extra Diagramm darzustellen und im Hauptdiagramm dann darauf zu verweisen.

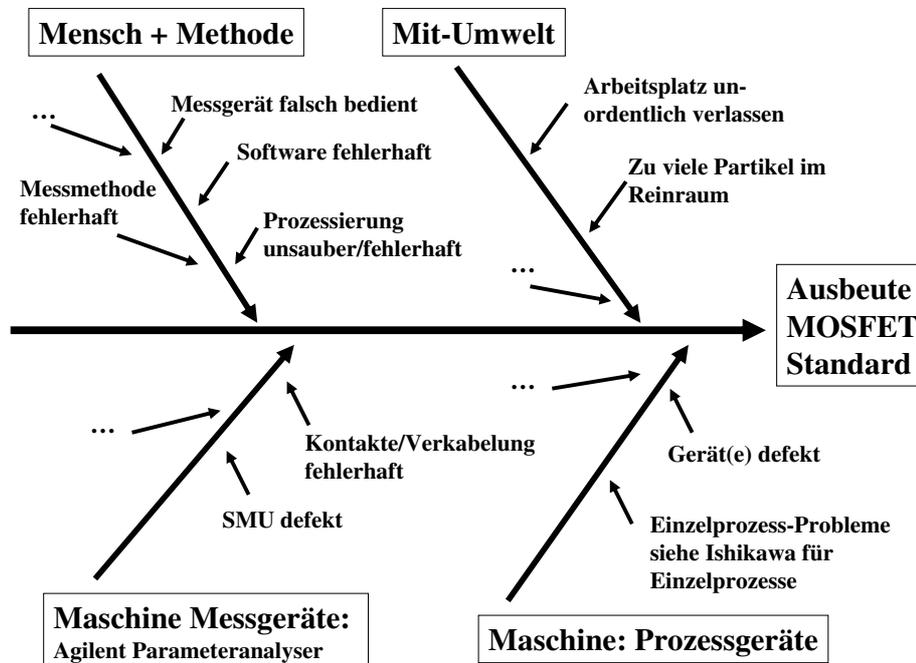


Abbildung 34: Ishikawa-Diagramm: Verringerung der Ausbeute an Bauelementen beim MOSFET-Prozess

Die in Abbildungen 33 und 34 dargestellten Diagramme sind als Beispiele anzusehen. Einzelne Prozesse wurden bisher in *Microsoft Visio* realisiert und in der Wissensdatenbank abgespeichert, um herauszufinden, ob diese Darstellung von den Technologen angenommen und für gut befunden wird. Da viele positive Rückmeldungen, vor allem von Studierenden verzeichnet wurden, ist der nächste Schritt die Implementierung von Ishikawa-Diagrammen innerhalb der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5).

Ein weiterführender Gedanke ist auch, dass eine Fehlersammelliste eingeführt werden könnte, durch welche die häufigsten Ursachen für aufgetretene Fehler zum Vorschein kommen. Bei erneutem Auftreten eines Fehlers kann ein Vorschlag für die Lösung gegeben werden, der auf dieser Fehlersammelliste beruht.

4.9 Vorschlagswesen

Die Methode „Vorschlagswesen“ dient zur permanenten Qualitätsverbesserung durch Einbeziehung von Erfahrungen der Mitarbeiter. Dabei werden Verbesserungsvorschläge von Mitarbeitern eingebracht, die z.B. zur Erleichterung von Arbeitsschritten, Einsparung von Material oder Zeit führen.

Wichtig ist, dass Verbesserungsvorschläge gewürdigt und nach einer Analyse in angemessener Zeit umgesetzt werden. Die Analyse sollte von Experten durchgeführt werden, die den Vorschlag auf Wichtigkeit, Durchführbarkeit und Kosten prüfen. Wenn der Vorschlag zur Umsetzung kommt, ist es weiterhin wichtig, alle Mitarbeiter über die Neuerung zu informieren und den Mitarbeiter, der den Vorschlag eingereicht hat, offiziell zu benennen und evtl. mit einer Prämie zu belohnen [Lin05].

Umsetzung am HPT

Die Methode des Vorschlagswesens wird am HPT sowohl „offiziell“ in der Technologierunde (siehe Kapitel 4.7), als auch im „inoffiziellen“ Kreis unter den Mitarbeiter praktiziert. Studierende können jederzeit Vorschläge zu Verbesserung von Prozessen, Geräte, Abläufen etc. bei ihren Betreuern oder in der Technologierunde einbringen. Die Wissenschaftler bringen neue Vorschläge meist gleich in der Technologierunde ein, damit gemeinschaftlich ein Beschluss zur Durchführung der Maßnahmen getroffen werden kann. Bei Maßnahmen, die finanzielle Mittel erfordern, muss der Geldgeber, also der Professor oder die Projektkasse, zu Rate gezogen werden, bevor eine Entscheidung getroffen werden kann.

Im Allgemeinen ist das Vorschlagswesen ein dynamischer Prozess, der immer wieder zu Verbesserungen im Prozesseablauf oder bei Geräten führt. Als Beispiel soll hier genannt werden, dass ein Student den Vorschlag hatte, dass für ein bestimmtes Gerät im Reinraum, die RIBE, ein Design of Experiments (DoE, siehe Kapitel 4.5) durchgeführt werden sollte, um Prozessparameter für seine Bachelorarbeit herauszufinden. Dieser Vorschlag wurde vom Betreuer aufgenommen. Die Durchführung, Überlegungen und Ergebnisse zum DoE sind in Kapitel 4.5 und in [Bib07] beschrieben.

4.10 Zusammenfassung: Kaizen - Ständige Verbesserung

Das japanische Wort *Kaizen* bedeutet „Veränderung zum Besseren“ und wurde als Methode des QM übernommen, um das Streben nach ständiger Verbesserung zu beschreiben.

Grundsätzlich ist Kaizen eine Geisteshaltung, die im gesamten Unternehmen herrschen und so die Mitarbeiter zu permanentem Nachdenken über Verbesserungsmöglichkeiten anregen sollte. Kaizen bezieht alle Hierarchieebenen mit ein, d.h. vom Top-Manager bis zum Fließbandarbeiter [Lea07], [Kos06], [Lin05], [Kam99].

Dabei stützt sich Kaizen auf bestimmte Prinzipien, wie z.B. [Lin05]:

- Es gibt keine Schwachstellen, die nicht beseitigt werden können.
- Durchgängige Transparenz und Informationsmanagement im Unternehmen.
- Aktive Beteiligung der Mitarbeiter am QM.
- Schulung der Mitarbeiter zur Verbesserung von Kommunikation und Know-How.
- Jeder Mitarbeiter trägt Verantwortung für Qualität.
- Verbesserung soll in kleinen Schritten passieren.
- Fehler sind neue Erfahrungen, d.h. es gibt keine Schuldzuweisungen.
- Methoden des QM finden Anwendung.

Am wichtigsten ist bei der Umsetzung von Kaizen ist, dass diese Philosophie im gesamten Unternehmen verinnerlicht und die Kommunikation unter den Mitarbeitern gefördert und ausgebaut wird.

Umsetzung am HPT

Nach Einführung und Etablierung des QMS am HPT ist es wichtig, das System zu pflegen und eine ständige Verbesserung anzustreben. Diese „Philosophie“ wird Kaizen genannt und ist eine Kombination aus Mitarbeitermotivation, Qualitätsmethoden und Verantwortungsbewusstsein gegenüber Kollegen und der Arbeit. Dies wird am HPT praktiziert. Auch können durch den Einsatz einiger Qualitätsmethoden bereits maßgebliche Verbesserungen sowohl im Kommunikationsbereich als auch im technisch/technologischen Bereich am HPT beobachtet werden:

- Es wurden verschiedene Standardprozesse, unter anderem für die Herstellung von Bauelementen wie MOSFETs eingeführt.
- Bei sämtlichen Mitarbeitern ist ein höheres Qualitätsbewusstsein erkennbar.
- Bedienungsanleitungen für Geräte werden ständig von den Verantwortlichen überarbeitet.
- Es wird mehr Zeit auf Dokumentation und Methodik verwendet als vorher.
- Es erfolgt ein beständiges Erweitern der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) zur Dokumentation des vorhandenen Wissens.
- Es wurden wichtige Informationen, z.B. über Gerätezustand, sowie standardisierte Formulare (Laufzettel, Anleitungen etc.) in der Wissensdatenbank eingeführt (siehe Kapitel 5).
- Es existiert eine bessere Kenntnis der technologischen Prozesse.
- Die Auswertung von Standard-Bauelementen zeigte eine Verbesserung von Kontrollparametern für MOSFETS seit der Einführung des QMS: Einsatzspannung, Yield (Ausbeute), Dekaden I_{on} / I_{off} (siehe folgende Beschreibungen).

- Eine Verkürzung von Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten konnte beobachtet werden (siehe folgende Beschreibungen).

Im Folgenden werden einige Verbesserungen gezeigt, die durch den Einsatz von Qualitätsmethoden erreicht wurden. Auch allgemeine Verbesserungen für die technologische Arbeit und für Studierende werden gezeigt. In Kapitel 5 wird schließlich detailliert beschrieben, wie die Dokumentation des QMS erfolgt.

Verbesserung der Technologie - allgemein

Die Einführung statistischer Methoden zur Kontrolle der Geräte im HL-Labor sowie die grafische Darstellung von Messergebnissen zeigte sehr schnell, dass Qualitätsregelkarten und die Visualisierung von Messergebnissen Vorteile hat. Dies wird im Folgenden anhand einiger Beispiele verdeutlicht.

Verbesserungen durch QRK am Beispiel Leybold-Aufdampfanlage

QRK dienen zur Überwachung, ob ein Prozess stabil ist. Durch die Vorlaufuntersuchungen und die grafische Darstellung der Dickenverteilung des Oxids oder Aluminiums wurde bereits kurz nach Einführung der QRK am HPT ein Potential zur Prozessverbesserung für die Leybold Aluminium-Aufdampfanlage entdeckt. Dies wird im Folgenden dargestellt.

Die Leybold-Aufdampfanlage wird im Standardprozess für MOSFETs zur Metallisierung der Scheiben mit Aluminium verwendet. Bisher gab es immer wieder Probleme mit einem der folgenden Prozess-Schritte, dem Freiätzen der Aluminiumschicht mittels Aluminiumätzlösung. Es wurden viele Transistoren auf den Scheiben zerstört bzw. unbrauchbar, da eine zu starke oder zu geringe Ätzung der Aluminium-Schicht erfolgte.

Nach dem Abschluss der Vorlaufuntersuchungen zur Erstellung der QRK für die Leybold-Aufdampfanlage wurde eine grafische Darstellung der Dickenverteilung des Aluminiums über die vier gleichzeitig prozessierten Scheiben erstellt, wobei die Anordnung der Scheiben zur Prozessierung in der Leybold-Anlage Abbildung 35 dargestellt wird. Dabei stellte sich heraus, dass die Dickenverteilung extrem inhomogen über jeder einzelnen Scheibe ebenso wie über alle vier Scheiben zusammen war. Dies stellt ein Problem dar, da eine zu starke oder zu schwache Ätzung der Aluminiumschicht in den folgenden Prozessen (Prozessschritt *Alu-Ätze* siehe MOSFET-Standardprozess Anhang A) erfolgt und damit die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, dass dadurch einzelne Bauelemente beschädigt oder ganz zerstört werden.

Um eine homogenere Dickenverteilung über den Scheiben zu erreichen, wurde die Öffnung der Blende (siehe Abbildung 36), welche für die Dickenverteilung beim Aufdampfprozess verantwortlich ist, vergrößert und eine weitere Vorlaufuntersuchung durchgeführt [Zhu06]. Diese Untersuchung ergab ein sehr viel homogeneres Bild der Dickenverteilung (siehe Abbildungen 37 und 38). Vergleicht man die beiden Bilder aus Abbildungen 37 und 38, so ist eine eindeutige Verbesserung der Homogenität der Dickenverteilung über die einzelnen Scheiben zu erkennen. Auch ist zu erkennen, dass nach der Prozessverbesserung die Dicke insgesamt von ca. 171 nm

auf ca. 167 nm gesunken ist. Die Punkte im Zentrum der Balkendiagramme, also Scheibe 1 Punkt 5, Scheibe 2 Punkt 4, Scheibe 3 Punkt 2, Scheibe 4 Punkt 1 sind grundsätzlich höher, da an diesem Punkt der Aluminium-Strahl direkt senkrecht auftrifft und somit diese Punkte deshalb am stärksten bedampft werden.

Die Verringerung der Gesamtdicke der Scheiben stellt kein Problem für die weitere Prozessierung der Scheiben dar, solange die neue Dicke der Aluminiumschicht bekannt ist. Sehr viel wichtiger war, dass eine verbesserte Homogenität über die einzelnen Scheiben und über alle vier Schieben zusammen erreicht werden konnte. Damit kann sichergestellt werden, dass die Ätzung der Aluminiumschicht im batch-Prozess erfolgen kann und bessere Ergebnisse liefert, d.h. weniger Bauelemente zerstört werden.

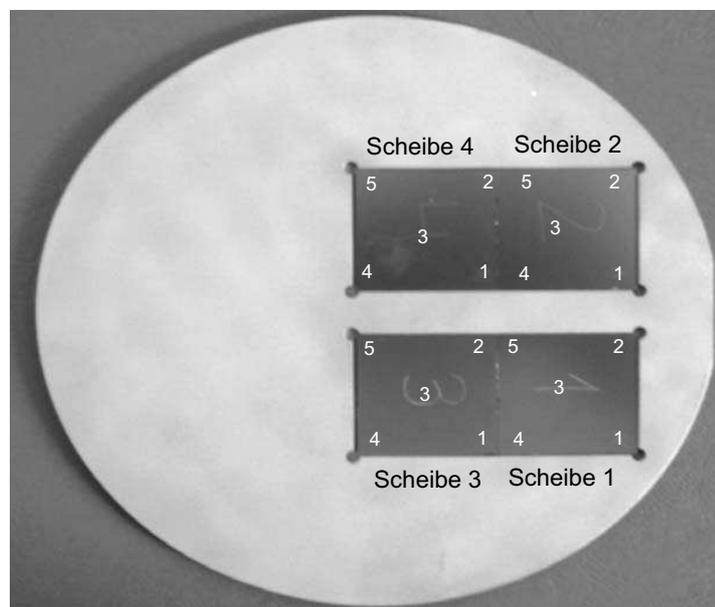


Abbildung 35: Anordnung der Scheiben für Leybold Aluminium Aufdampfen

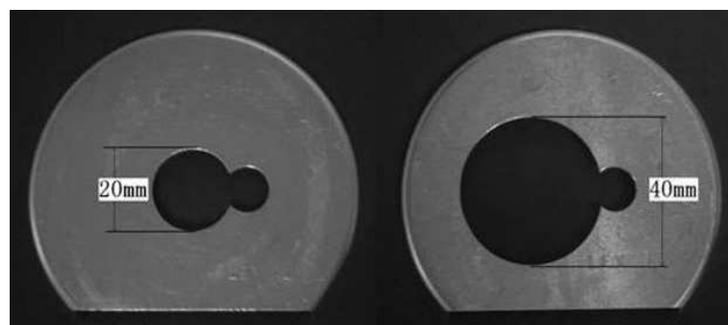


Abbildung 36: Blende für Leybold Aufdampfanlage alt - neu

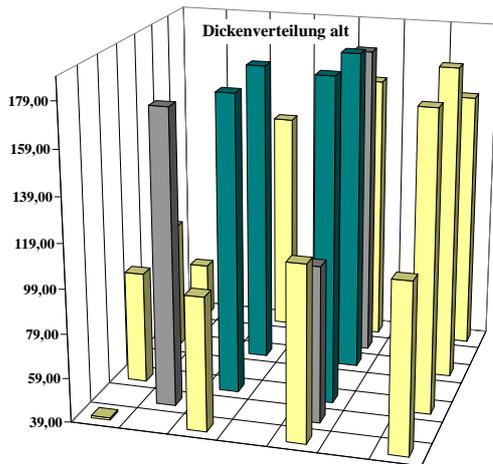


Abbildung 37: Vergleich der Dickenverteilung Aluminium pro vier Scheiben alt

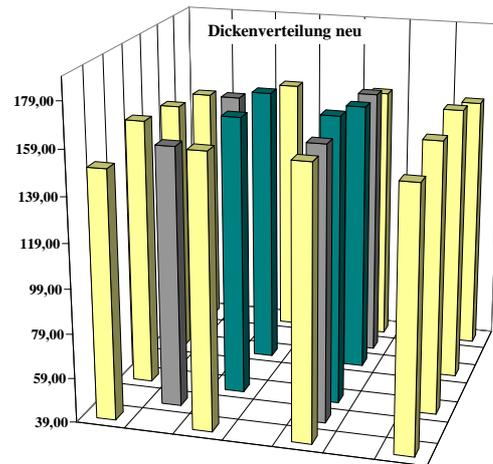


Abbildung 38: Vergleich der Dickenverteilung Aluminium pro vier Scheiben neu

Partikelmessungen

Reinräume werden entsprechend der Größe und Anzahl an vorhandenen Partikeln pro Volumeneinheit Luft klassifiziert. Dies kann mit einem so genannten Partikelmessgerät gemessen werden. Bei der Bestimmung der Reinraumklasse wird normalerweise die Partikelgröße $\geq 0,5 \mu\text{m}$ herangezogen. Wenn alle Werte innerhalb eines bestimmten Intervalls liegen, ist damit die Klasse der Reinraums festgelegt [Hil02], [Gai04].

Reinräume in der Industrie haben Reinraumklasse 1 nach (2001 abgeschafftem) US-Standard US FED STD 209E, d.h. es darf maximal ein Partikel einer bestimmten Größe (meist $0,5 \mu\text{m}$) pro Kubikfuß Luft gemessen werden. Dieser Standard wurde 2001 von der DIN EN ISO 14644 abgelöst, ist aber vergleichbar. Reinraumklasse 1 wäre nach neuem Standard in etwa gleich Klasse ISO 3. Im universitären Bereich sind meist keine Industrie-Reinräume vorhanden, d.h. die Reinraumklasse liegt im Bereich 100-10000 (US), bzw. ISO 4-8. Zusätzlich werden so genannte Laminar- oder Flowboxen verwendet, unter denen kritische Prozesse wie z.B. Lithographie-Schritte stattfinden. Diese Flowboxen reduzieren die Reinraumklasse auf Klasse ISO 3. Grundsätzlich muss im Reinraum Überdruck herrschen, so dass Partikel nicht in den Raum geblasen werden können, sondern durch den kontinuierlich herrschenden Luftstrom nach außen gedrückt werden. Nähere Informationen zur Klassifizierung von Reinräumen finden sich u.a. in [Hil02], [Tra00] oder [Gai04].

Bei der Einführung des QMS wurde als erstes mit der Messung der Partikel im Reinraum begonnen, um einen Überblick zu bekommen, bei welcher Reinraumklasse Bauelemente am HPT hergestellt werden. Seit Einführung der Partikelmessung hat sich herausgestellt, dass eine ständige Kontrolle der Partikel unerlässlich ist. Im Folgenden wird an zwei Beispielen die Notwendigkeit von regelmäßigen Partikelmessungen an unterschiedlichen Punkten im Reinraum gezeigt.

In Abbildung 39 ist der Grundriss des Reinraums mit allen Messpunkten dargestellt. Die kritischsten Punkte sind Messpunkt (MP) 1 nach der Schleuse und MP 2 im Abzug, da sich diese am nächsten zum Ausgang befinden und hier die stärksten Verwirbelungen und somit Verunreinigungen auftreten können. Außerdem sind noch die MP 7 und 10 wichtig, also unter den Flowboxen im Lithographieraum, an denen die kritischsten Prozess-Schritte wie Lithographie durchgeführt werden.

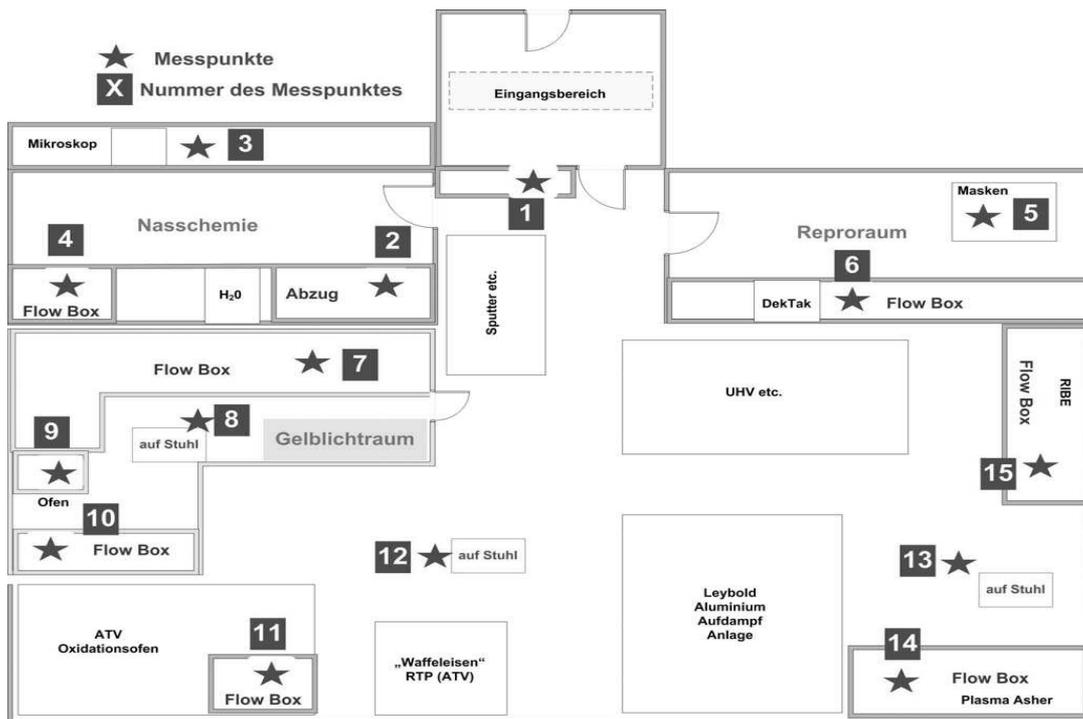


Abbildung 39: Überblick Messpunkte für Partikelmessungen im Reinraum

Die Messung der Partikel erfolgt mit einem Partikelmessgerät, bei dem die in einem Liter Luft angesaugten Partikel gemessen und ausgegeben werden. Messbare Partikelgrößen sind $0,3 / 0,5 / 0,7 / 1 / 2 / 5 \mu m$. Die gemessenen Werte werden anschließend in eine Tabelle in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) eingetragen und grafisch dargestellt. Auf diese Weise können Ausreißer sehr schnell festgestellt und nach möglichen Ursachen gesucht werden.

Als Beispiel wird MP 7 in Abbildung 40 dargestellt. Hier ist deutlich ein Ausreißer zu sehen. Nachforschungen haben ergeben, dass dieser Ausreißer auf einen Ausfall der Flowbox, der entweder durch einen Stromausfall oder zufälliges Berühren des An/Aus-Schalters zurückzuführen ist.

Abbildungen 41 und 42 zeigen die Verringerung der Reinraumklasse an MP 1, d.h. direkt am Eingang nach der Schleuse und an MP 2, d.h. unter dem Abzug. Die Verbesserung konnte nur dadurch erfolgen, dass die Partikelmessungen eingeführt wurden, welche ergaben, dass an diesen Messpunkten im Vergleich zum restlichen Reinraum zu viele Partikel vorhanden

waren. Bei der Diskussion, woher das Problem stammen könnte, wurde festgestellt, dass im Reinraum kein Überdruck herrscht. Diese Überlegungen führten dazu, dass eine Kontrolle der in der Decke vorhandenen Filter erfolgte. Es wurde festgestellt, dass zusätzliche Filter vorhanden sind und beim routinemäßigen Auswechseln, was in regelmäßigen Abständen von einer Fremdfirma durchgeführt wird, die Filter nicht gewechselt werden. Der Grund dafür ist nach wie vor unbekannt, wobei der Verdacht herrscht, dass diese Filter zusätzlich eingebaut wurden und auf den Plänen nicht verzeichnet sind. Dies wurde mittlerweile geändert.

Nach dem Wechsel der Filter stellte sich eine sofortige Besserung ein, indem der zu erwartende Überdruck im Reinraum wieder hergestellt war und die Partikel an den Messpunkten 1 und 2 stark sanken, was auch eine Verringerung der Reinraumklasse bedeutet. Die berechneten Reinraumklassen in den Abbildungen 41 und 42 sind lediglich abgezählt, also nicht „nach Vorschrift“ berechnet, da die Verbesserung nur beispielhaft gezeigt werden soll. Alle gemessenen Werte sowie die genaue Berechnung und der Klassen wird in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) durchgeführt und dort grafisch dargestellt. Die Reinraumklassen nach ISO und US-Standard finden sich in Anhang G.

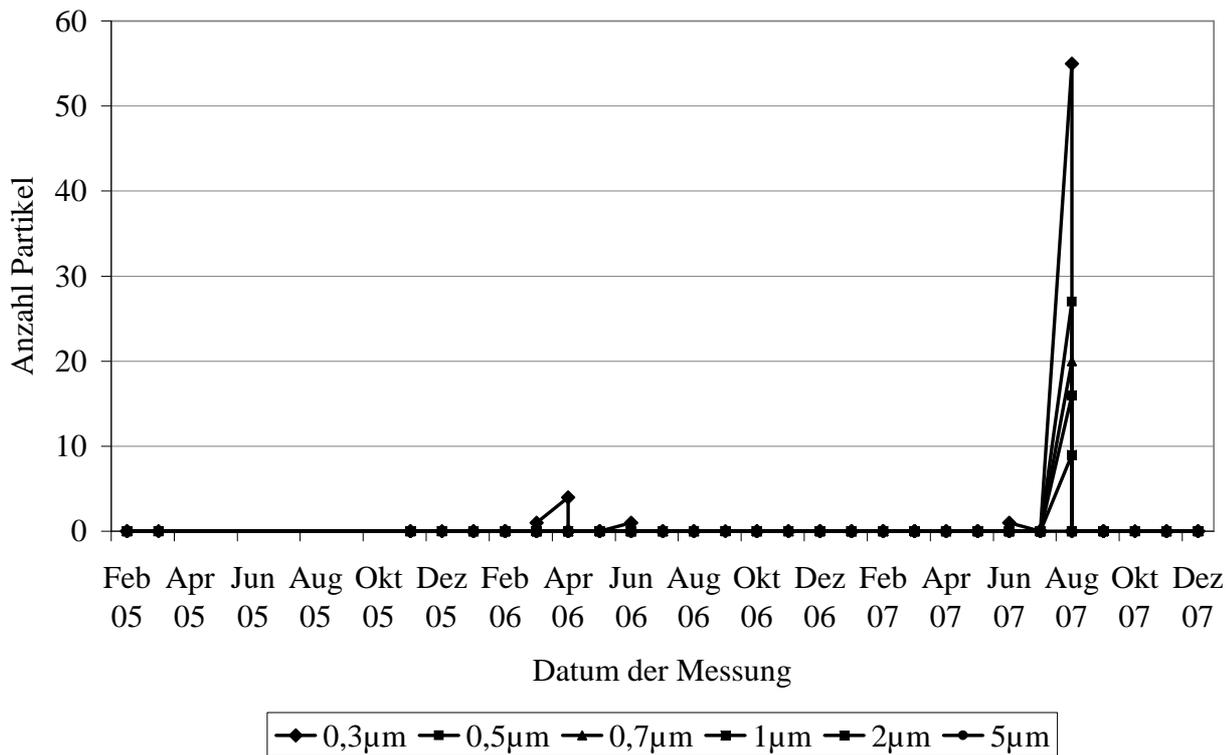


Abbildung 40: Grafische Darstellung der Partikel der Größe 0,3 – 5µm an MP 7

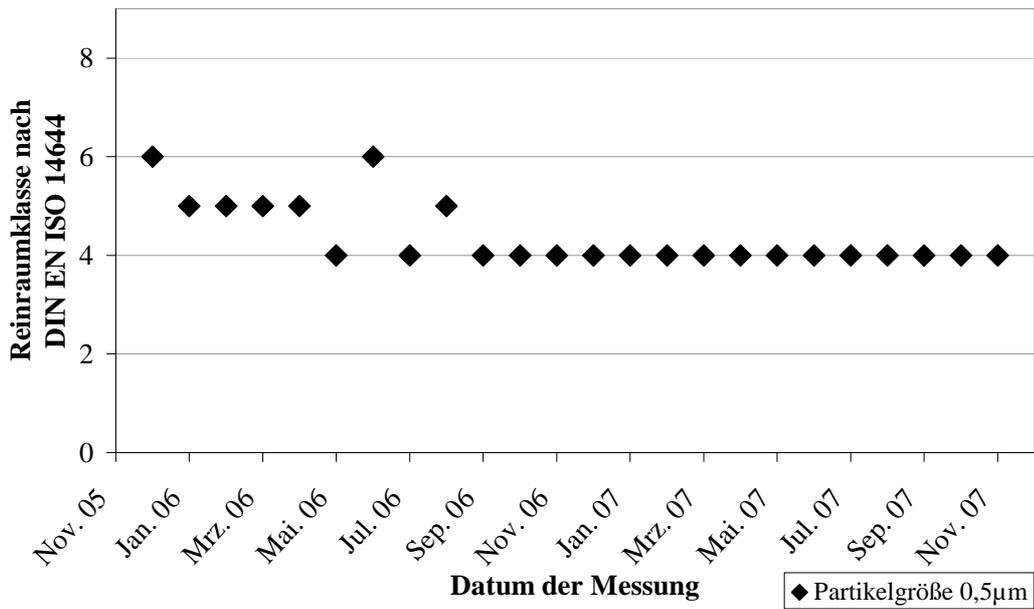


Abbildung 41: Reinraumklasse Schleuse - Partikelgröße 0,5µm

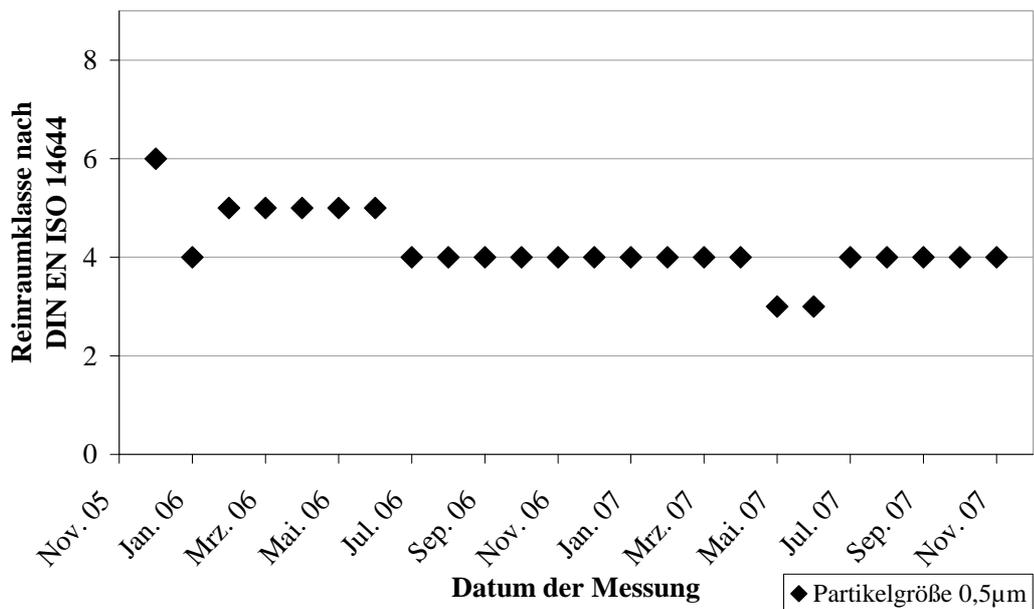


Abbildung 42: Reinraumklasse Abzug - Partikelgröße 0,5µm

Erhöhung der Verfügbarkeit von Geräten

Am HPT wird einmal pro Woche eine Technologierunde (siehe Kapitel 4.7) abgehalten, in der der Status jedes Gerätes abgefragt und festgehalten wird. Wenn das Gerät funktionsfähig ist, wird es als verfügbar eingestuft, wenn es defekt oder in Wartung ist, wird es als nicht funktionsfähig eingestuft. Eine genaue Übersicht über die vorhandenen Geräte ist in der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5) zu finden.

Seit Einführung des QMS kann beobachtet werden, dass die Verfügbarkeit der Geräte insgesamt höher geworden ist und an die 100%-Marke reicht.

In Abbildung 43 ist die Verfügbarkeit aller Geräte am HPT über die Zeit aufgetragen. Die dunkle Linie stellt den gleitenden Mittelwert über 10 Perioden dar. Es ist zu sehen, dass bis ca. Ende 2003 eine Erhöhung der Verfügbarkeit der Geräte von 85% auf ca. 95% erfolgte. In diesem Zeitraum wurde der HL-Labor etabliert und Geräte eingefahren.

Der Einbruch der Kurve kurz nach Beginn bis etwa Mitte des Jahres 2003 stellt den Zeitraum dar, in welchem der Reinraum umgebaut wurde und damit inklusive der Geräte nicht zur Verfügung stand.

Nach dem Umbau bis zur Einführung des QMS stagnierte die Verfügbarkeit bzw. fiel sogar bis auf ca. 90% im Vergleich zu den Werten vor dem Umbau zurück. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sich die Anzahl an Geräten von ca. 30 auf ca. 40 erhöht hat. Auch existiert eine größere Bandbreite an Geräten, z.B. Messgeräte, diverse Prozessgeräte innerhalb und außerhalb des HL-Labors.

Nach Einführung des QMS mit u.a. Statistischer Prozesskontrolle kann beobachtet werden, dass sich die Verfügbarkeit wieder erhöht und mit annähernd 100% die vorhergehende Verfügbarkeit sogar übertrifft. Dieser Status wird seit über einem Jahr konstant gehalten, was nicht nur auf die statistischen Methoden zurückzuführen ist, sondern auch mit dem mittlerweile etablierten Qualitätsbewusstsein aller Technologen zusammen hängt.

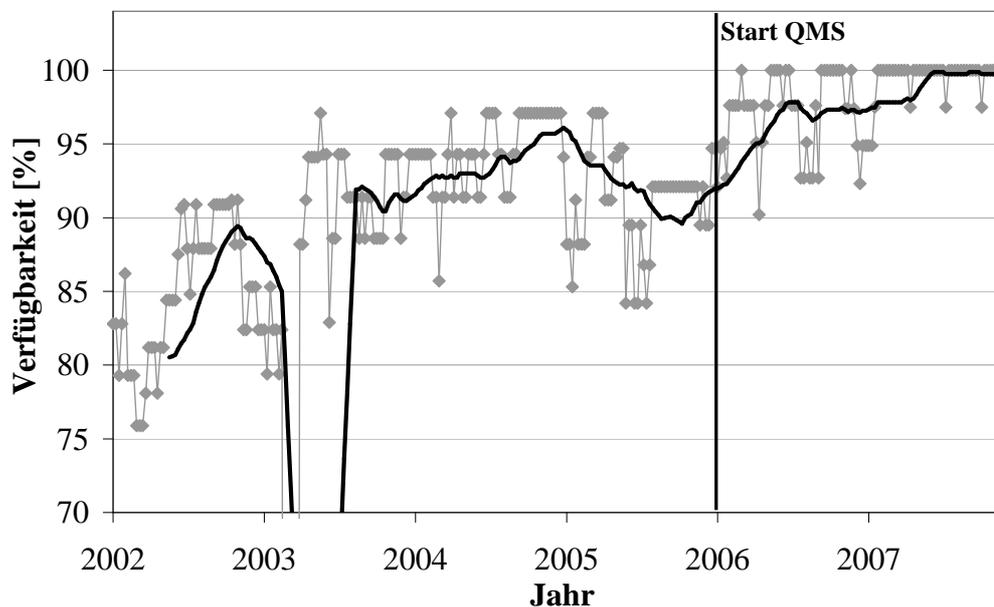


Abbildung 43: Verfügbarkeit der Geräte für Technologie

Verbesserung der Technologie - MOSFETs

Der MOSFET Standardprozess ist der Referenzprozess, an dem die Qualität der technologischen Arbeiten am HPT gemessen wird. Für diesem Prozess wurde ein Laufzettel erstellt, der als Basis für alle auf den MOSFET aufbauenden Prozesse dient. Die dort beschriebenen Einzelprozesse sind die Standardprozesse, die für das Führen der Qualitätsregelkarten für die entsprechenden Geräte benutzt werden.

Wenn ein anderer Prozess etabliert oder getestet werden soll, muss eine Absprache mit dem Geräteverantwortlichen stattfinden, der diesen Prozess dann genehmigen muss.

Zur Messung der elektrischen Parameter von MOSFETs besteht die Möglichkeit einer automatisierten Messung, um genügend, d.h. in der Größenordnung einige Tausend, Bauelemente zu vermessen und damit statistisch relevante Datenmenge zu erhalten. Zusätzlich wurde ein Matlab-Script zur Berechnung von Bauelement-Parametern und Auswertung von Messungen erstellt und etabliert. Dieses Skript generiert aus den Messwerten automatisiert Ergebnistabellen und grafische Übersichten. Durch diese Methoden wird gewährleistet, dass Ergebnisse aus einer großen Anzahl an Bauelementen schnell und zuverlässig generiert werden können. Die Auswertealgorithmen sind überprüft und etabliert [Fab08].

Durch die Kontrolle der Geräte des HL-Labors und der Prozesse wurde eine Prozessierung etabliert, mit der konstante Ergebnisse mit höherer Ausbeute (yield) erreicht werden.

In Abbildung 44 wird die Ausbeute (Yield) aller gemessenen nach Standardprozess hergestellten Scheiben gezeigt. Die dunkle Linie stellt den gleitenden Mittelwert über 10 Perioden dar. Seit Beginn des QMS am HPT konnte die Ausbeute an Scheiben im Durchschnitt von vorher ca. 32% auf 80% kontinuierlich gesteigert werden.

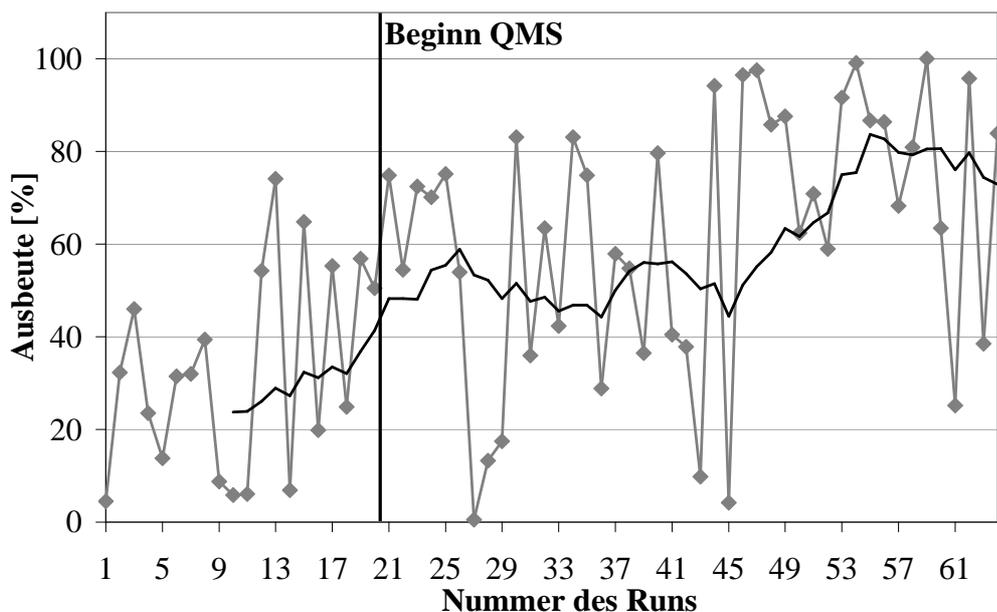


Abbildung 44: Mittelwerte über die Ausbeute von Standard-MOSFETs

Zwei weitere Kriterien, die für die Charakterisierung der Qualität von MOSFETs entscheidend sind, sind die Einstellung der Einsatzspannung V_{th} sowie das Verhältnis I_{on}/I_{off} , die so genannten *Dekaden*. Eine Beispiel-Kennlinie ist in Abbildung 45 abgebildet. Ziel der Prozessierung ist es, MOSFETs mit einer Einsatzspannung von 0V und möglichst großem Verhältnis I_{on}/I_{off} herzustellen.

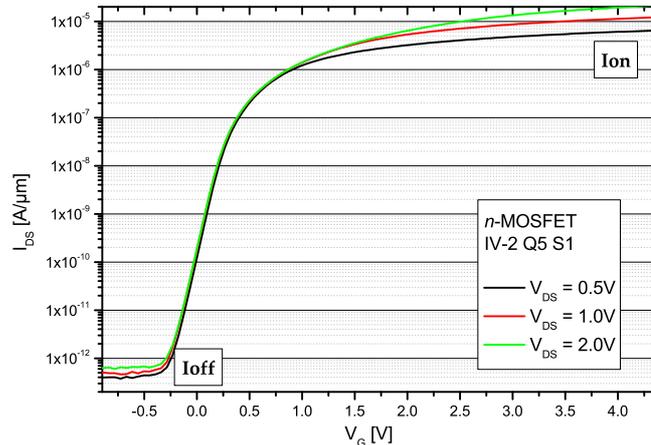


Abbildung 45: Beispiel-Kennlinie I_{on}/I_{off} Standard-MOSFETs

Abbildung 46 zeigt die Mittelwerte von $\log(I_{on}/I_{off})$ der gemessenen Scheiben. Hier ist seit Einführung des QMS eine kontinuierliche Steigerung von ca. vier auf annähernd sechs Dekaden zu sehen, also von 10^4 auf 10^6 . Durch die Betrachtung von I_{on}/I_{off} kann die Qualität der Prozessierung beurteilt werden. I_{on} ist immer gleich bei ca. $1\text{mA}/\mu\text{m}$, während I_{off} prozessabhängig ist. Bei einem niedrigen Verhältnis von I_{on}/I_{off} kann darauf geschlossen werden, dass während der Prozessierung unerwartete bzw. unerkannte Probleme und Fehler aufgetreten sind. Diese können durch Geräte, äußere Einflüsse wie Luftfeuchtigkeit oder auch durch fehlerhafte Bedienung entstanden sein.

In Abbildung 47 sind die Mittelwerte für V_{th} der gemessenen Scheiben aufgetragen. Die Einsatzspannung V_{th} ist ein guter Kontrollparameter für die Qualitätsüberwachung von MOSFETs, da viele Prozesswerte darin enthalten sind (siehe Anhang E). Die dunkle Linie stellt den gleitenden Mittelwert über 10 Perioden dar. Hier ist zu erkennen, dass sich V_{th} um den Zielwert 0V einpendelt, seit das QMS eingeführt wurde. Der Mittelwert von V_{th} hat sich von anfangs -0,16V auf 0,08V seit Beginn des QMS verbessert.

In Abbildung 48 wird die Standardabweichung (SAW) der gemessenen MOSFET-Einsatzspannung über alle runs dargestellt. Die dunkle Linie stellt wiederum den gleitenden Mittelwert über 10 Perioden dar. Hier ist zu sehen, dass sich die SAW von etwa 0,5 auf 0,3 verringert hat. Die SAW ist ein wichtiges Instrument, um die Schwankung von V_{th} über den einzelnen prozessierten Scheiben zu bestimmen und somit auf mögliche Fehler oder Probleme in der Prozessierung schließen zu können.

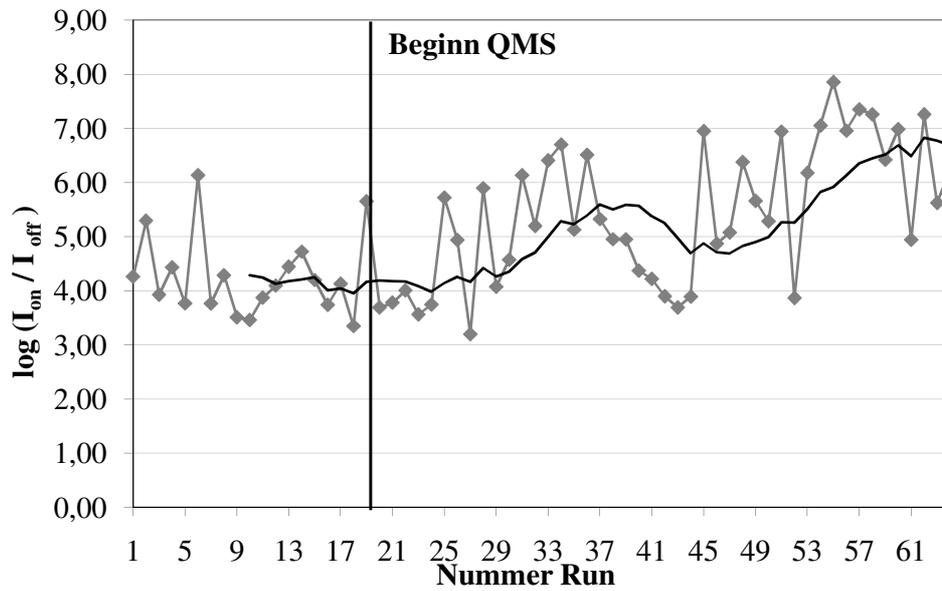


Abbildung 46: Mittelwerte über I_{on}/I_{off} von Standard-MOSFETs

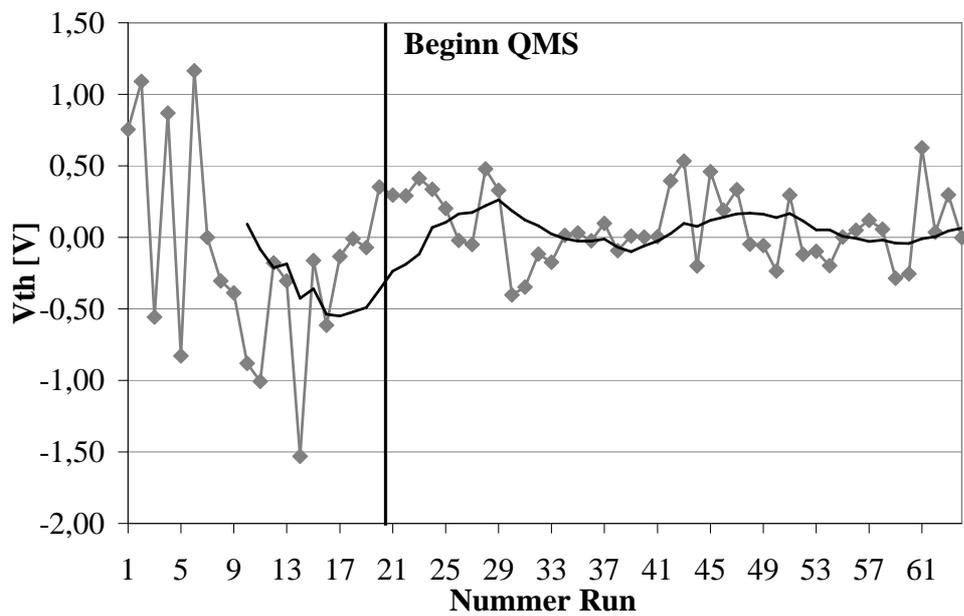


Abbildung 47: Mittelwerte über die Einsatzspannung V_{th} von Standard-MOSFETs

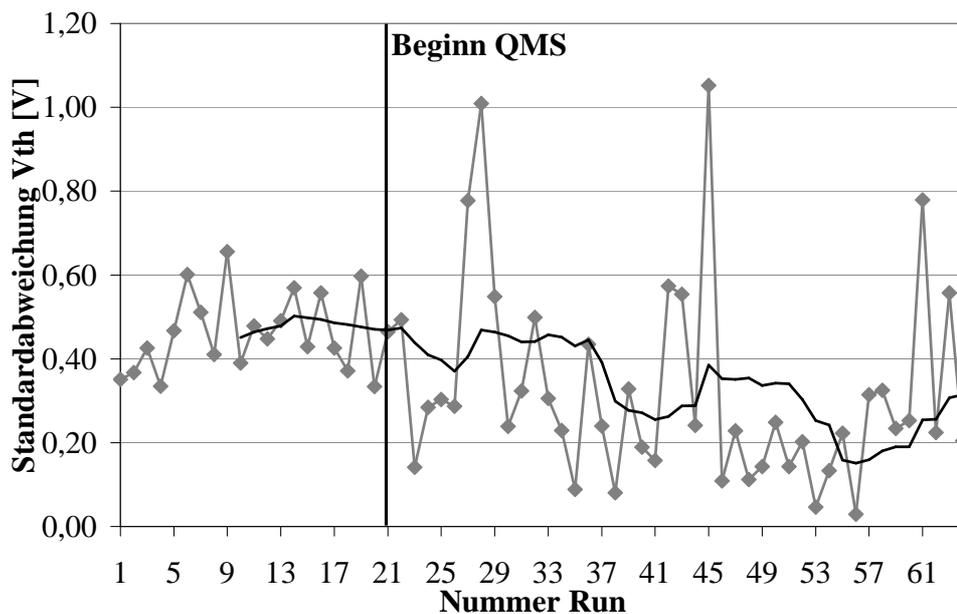


Abbildung 48: Standardabweichung der Einsatzspannung V_{th} von Standard-MOSFETs

Die Tabellen mit den exakten Daten zur Verbesserung der Ausbeute, der Dekaden und der Einsatzspannung sind in Anhang H dargestellt. In Abbildungen 44 bis 48 ist dargestellt, welche Verbesserungen der MOSFET-Prozess seit Einführung des QMS erfahren hat. Bei diesem Vergleich muss aber auch berücksichtigt werden, dass zu Anfang der MOSFET-Prozessierung die Erfahrung, welche Einstellungen eine Verbesserung hervorrufen, noch nicht im Detail vorhanden war. Die Konzentration lag anfangs hauptsächlich darauf, einen MOSFET-Prozess so einzustellen, dass funktionierende Bauelemente möglichst reproduzierbar hergestellt werden können. Mit der Einführung des QMS wurden die Prozesse detaillierter betrachtet und kritische Prozess-Schritte extrahiert, so dass bei der Prozessierung hier noch mehr Vorsicht herrscht. Dieser Schritt war allerdings nur möglich, da bereits funktionierende Prozesse und Kenntnisse über Geräte bestand, die mit Einführung des QMS verfeinert werden konnten.

Insgesamt ist durch die Einführung des QMS am HPT eine deutliche Verbesserung des Standardbauelements MOSFET zu erkennen. Die Kontroll-Parameter haben sich kontinuierlich in Richtung eines Optimums im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten verbessert. Zu dieser Verbesserung haben sowohl die Statistische Prozesskontrolle als auch alle anderen eingesetzten Methoden in Kombination beigetragen und damit einen Beweis geliefert, dass ein QMS an einem universitären HL-Labor mit Erfolg eingesetzt werden kann.

Verkürzung der Dauer von Studien- bzw. Bachelor- und Diplomarbeiten

Seit Einführung des QMS konnte eine Verkürzung der technologisch durchgeführten Studien- bzw. Bachelor- und Diplomarbeiten (SA/BA und DA) beobachtet werden (siehe Abbildungen 49 und 50). Die Dauer nähert sich kontinuierlich den Sollvorgabe von jeweils ca. 6 Monaten an.

Im Jahr 2000 wurde der Reinraum am Lehrstuhl für Technische Elektronik, der vom HPT mitbenutzt wird, umgebaut, Geräte eingefahren und erste Prozesse evaluiert.

Im Wintersemester 2000/2001 (WS 00/01) wurden mit den ersten DA (und auch Doktorarbeiten) am HPT begonnen. Diese und die folgenden Arbeiten waren verhältnismäßig kurze Arbeiten, die sich kaum im Rahmen der Sollzeit von ca. 6 Monaten bewegten. Als Begründung kann genannt werden, dass diese Arbeiten noch vom Professor selbst betreut wurden, der einen zügigen Abschluss forcierte, auch um seine Professur weiter ausbauen und Drittmittel- bzw. Fördergelder beantragen zu können. Andererseits waren diese Arbeiten immer auf einen kleinen Teil der Technologie, z.B. Einfahren und Parametereinstellung eines Gerätes oder Untersuchung des Gateoxids, beschränkt. Der zu untersuchende Teil wurde genau betrachtet, konnte aber noch nicht in einen Gesamtzusammenhang z.B. eines kompletten MOSFET-Prozesses eingeordnet werden, da dieser noch nicht existierte. Die begonnenen Doktorarbeiten beschäftigten sich mit dem Aufbau des HL-Labors, der Zusammenstellung von Prozessen und der Messtechnik. Diese Arbeiten legten sozusagen den Grundstein für die Entwicklung eines funktionierenden MOSFET-Prozesses und der messtechnischen Auswertung.

Ab ca. WS 03/04 bzw. SS04 waren die Grundprozesse untersucht und bereits einige Doktorarbeiten begonnen, die sich mit der Einführung eines Gesamtprozesses, zuerst MOS-Dioden und schließlich MOSFETs, befassten. Aus diesem Grund wurden die SA/BA und DA komplexer und umfangreicher. In den ca. 2 Jahren bis zur Einführung des QMS im WS 05/06 wurden Arbeiten angefertigt, die mit Unterstützung der Doktoranden dazu beitrugen, dass ein MOSFET-Prozess entstand, immer reproduzierbarer und standardisierbarer wurde. Diese Arbeiten entfernten sich sehr stark vom vorgegebenen Soll von 6 Monaten, was aber nicht nur an der Themenstellung lag. Es gab vereinzelt Studierende, die ihre Arbeiten wissentlich in die Länge zogen, wobei aber der Umfang der Arbeiten trotzdem gleich blieb.

Seit dem WS 05/06 (Start QMS) nähern sich die SA/BA und DA wieder kontinuierlich dem Sollwert von 6 Monaten an. Für die DA hat dies unter anderem den Grund, dass die meisten der Studierenden vorher eine SA/BA am HPT angefertigt hatten, so dass die Einarbeitungszeit wegfällt und trotzdem sehr komplexe Themen wie die Herstellung eines MOSFETs inklusive Untersuchung eines bestimmten Teilaspekts in angemessener Zeit bearbeitet werden können.

Ein weiterer Grund für die Verkürzung der Dauer für SA/BA und DA ist die Einführung des QMS und der Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5). Durch die regelmäßige Kontrolle der Geräte und Prozesse werden sehr gute Voraussetzungen für die Arbeit im HL-Labor geschaffen. Es werden mögliche Probleme rechtzeitig erkannt, vorbeugende Maßnahmen getroffen und Fehler in einem frühen Stadium behoben und dokumentiert. Dies verkürzt Einarbeitungszeiten für neue Mitarbeiter und Bearbeitungszeiten bei auftretenden Fehlerwiederholungen.

In Abbildungen 49 und 50 wird die Verkürzung der Arbeiten grafisch dargestellt. Die statistischen Daten werden in Anhang I tabellarisch aufgeführt.

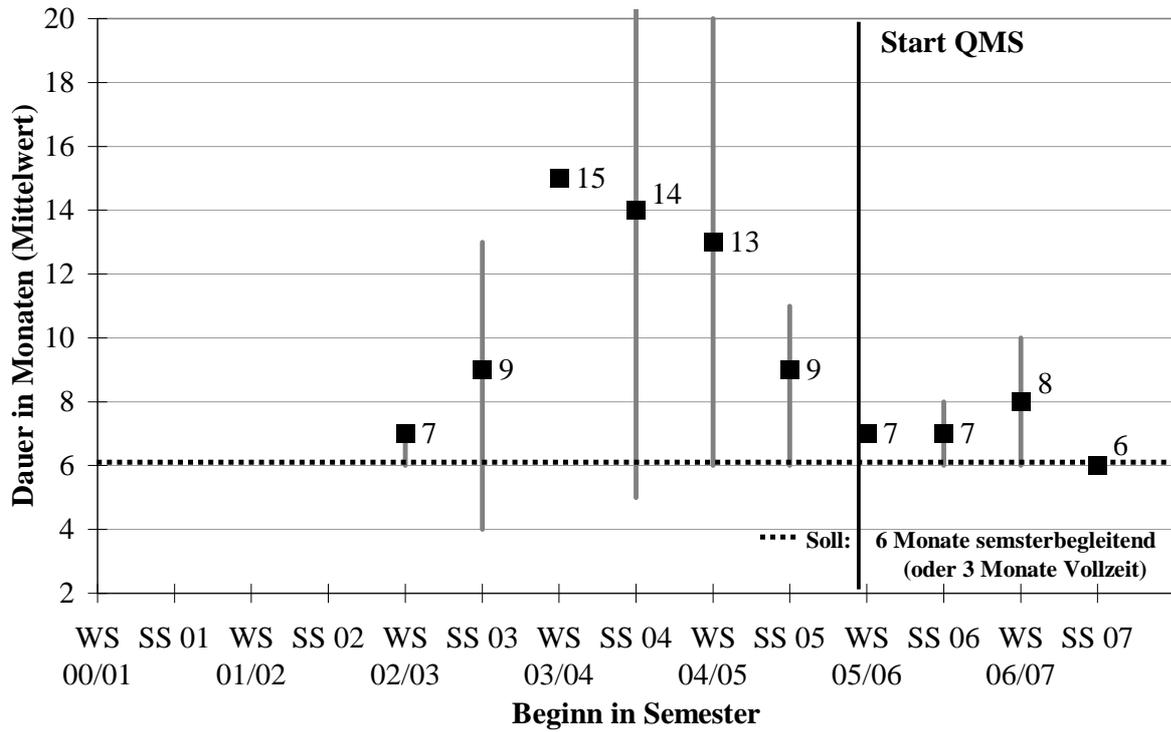


Abbildung 49: Zeitverkürzung der Studien- und Bachelorarbeiten

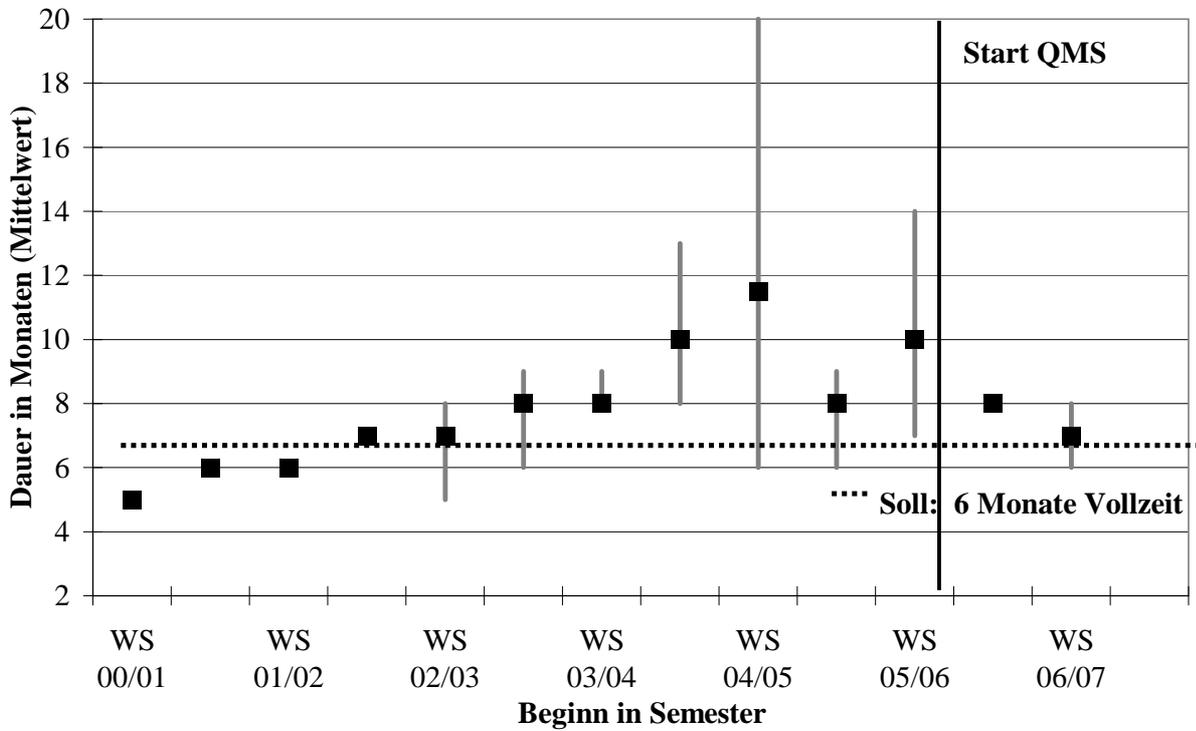


Abbildung 50: Zeitverkürzung der Diplomarbeiten

5 Dokumentation des Qualitätsmanagementsystems - Wissensmanagement

5.1 Grundlagen

In Kapitel 2.5 wurde die Notwendigkeit einer Dokumentation des QMS verdeutlicht. Wichtig ist, dass alle Teilaspekte des QMS in strukturierter Form dokumentiert sind und leicht gefunden werden können.

Die Dokumentation des QMS hat sich in den letzten Jahren sehr schnell von reiner Papierdokumentation hin zu umfangreichen elektronischen Systemen mit Datenbanken, Intranetanwendungen, Schnittstellen zu anderen Systemen etc. entwickelt. Der Begriff *Dokumentation* ist mittlerweile zu eng geworden und wurde zum Begriff *Wissensmanagement* erweitert.

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff Dokumentation das schriftliche Festhalten von Informationen zu Prozessen, Abläufen etc. angesehen. Der Begriff Wissensmanagement ist noch relativ jung und lässt einigen Raum zur individuellen Interpretation. Die Basis der Definitionen ist jedoch immer gleich. Wissensmanagement erweitert die benötigte Dokumentation, so dass Informationen in stimmigen Zusammenhang gebracht, individuell geordnet und abgerufen werden können. Der Unterschied zwischen Wissen und Information stellt in den Diskussionen um Wissensmanagement nach wie vor einen Streitpunkt dar. Für eine detaillierte Besprechung und Definitionsversuche sei z.B. auf [Wik07a], [Wik07b], [Rol03] [Rem05], [Mas07], [Pfe96], [Met06] sowie [Fra06] verwiesen.

Die Dokumentation des QMS ist neben der Statistischen Prozesskontrolle der wichtigste Bestandteil bei der Einführung eines QMS [Rod03], [Pas06]. In den folgenden Kapiteln wird die Umsetzung des Wissensmanagements WM am HPT detailliert beschrieben.

5.2 Umsetzung am HPT

5.2.1 Ausgangssituation

Vor Einführung des QMS am HPT wurden hauptsächlich Bedienungsanleitungen, studentische Arbeiten und Gerätestatus dokumentiert und in dem Computer-Netzwerk des Lehrstuhls verfügbaren elektronischen Ordner abgespeichert. Dieses System hatte den Vorteil, dass von jedem Arbeitsplatz (außer vom Reinraum) ein Zugriff auf diesen Netzwerkordner möglich war. Der Nachteil bestand darin, dass die Ordner relativ ungeordnet (Microsoft Explorer) bzw. ausschließlich nach Alphabet sortiert waren und jeder Schreibrechte hatte. Das heißt, dass Informationen zwar vorhanden waren, aber nicht sichergestellt war, dass sie auch korrekt sind und dass keine Sicherheit bestand, dass sie unbeabsichtigt gelöscht werden und so permanent verloren gehen können.

Für einen ersten Ansatz zum Aufbau des Reinraums war diese Lösung ausreichend. Nachdem sich das Technologie-Team im Laufe der Zeit vergrößert hat und auf mehr Vergangenheit

hinsichtlich Erfahrung, Ergebnissen und Wissen zurück blicken konnte, wurde festgestellt, dass zur systematischen Aufbewahrung und Wiedergewinnung von Informationen eine bessere Dokumentation wichtig ist. Allerdings wurde bis zur Einführung des QMS kein Ansatz zur Verbesserung weiter verfolgt.

Mit der Einführung eines QMS wurde die Wichtigkeit und Dringlichkeit der Einführung eines umfassenden Dokumentationssystems noch einmal deutlich. Gleichzeitig stellte sich heraus, dass die bereits vorhandene Dokumentation zwar wichtig ist und benötigt wird, aber andere Aspekte für effizientes wissenschaftliches Arbeiten ebenso wichtig sind. Auch die mangelnde Kontrolle über Änderungen an Dokumenten, u.a. Verfahrensweisungen, wurde kritisiert und sollte durch das neue System gelöst werden. Schließlich sollte eine Struktur geschaffen werden, in der nicht mehr die Doktoranden als zentraler Knotenpunkt für die Speicherung und Weitergabe von Wissen sind (siehe Kapitel 3.2), sondern die neue Wissensbasis WB als zentrales Informations- bzw. Wissensmanagementsystem, was in Abbildung 51 verdeutlicht wird.

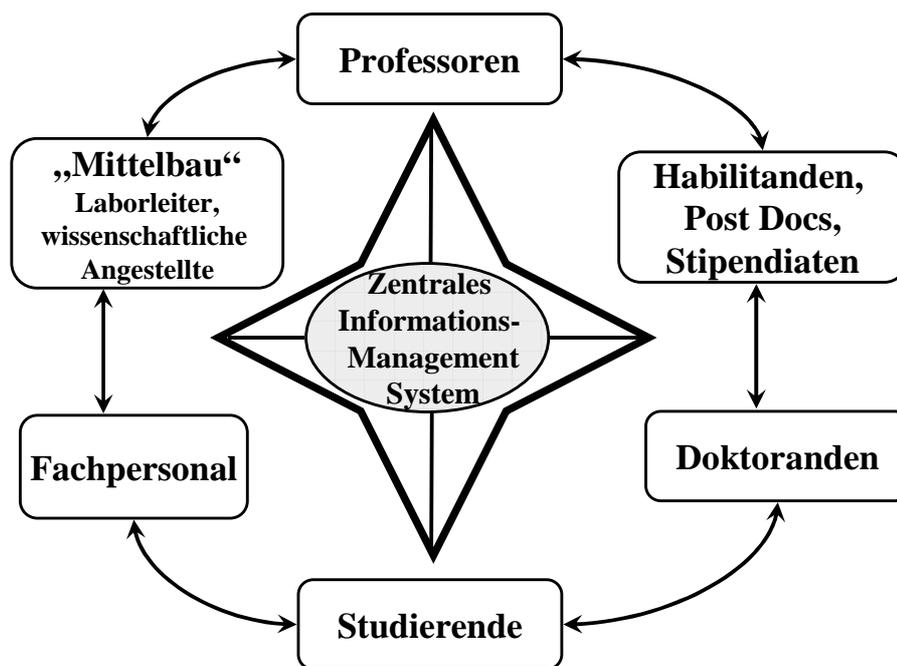


Abbildung 51: Wissensmanagement als Zentrales Informationssystem

5.2.2 Software

Ursprünglich wurde die gesamte Dokumentation eines QMS in Papierform, einem so genannten QM-Handbuch QMH, festgehalten. Seit Einführung von PCs wurde der Begriff QMH auch auf elektronische Dokumentationen ausgedehnt, so dass ein QMH durchaus auch eine Intranetanwendung sein kann, bei der keine Papierdokumente mehr benutzt werden [Her99],[Lin05].

Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung eines elektronischen QM-Handbuchs an. Es gibt sehr umfangreiche käuflich erwerbbar Softwarepakete und kostenlose (meist Open Source) Software. Auch besteht die Möglichkeit, Software in Eigenregie zu erstellen.

Die Auswahl von geeigneter Software hängt davon ab,

- wie komplex die Dokumentation sein soll.
- wie umfangreich ein System sein soll, d.h. reicht Dokumentenverwaltung aus oder werden zusätzliche Eigenschaften benötigt.
- wie viel Geld zur Umsetzung zur Verfügung steht.
- wie flexibel das System sein soll.

Grundsätzlich ist vor der Auswahl einer Software unbedingt erforderlich, dass eine detaillierte Bestandsaufnahme durchgeführt wird, d.h. bereits vorhandene Dokumente etc. gesichtet werden. Zusätzlich muss eine Forderungsliste erstellt werden, am besten in Zusammenarbeit mit den späteren Nutzern des Systems.

Diese Liste sollte folgende Forderungen beinhalten:

- Auf welcher Basis (Betriebssystem, Hardware) soll und kann gearbeitet werden.
- Welche Dokumente werden benötigt.
- In welcher Form sollen Dokumente gespeichert und zur Verfügung gestellt werden.
- Welche Funktionen werden von dem System erwartet: Nutzerrechte, Suchfunktion, Optik, Struktur etc.
- Wer ist für das System verantwortlich.

Softwareauswahl für den HPT

Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei den zahlreichen Informationen, die bei der Erforschung neuer Bauelemente auftreten, eine Papierdokumentation schnell unübersichtlich wird, da viele Änderungen anfallen, die „per Hand“ in das Papierdokument eingepflegt werden. Je mehr Änderungen nötig sind, desto pflegeintensiver und unübersichtlicher wird das Dokument, was meist dazu führt, dass die weitere Pflege der Dokumentation nicht weiter verfolgt wird und damit veraltete Versionen im Umlauf sind. Aus diesem Grund wurde für die Umsetzung am HPT ein elektronisches System favorisiert.

Die Grundvoraussetzungen, welche die Software erfüllen sollte, wurden in individuellen Gesprächen als Übersicht festgehalten. Danach wurde in einer Technologierunde detailliert besprochen, welche Wünsche und Anforderungen die künftigen Nutzer haben.

Hierbei wurden vier Hauptkriterien bestimmt:

1. Die Software sollte in Bezug auf gebotene Funktionen nicht überdimensioniert sein. Es wird kein Universaltool benötigt, das die Gesamtfunktionen eines QMS inkl. z.B. SPC abdeckt, da zu viel Administrationsaufwand benötigt würde.
2. Die Software sollte individuell konfigurierbar und programmierbar sein, so dass auf Eigenheiten der universitären Umgebung Rücksicht genommen werden kann. Dies sollte dabei von einem Mitarbeiter bzw. Doktoranden am HPT durchgeführt werden können, d.h. die Software sollte frei verfügbaren Quellcode haben (Open Source).
3. Der Aufwand und die Kosten für Administration des Servers, der Software und der Datenbank sollte möglichst gering sein, so dass diese Aufgabe auch von einem Doktoranden übernommen werden kann.
4. Die Anschaffungskosten für die Software sollten möglichst gering sein.

Nach Klärung dieser Basisvoraussetzungen wurden unterschiedliche Software-Systeme evaluiert. Ein Großteil davon war bei weitem überdimensioniert oder bot nicht die Möglichkeit der individuellen Konfigurierbarkeit. Einige Softwareprodukte, die aus dem universitären Umfeld stammen und sehr günstig oder kostenlos waren, würden großen Programmieraufwand benötigen, um ein geeignetes User-Interface, also eine einfach zu bedienende Arbeitsumgebung zur Verfügung zu stellen.

Auf Grund dessen wurde die Entscheidung getroffen, eine kostenlose Open Source Software zu suchen. Der Vorteil hierbei ist, dass der Quellcode völlig frei zugänglich und damit auch konfigurierbar und veränderbar ist.

In einer Technologierunde wurde schließlich besprochen, welche Ansprüche das System unbedingt erfüllen muss. Auch Wünsche der künftigen Nutzer wurden angehört und bei der Entscheidung für die Software berücksichtigt.

Folgende Ansprüche und Wünsche wurden an die technische Seite gestellt:

- Suchfunktion über Inhalte von Dokumenten aller Art.
- Verfügbarkeit am gesamten HPT, also auch innerhalb des Reinraums.
- User-Rechte müssen einfach gesetzt und verwaltet werden können.
- Kein Aufwand für Administration (außer vom Administrator).
- Einfache Bedienung.
- Inhalt klar strukturierbar.
- Ansprechendes User-Interface.

Folgende Ansprüche und Wünsche wurden an die inhaltliche Seite gestellt:

- Flexible Ordnerstruktur.
- Belegungs- und Buchungsplan für Geräte.
- Arbeitsumgebung für nicht-fertige Dokumente.
- Bereich für Studierende.
- Umfangreiche Informationen zur Benutzung von Geräten, Chemikalien (z.B. Datenblätter) etc.
- Dokumentation von Arbeitsanweisungen und Standardprozessen.
- Überblick über Forschungstätigkeiten und Ergebnisse.

Die Entscheidung fiel für die Open Source Software *OSS plone* [plo07], die zusammen mit der *OSS zope* [zop07] auf einer Linux-gentoo-Umgebung aufgesetzt wurde. Dieses Softwarepaket erfüllt alle vier gegebenen Hauptkriterien, da auch die benötigte Hardware bereits am Lehrstuhl vorhanden war und genutzt werden konnte. Eine Abschätzung des Administrator-Aufwands ergab, dass dieser im Rahmen der Vorstellungen liegt. Auch besteht die Möglichkeit, diese Software als Intranet zu implementieren, was die Verfügbarkeitsfrage klärt. Die individuelle Konfigurierbarkeit der Software ergibt sich daraus, dass es sich um eine OSS handelt.

Technische Details zur Installation und Grundkonfiguration sowie eine detaillierte Beschreibung der Software und deren Implementierung sind in den Anleitungen zu *plone* und *zope* im Internet auf den entsprechenden homepages, in [Frie06], [Thi04] und im implementierten Wissensmanagementsystem (Wissensdatenbank WB) des HPT zu finden.

Im Folgenden wird die Implementierung der Software beschrieben, aber auf detaillierte Problembeschreibungen sowie programmiertechnische Details verzichtet. Diese Beschreibungen tragen nicht zum Verständnis des Konzepts bei, sondern sollten nur bei einer Neuinstallation oder Kopie des Systems behilflich sein. Genauere Informationen dazu sind in [Frie06] und der WB des HPT zu finden.

5.2.3 Implementierung, Struktur und Aufbau der WB

Implementierung

Das *plone*-System (Wissensbasis WB) wird als Intranet mit User-Interface verwendet. Das heißt, dass das Kriterium *Verfügbarkeit überall am HPT* erfüllt werden kann. Für einen Zugang zur WB ist lediglich ein PC mit Netzwerkzugang nötig, was am HPT für alle Rechner inkl. der Rechner im Reinraum, gilt. Dieses Kriterium ist also durch die Installation des Softwarepakets auf dem Server des Lehrstuhls bereits gelöst.

Nachdem alle benötigten Komponenten nach Anweisung installiert wurden, konnte das so genannte *Zope-Management-Interface ZMI* benutzt und erste Konfigurationen vorgenommen werden. Im ZMI werden u.a. die Administrator-Accounts generiert und das User-Interface erstellt und konfiguriert. Es können z.B. Logos hinzugefügt werden, Default-Einstellungen wie die Anzeige eines Kalenders unterdrückt werden [Frie06].

Das *plone*-Interface ist das Interface, also die Arbeitsumgebung, mit dem die Endnutzer arbeiten. Hier können Nutzer hinzugefügt und gelöscht werden, Gruppen erstellt und Nutzerrechte vergeben werden. Die Vergabe der Nutzerrechte kann für gesamte Ordner, mit oder ohne deren Inhalt, sowie für einzelne Dokumente, Bilder oder Dateien erfolgen.

Nach der Installation und initialen Implementierung wurden individuelle Konfigurationen und Strukturarbeiten vorgenommen. Hierzu muss eine Berechtigung als Administrator vorliegen und Grundkenntnisse bzw. Verständnis des ZMI vorhanden sein. Eine detaillierte Beschreibung, wie die einzelnen Komponenten verändert werden können, findet sich in [Frie06] und [plo05].

Struktur der WB

Die WB wird über ein User-Interface bedient und wurde den Bedürfnissen der Mitarbeiter des HPT angepasst. Abbildung 52 zeigt einen Screenshot der aktuellen Startseite. Die einzelnen Bereiche der WB werden hervorgehoben, in Tabelle 19 dargestellt und im Folgenden detaillierter erklärt.

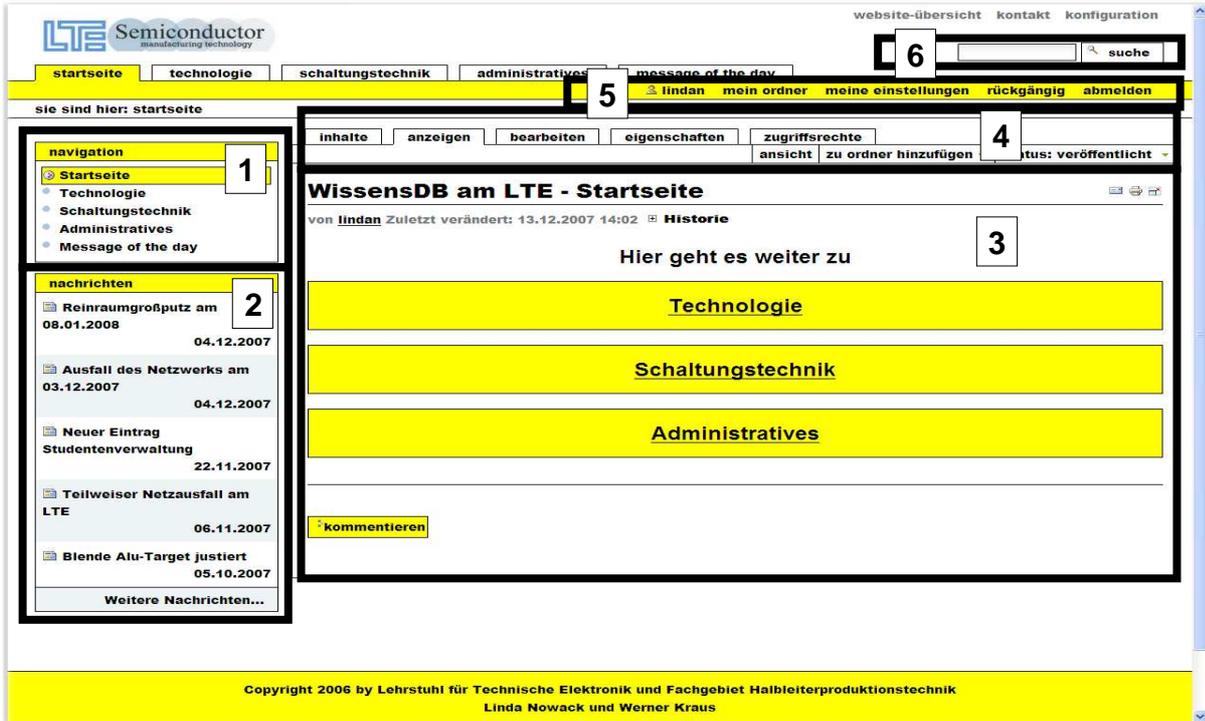


Abbildung 52: Screenshot des aktuellen *plone* User-Interface

Nummer	Beschreibung
1	Navigationsfenster
2	Nachrichten
3	Vorschaubereich
4	Bearbeitungsbereich
5	Persönlicher Bereich
6	Suchfunktion

Tabelle 19: Überblick über die einzelnen Bereiche des *plone*-Interface in Abbildung 52

Die Struktur der WB lehnt sich stark an die von den meisten Benutzern gewöhnten Struktur des Windows-Explorer an. Das heißt, dass eine hierarchische Struktur mit Ordnern und Unterordnern, die mit Dateien wie Dokumenten, Bildern etc. gefüllt werden, vorgegeben ist. Der Unterschied zum Explorer besteht darin, dass zusätzliche Dateien wie html-Seiten oder Web-links zur Verfügung stehen und dass eine Vorschau für die meisten Dateitypen vorhanden ist.

Die Ordnerstruktur wird im Navigationsfenster angezeigt (Abbildung 52 Nr. 1). Die Vorschau wird im Bereich rechts neben dem Navigationsfenster sofort bei Anklicken der Datei angezeigt. Die Vorschau der Startseite, einer html-Seite, wird in Abbildung 52 Nr. 3 gezeigt.

Direkt unter dem Navigationsfenster ist ein Bereich zu sehen, in dem Nachrichten angezeigt werden (Abbildung 52 Nr. 2). Dieser Bereich ist für aktuelle Nachrichten vorgesehen, die nach einem bestimmten Ablaufdatum gelöscht bzw. nicht mehr angezeigt werden und für alle Nutzer relevant sind.

Oberhalb des Vorschaubereichs wird bei entsprechender Berechtigung des Benutzers eine Leiste angezeigt, die es ermöglicht, am aktuellen Dokument (Datei, Ordner etc.) Zugriffsrechte zu vergeben, Eigenschaften zu setzen, sowie zusätzliche Dateien etc. hinzuzufügen, die Ansicht zu ändern und den Status des Dokumentes zu ändern. Dies ist in Abbildung 52 mit Nummer 4 markiert.

Jeder Nutzer hat zudem einen eigenen Bereich, der ausschließlich dem jeweiligen Nutzer zur Verfügung steht. Dieser Bereich nennt sich *Mein Ordner*. Außerdem können Nutzer unter *Meine Einstellungen* einige Einstellungen wie Passwort, email-Adresse und Präferenzen wie die Entscheidung, welcher Texteditor benutzt werden soll, etc. ändern (Abbildung 52 Nr. 5).

Bei der Besprechung, welche Anforderungen die künftigen Nutzer an die WB stellen, war die Forderung nach einer umfangreichen Suchfunktion an erster Stelle. Die Suchfunktion der WB (Abbildung 52 Nr. 6) bietet eine indizierte Suche, d.h. dass jegliche Datei (also z.B. .doc, .pdf, .xls-Dokumente, Bilder etc.) und deren Inhalt beim Hochladen in die WB sofort indiziert wird und mittels der Suchfunktion auffindbar ist.

Aufbau der WB

Die technischen Wünsche der Nutzer an die WB konnten alle mit der Entscheidung für die Software *plone* erfüllt werden. Als nächstes sollten die zusätzlichen Wünsche der Nutzer nach und nach Berücksichtigung finden.

Die gewünschte flexible Ordnerstruktur und Übersichtlichkeit wird dadurch erfüllt, dass sich die Struktur an den Windows-Explorer anlehnt und deshalb kein „Umlernen“ für die Nutzer erfolgen muss, da sie mit dieser Struktur bereits vertraut sind.

Der Bereich *Mein Ordner* liefert die gewünschte Arbeitsumgebung für Dokumente, die noch nicht freigegeben werden sollen, noch in Arbeit sind oder Aufzeichnungen enthalten, die allein für den jeweiligen Nutzer interessant sind.

Für Studierende wurde ein extra Bereich angelegt (*Studentendokus*), in dem sie Dokumente etc. zur Verfügung stellen können, die von den zuständigen Betreuern auf Richtigkeit geprüft werden und an den passenden Platz in der WB gestellt werden. Dieser Bereich wurde gewünscht, da Studierende weniger Erfahrung haben und mit dieser Art von Review-Prozess verhindert werden kann, dass falsche oder nur teilweise korrekte Informationen in der WB abgelegt werden.

Der Wunsch nach einem Belegungs- und Buchungssystem für Geräte konnte erfüllt werden, indem ein so genanntes add-on Produkt gefunden und installiert wurde, welches genau diese

Funktionen aufweist. Add-on Produkte sind fertige Software-Bausteine, die zu einem Produkt hinzugefügt werden können und in der Regel bereits auf Konsistenz und Funktionalität sowie korrektes Arbeiten getestet wurden. Abbildung 53 zeigt das implementierte Buchungssystem am HPT.

2007, week 46									
<< Previous 4 weeks		< Previous week		Next week >				>> Next 4 weeks	
	monday november 12	tuesday november 13	wednesday november 14	thursday november 15	friday november 16	saturday november 17	sunday november 18		
08:00	+	±	+	+	+	+	+		
09:00	Agilent E5270B : Booked by maul - Vakuummessplatz und PC +	+	+	+	+	+	+		
10:00	Agilent E5270B : Booked by maul - Vakuummessplatz und PC +	+	ATV-Ofen : Booked by remling - trocken +	ATV-Ofen : Booked by student - Nassoxydation 70min +	+	+	+		
11:00	Agilent E5270B : Booked by maul - Vakuummessplatz und PC +	ATV- Ofen : Booked by merkle - Booking +	ATV-Ofen : Booked by remling - trocken +	ATV-Ofen : Booked by student - Nassoxydation 70min +	+	+	+		
12:00	Agilent E5270B : Booked by maul - Vakuummessplatz und PC +	ATV- Ofen : Booked by merkle - Booking +	ATV-Ofen : Booked by remling - trocken +	ATV-Ofen : Booked by student - Nassoxydation 70min +	+	+	+		
13:00	Agilent E5270B : Booked by maul -	ATV- Ofen :	ATV-Ofen : Booked by	ATV-Ofen : Booked by	+	+	+		

Abbildung 53: Buchungssystem für Geräte

Eine weitere Anforderung bestand in der Strukturierung des Inhalts nach Dokumenten wie Benutzungsinformationen, Arbeits- und Prozessanweisungen sowie darin, einen Überblick über Forschungsergebnisse und Qualitätskontrolle zu ermöglichen. Auch administrative und sonstige Angelegenheiten sollten extra Berücksichtigung finden.

Zur Erfüllung dieser Vorgaben wurde folgende Ordnerstruktur für die Gesamtgliederung geschaffen, die sich in folgende Hauptordner untergliedert:

- Technologie
- Schaltungstechnik
- Administratives

Eine detaillierte Untergliederung des Ordners *Technologie* zeigt Abbildung 54 (screenshot) und Abbildung 55.

Dokumente und Anleitungen für einzelne Geräte befinden sich direkt in einem dem jeweiligen Gerät zugeordneten Ordner. Verfahrensanweisungen befinden sich in den Ordnern (und zugehörigen Unterordnern) *Prozesse*, *Qualität* und *Reinraum Grundlagen*.

Durch die indiziert Suche benötigt man keine Querverweise von Ordnern auf andere Ordner,

sie sind hier: startseite → technologie → reinraum und technologie

inhalte anzeigen bearbeiten eigenschaften zugriffsrechte
aktionen ansicht neuen artikel hinzufügen status: veröffentlicht

Reinraum und Technologie

^ Eine Ebene höher

- **Wiederkehrende Termine/Ereignisse** — von lindan — Zuletzt verändert: 04.04.2006 10:00
Dieser Ordner enthält die Folien und Tabellen zu Technologierunde, -rundgang, Reinraumputz und Waferumlauf
- **Reinraum Grundlagen** — von admin — Zuletzt verändert: 10.04.2006 13:45
Der REINRAUM darf NICHT OHNE EINWEISUNG BETRETEN werden! Hier finden sich auch die für bestimmte Bereiche zuständigen Personen.
- **Geräte** — von admin — Zuletzt verändert: 04.04.2006 10:04
Hier finden sich die Bedienungsanleitungen für alle Geräte inkl. der Messgeräte, sowie Kurzanleitungen und How To's
- **Prozesse** — von admin — Zuletzt verändert: 04.04.2006 10:00
Hier findet sich eine Übersicht über alle (Einzel-)Prozesse, sowie die Laufzettel für Einzel- und Gesamtprozesse.
- **Qualität** — von admin — Zuletzt verändert: 04.04.2006 10:00
Hier finden sich die Arbeits-/Verfahrensanweisungen, Beschreibungen sowie die Qualitätsregelkarten für den Reinraum, die Messgeräte etc.
- **Literatur - Technologie** — von admin — Zuletzt verändert: 29.01.2007 11:26
Hier findet sich die Standardliteratur sowie alle Studien-, Bachelor-, Diplom-, Master- und Doktorarbeiten (teils) als .pdf zum Download. Ebenso werden hier alle Laufzettel abgelegt.
- **(Kurz-)Informationen** — von lindan — Zuletzt verändert: 15.11.2007 16:13
Hier befinden sich Kurzinformationen über Probleme, deren Beseitigung, Hinweise

Abbildung 54: Überblick über Aufbau der WB

obwohl dies möglich wäre. Suchanfragen liefern sehr zuverlässig und schnell die gewünschten Ergebnisse.

Die Darstellung von Forschungsergebnissen, Qualitätskontrollen etc. als interaktive Bilder stellte sich als komplizierter als gedacht heraus und stellt hohe Anforderungen. Derzeit werden die Qualitätskontrolldaten und die Messdaten der Partikelanzahl noch in ein excel-sheet eingetragen, das direkt auf dem Server bearbeitet und gespeichert werden kann und nicht auf den lokalen PC heruntergeladen, editiert und dann wieder hochgeladen werden muss. Auch MOSFET-Ergebnisse existieren noch als excel-sheet ohne Grafik.

Mittlerweile wird an einer Lösung gearbeitet, mit der Partikelanzahl, QRK und MOSFET-Ergebnisse als interaktives Bild in die WB eingebunden werden. Außerdem wird daran gearbeitet, dass Werte direkt in die WB eingegeben werden können, dann verarbeitet werden und das interaktive Bild daraus generiert wird. Dieses Projekt wird erst nach Fertigstellung dieser Arbeit abgeschlossen sein, weshalb hier auch keine Beschreibung erfolgt.

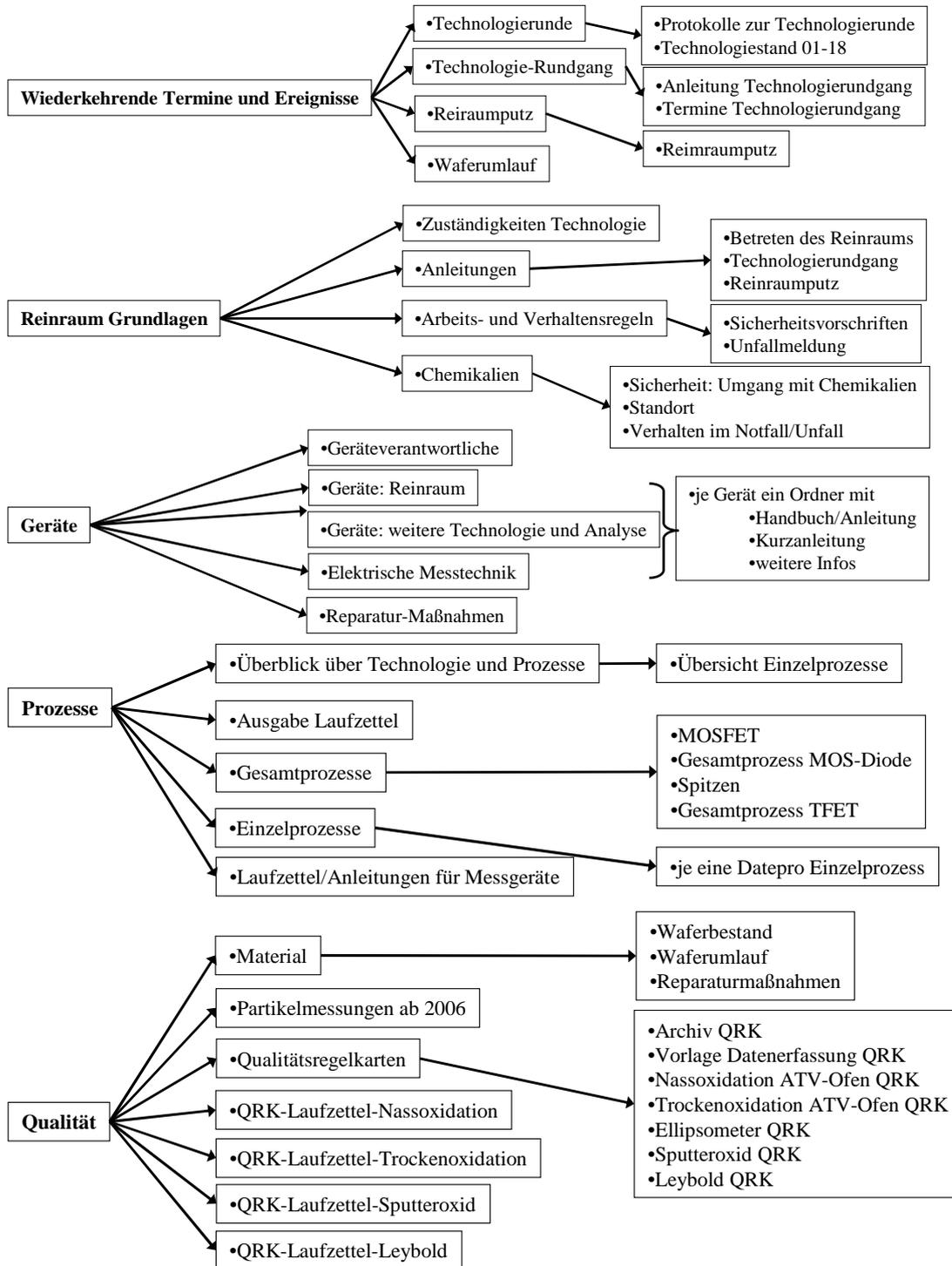


Abbildung 55: Detaillierter Überblick über Aufbau des Ordners *Technologie* der WB

5.3 Fazit

Aufgrund der hohen Mitarbeiterfluktuation ist für das QMS am HPT die Dokumentation der Prozesse, Arbeitsverfahren, Qualität etc. extrem wichtig. Doktoranden verlassen den HPT nach ca. drei bis sechs Jahren, Studierende nach etwa drei bis acht Monaten.

Zur Dokumentation des QMS wird eine Software zur Kombination von Dokumentenverwaltung und Wissensmanagement angewendet. Es wurde zuerst die bereits vorhandene Dokumentation von den Experten am HPT überarbeitet, sortiert und aufbereitet. Anschließend setzt das Wissensmanagement an, indem das elektronische System *plone* zur Verfügung gestellt wurde, das die Anforderungen der Nutzer erfüllt und zusätzliche Möglichkeiten (über die reine Dokumentation hinaus) bietet. Unter anderem wurde ein Belegungsplan für Geräte eingeführt. Einen Überblick über alle installierten und implementierten Zusatzprodukte (add-ons) zeigt Anhang J.

Die Einführung der WB beinhaltet zwei zeitliche Aspekte, die am besten getrennt betrachtet werden. Zum einen die Zeit, die bis zur Implementierung benötigt wird. Zum anderen die Zeit, die benötigt wird, bis das System offiziell in Betrieb genommen wird, also implementiert ist.

Für die Entscheidung, welche Struktur, welches Aussehen und welche Software verwendet wird, werden etwa sechs Monate benötigt. In dieser Zeit ist vor allem strukturelle Arbeit zu leisten. Das Projekt muss detailliert geplant werden, so dass bei der Umsetzung, d.h. Installation und folgenden Implementierung möglichst wenig Nacharbeit nötig ist. Es stellte sich heraus, dass die meiste Zeit benötigt wurde, um Grundinformationen zu sammeln, was für die WB inhaltlich benötigt wird und welche Stichworte diesen Inhalten zuzuordnen sind.

Die Installation des Systems erfordert in etwa drei Wochen. Die meiste Zeit wird hauptsächlich für die Bereitstellung der Hardware- und Software-Ressourcen (Server, Betriebssystem etc.) benötigt. Ein weiterer Faktor, der einige Zeit in Anspruch nimmt, ist die Installation der Komponenten in richtiger Reihenfolge und in der richtigen Version, was in den Installationsanleitungen nachgelesen werden muss.

Die Implementierung des Systems, welche nach der Installation erfolgt, benötigt noch einmal etwa sechs Monate, wobei diese am HPT von zwei Personen geleistet wurde. Eine Person beschäftigte sich hauptsächlich mit der administrativen Seite wie Updates und Kompatibilität. Die andere Person war für das Aussehen, die Struktur und den Inhalt des Systems zuständig. Diese Aufteilung hat sich als sehr sinnvoll erwiesen, da so eine klare Thementrennung stattfinden konnte, was Zeit bei der Umsetzung der WB sparte.

Bei der Einführung der WB stellte sich heraus, dass sehr viel Überzeugungsarbeit im Anwender-Team geleistet werden musste, da das Füllen mit relevantem und korrektem Inhalt Zeit in Anspruch nimmt. Einige der Mitarbeiter waren nicht bereit, diesen Aufwand in Kauf zu nehmen oder waren der Meinung, dass eine WB nicht zu ihrer Arbeit gehört bzw. beiträgt.

Diese Einstellung wurde durch einige „Vorreiter“ relativ schnell - innerhalb eines Jahres nach der Einführung - geändert. Ein Grund hierfür ist sicherlich auch, dass vom Professor der ausdrückliche Wunsch geäußert wurde, dass die WB benutzt und gefüllt werden soll. Das überzeugendste Argument war allerdings, dass nach und nach immer mehr Informationen abrufbar waren und neue Informationen zuerst in der WB gespeichert wurden und erst danach in der Technologierunde auf neue Einträge aufmerksam gemacht wurde.

Vor allem die Studierenden zeigen große Begeisterung für das System und nutzen es intensiv, sowohl als Nachschlagewerk als auch dazu, Informationen zu Prozessen oder neuen Erkenntnissen weiterzugeben. Durch die mittlerweile sehr umfangreiche Dokumentation, die auch Einführungsdokumente für Neuanwender enthält, kann die Einarbeitungszeit neuer Mitarbeiter verkürzt werden, was vor allem für Studierende sehr nützlich ist [Now07a], [Now07b], [Now07c].

Die Bedienung von sehr teuren Prozessgeräten (bis zu einer Million Euro) ist komplex und fehleranfällig. Durch die Verfügbarkeit von Anleitungen direkt am Gerät im Labor werden Bedienfehler verringert, da die Möglichkeit besteht, direkt in der Anleitung nachzuschlagen ohne das Gerät zu verlassen. Die Verringerung der Bedienfehler lässt sich an der Erhöhung der Verfügbarkeit der Geräte ablesen, was in Abbildung 43 auf Seite 92 dargestellt ist.

Zusätzlich wird die Fehlerhäufigkeit bei der Prozessierung verringert, da Standardprozesse in Form von Laufzetteln direkt nachgeschlagen werden können und zusätzliche Informationen verfügbar sind, durch die auftretende Fragen und Probleme schnell und zuverlässig beantwortet werden.

6 Resumé Qualitätsmanagement am HPT

Qualitätsmanagement hat eine sehr lange Tradition und reicht bis zum Altertum zurück. Kapitel 2.2 gibt einen kurzen Überblick über die historische Entwicklung des Qualitätsmanagements. Die Einführung eines QMS an einem universitären Labor kann sich auf etablierte Methoden stützen, die aus den Normen oder aus dem PDCA-Kreis entnommen sind und in Kapitel 2.3 und 2.4 beschrieben werden. Diese Methoden müssen genau evaluiert werden und an die Organisationsstruktur eines Lehrstuhls oder Fachgebiets angepasst werden.

In Kapiteln 3.1 und 3.2 werden die technischen und organisatorischen Grundvoraussetzungen zur Umsetzung eines QMS am HPT dargestellt.

Da im universitären Bereich nicht bzw. sehr selten für Kunden im klassischen Sinne gearbeitet wird, sollte die Verwendung von stark auf Kunden bezogenen Methoden genau überlegt werden und eine Abwägung zwischen Nutzen und Aufwand stattfinden. In Kapitel 3.3 wird eine Vorauswahl an Methoden getroffen, die am HPT umgesetzt wurden.

Für die Entscheidung zur Anwendung anderer Methoden (aus dem PDCA-Kreis) ist es ratsam, zuerst eine Prioritätenliste aufzustellen, in der die Ziele, die mit einem QMS erreicht werden sollen, festgehalten werden. Danach können geeignete Methoden ausgewählt und die Reihenfolge der Umsetzung festgelegt werden. Außerdem sollte bei der Einführung der ausgewählten Methoden ein schrittweises Vorgehen favorisiert werden.

In Kapitel 4 werden die am HPT umgesetzten Methoden zur Einführung eines QMS vorgestellt und die Umsetzung erläutert. Für die technische Umsetzung am HPT wurde zuerst ein Standard- bzw. Referenzprozess für das am häufigsten prozessierte bzw. wichtigste Bauelement entwickelt. Zur Umsetzung der unterschiedlichen Methoden, z.B. der Statistischen Prozesskontrolle, sollte bei dem wichtigsten Gerät des Prozesses begonnen werden. Nach der Erprobung und Etablierung kann mit den gewonnenen Erfahrungen die Methode dann auf eine größere Anzahl an Geräten erweitert werden, wobei immer darauf geachtet werden sollte, dass standardisierte Prozesse zur Kontrolle verwendet werden.

Am HPT konnten mit der Umsetzung von technischen Methoden, also MFU/PFU (siehe Kapitel 4.3), SPC (siehe Kapitel 4.4) und DoE (siehe Kapitel 4.5), Verbesserungen wie die Verringerung der Reinraumklasse durch Partikelmessungen, Verbesserung des MOSFET-Standardprozesses hinsichtlich Ausbeute an Bauelementen, Einstellung der elektrischen Parameter und deren Fluktuation und Verbesserung der Dekaden sowie eine Verkürzung von Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten erreicht werden (siehe Kapitel 4.10).

Bei der Einführung „nicht-technischer“ Methoden, also Fehlermanagement, Vorschlagwesen, Qualitätszirkel etc. sollte darauf geachtet werden, dass die betroffenen Mitarbeiter von Anfang an in die Entscheidung zur Einführung des QMS eingebunden werden und ihre Meinung dazu äußern dürfen (siehe Kapitel 4.6 bis 4.9).

Am HPT hat sich vor allem die wöchentliche Technologierunde (Qualitätszirkel), bei der sich alle Mitarbeiter treffen, die in der Technologie arbeiten, bewährt. Auch hat sich ein

sehr effizientes Fehlermanagement und eine Verbesserung der Kommunikation zwischen den Mitarbeitern etabliert.

Zusätzlich zu den technischen und nicht-technischen Methoden muss eine Möglichkeit geschaffen werden, Probleme, Lösungen und Lösungsansätze oder Gedanken und Ideen schriftlich zentral festzuhalten und zur Diskussion zu stellen sowie die gesamte Dokumentation des QMS dort zur Verfügung zu stellen. Dieser Aspekt wird in Kapitel 5 aufgegriffen und die Umsetzung am HPT erläutert.

Für den HPT wurde mit der Open Source Software *plone* ein Wissensmanagementsystem (Wissensbasis WB) eingeführt und etabliert, das sämtliche Informationen zur Technologie beinhaltet. Nach einigen initialen Schwierigkeiten konnte genügend Überzeugungsarbeit geleistet werden, dass die WB langsam aber kontinuierlich mit Inhalt gefüllt wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese WB neben der SPC und der Technologierunde die wichtigste Methode des QMS darstellt und sehr gut vom gesamten Team angenommen wird. Die Dokumentation der Prozesse und Leitfäden sowie die Kommunikation innerhalb des Teams wurde verbessert, so dass Verbesserungen sowohl im technologischen als auch im strukturellen Bereich erzielt werden konnten. Dazu zählen die Bereitschaft, sich umfassend mit Problemen und Lösungen zu beschäftigen und dieses Wissen mit anderen zu teilen und schriftlich in einem bereitgestellten System festzuhalten.

Zur Einführung eines QMS an einem universitären Labor bedarf es einer gut strukturierten und durchdachten Projektplanung, um mit den begrenzten personellen und finanziellen Mitteln ein effizientes QMS aufbauen zu können. Wenn darauf geachtet wird, dass nur die wichtigsten Methoden Schritt für Schritt unter Einbeziehung der Mitarbeiter eingeführt werden, kann durch die Einführung eines QMS mit wenigen kostengünstigen und wirkungsvollen Methoden eine starke Verbesserung der Qualität der wissenschaftlichen Arbeit erreicht werden.

In dieser Arbeit wurden Grundvoraussetzungen beleuchtet und eine Beurteilung gegeben, unter welchen Aspekten ein QMS in einem universitären HL-Labor aufgebaut werden kann. Dabei wurden unterschiedliche Methoden untersucht und auf ihre Einsatzfähigkeit geprüft. Zusätzlich wurde ein QMS am HPT aufgebaut und Basismethoden etabliert.

Dabei hat sich gezeigt, dass zur Einführung eines QMS am HPT eine Person mit technologischen Kenntnissen benötigt wird und diese in das System einbringt, was in der Funktion des Technologieleiters entspricht.

Zusätzlich wird eine Person benötigt, die sich mit den unterschiedlichen QM-Methoden auskennt, diese an Beispielen vorführt, erklärt und als Ansprechpartner zur Verfügung steht. Diese Person sollte aktiv eine „Qualitäts-Kultur“ im Labor fördern und fordern.

7 Ausblick

In einem universitären HL-Labor kann ein QMS nur in kleinen Schritten eingeführt und etabliert werden. Vorliegende Arbeit hat dafür den ersten Baustein bereit gestellt.

Desweiteren wird zur Aufrechterhaltung und Verbesserung des QMS eine Person benötigt, die verantwortlich dafür ist, dass

- QM-Methoden weiter eingeführt und erklärt werden.
- die QM-Kultur am HPT gepflegt, umgesetzt und gefördert wird.
- das System effektiver gemacht wird durch einen stärkeren Einsatz von QM-Methoden.
- Verbesserungspotentiale erkannt werden.
- Geräte und Prozesse, die nicht mehr verbessert werden können, erkannt werden.
- eingeführte QM-Methoden ausgebaut werden.
- die WB weiter gepflegt und genutzt wird.

Die aufgeführten Schritte zur Umsetzung eines wirksamen QMS am HPT bedürften einen Aufwand von mindestens weiteren drei Jahren sowie die Vorgabe gesteckte QM-Ziele konsequent zu verfolgen.

A Ablaufplan für MOSFET Standardprozess

1.	Simulation	Simulationsrechner
2.	Wafer-Ausgabe durch Bernhard Fabel Eintrag in Vergabe-Liste	
3.	Wafer sägen (Herr Demmel)/Substrat	Wafersäge
4.	Reinigung, Hydrophilisieren, SOD aufbringen	Naßchemie, Lackschleuder
5.	p-Diffusion, SOD entfernen	Diffusionsofen, Naßchemie
6.	Bauelement-Isolation: Oxidation nass (Feldoxid)	ATV-Oxidationsofen
7.	Source/Drain (S/D) Wannen	
7.1	Lithographie mit Randbelichtungsmaske	Lackschleuder, kleiner Belichter
7.2	Lithographie Maske 1: S/D Wannen definieren	Lackschleuder, kleiner Belichter
7.3	BHF-Ätze: S/D Wannen freilegen	Naßchemie
7.4	Fotoresist-Entfernung (PR-Remove)	Naßchemie
7.5	Hydrophilisieren	Naßchemie
7.6	Spin on Dopant (SOD) aufbringen	Lackschleuder
7.7	n-Diffusion	Diffusionsofen
	mögliche Pause	
8.	Gate Stack	
8.1	SOD entfernen	Naßchemie
8.2	Lithographie mit Randbelichtungsmaske	Lackschleuder, kleiner Belichter
8.3	Lithographie Maske 2: Aktives Gebiet definieren	Lackschleuder, kleiner Belichter
8.4	BHF-Ätze: Aktives Gebiet freilegen	Naßchemie
8.5	Fotoresist-Entfernung (PR-Remove)	Naßchemie
8.6	Reinigung	Naßchemie
8.7	Gateoxid: trockene Oxidation	ATV-Oxidationsofen
8.8	Aluminium (Al) aufdampfen	Leybold-Aufdampfanlage
	mögliche Pause	
9.	Gate-Strukturierung	
9.1	Lithographie mit Randbelichtungsmaske	Lackschleuder, kleiner Belichter
9.2	Lithographie Maske 3: Gate definieren	Lackschleuder, kleiner Belichter
9.3	Al-Ätze: Gate strukturieren	Naßchemie
	mögliche Pause	
10.	Kontaktlöcher	
10.1	Fotoresist-Entfernung (PR-Remove)	Naßchemie
10.2	Passivierung mit SOG	Naßchemie
10.3	Lithographie Maske 4: Kontaktlöcher definieren	Lackschleuder, kleiner Belichter
	mögliche Pause	
10.4	BHF-Ätze: Kontaktloch freilegen	Naßchemie
11.	Metallisierung	
11.1	Fotoresist-Entfernung (PR-Remove)	Naßchemie
11.2	Al-Kontaktpads aufdampfen: Metallisierung	Leybold-Aufdampfanlage
	mögliche Pause	
11.3	Lithographie Maske 5: Kontakte definieren	Lackschleuder, kleiner Belichter
11.4	Al-Ätze: Kontaktpads strukturieren	Naßchemie
11.5	Fotoresist-Entfernung (PR-Remove)	Naßchemie
12.	Ergebnisse	
12.1	Messen, Tempern, Messen	Messgeräte

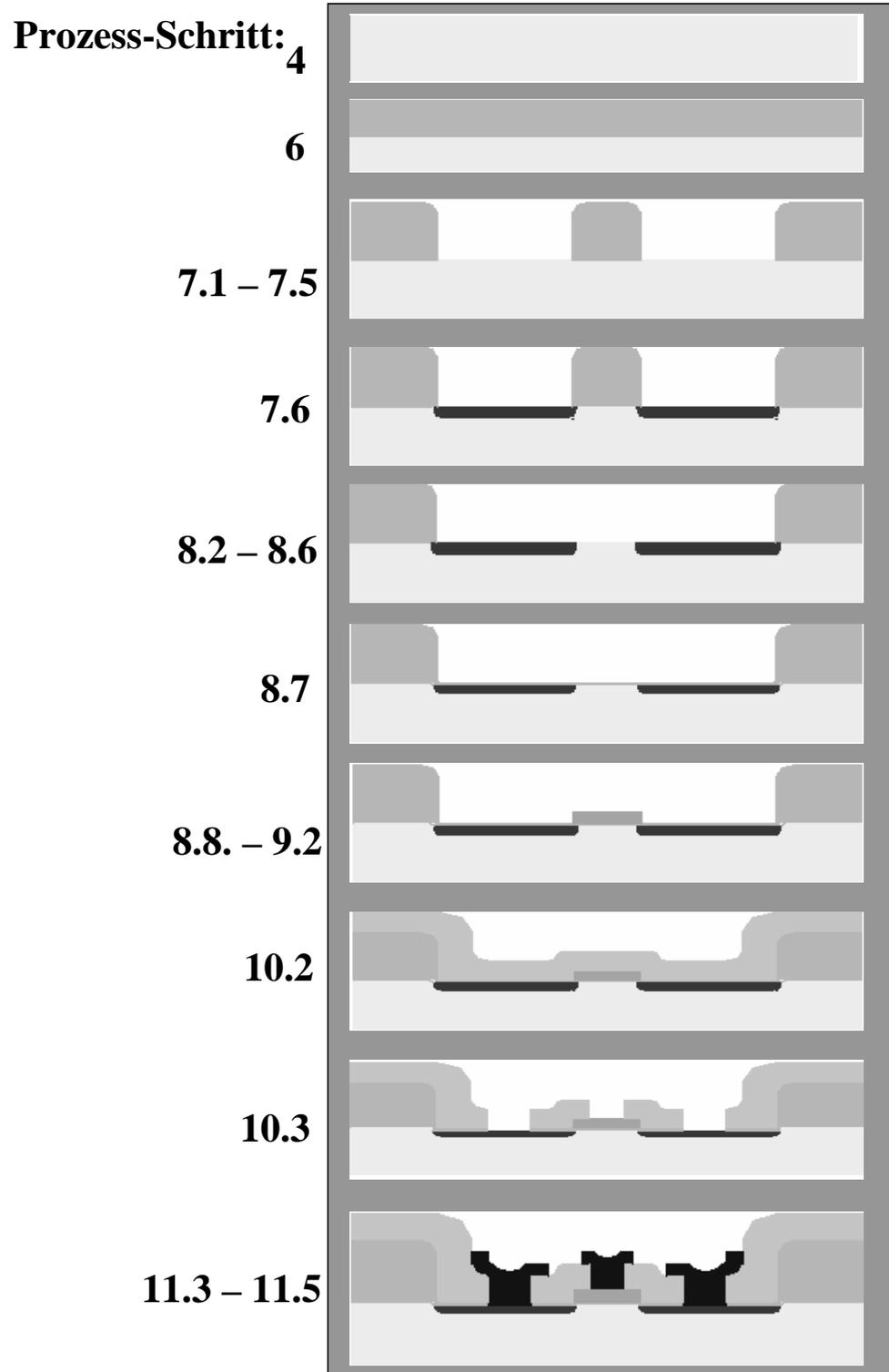


Abbildung 56: MOSFET-Gesamtprozess grafisch

Bearbeiter: _____ Vergabe Nr. (excel-Tabelle): _____

Gate Stack

Oxidation trocken

(Gateoxid):

Datum: _____ **Zeit:** von _____ bis _____

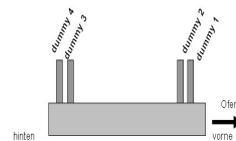
Zu beachten: **Ziel: Standardgateoxid 20 nm** **SOFORT nach Reinigung!!**

Ofen: ATV-Ofen
 vorherige Oxidation nass (Trocknerprogramm!) vorherige Oxidation trocken

ATV Ofen genaue Beschreibung siehe

Anfang:

- 1. genügend N₂? (Flaschenraum) ok
- 2. O₂- und N₂- Hahn öffnen ok
- 3. Kühlwasserventile öffnen (2 Stück) ok
- 4. Lüfter an ? (schwarzer Stecker hinten) ok
- 5. Ofen am Hauptschalter „ein“ ok
- 6. Rechner einschalten und Programm *WinATVNT* am Desktop starten ok
 (User-Name: *Admin* – kein Passwort)
- 7. Sobald der Ofen „hochgefahren“ ist:
 Gasflüsse kontrollieren mit Ventil-Programm
 (NAME-Programm oder interner Speicherplatz 9 → Start) ok



Beladen des Ofens:

- 8. dummy wafer vorne+hinten+ Proben laden ok
- 9. In *WinATVNT* das Prozess-Profil erstellen oder laden (NAME)+ senden an Ofen ok

UHRZEIT: _____ **PROZESSENDE:** _____
 (Probenentnahme)

Ende:

- 10. Rechner runterfahren+ausschalten ok
- 11. Sauerstoffhahn schließen ok
- 12. Stickstoffhahn schließen ok
- 13. Ofen am Hauptschalter „aus“ ok

Arbeitsanweisung:

trockene Oxidation
 Flow 1: 2 l/min Flow 2: 2 l/min
 Flow 3: 2 l/min Flow 4: 0 l/min

Parameter:

1000°C
 Dauer Oxidation: 10 min.
 1 nm = 10 Angström

Bemerkungen: ΔZeit = HF-Dip - Beladen= _____

Ellipsometer-Messung: _____ nm

Abbildung 58: Laufzettel Prozess-Schritt 8.7 - Gateoxidation

C Qualitätsregelkarten für Geräte am HPT - Beispiele

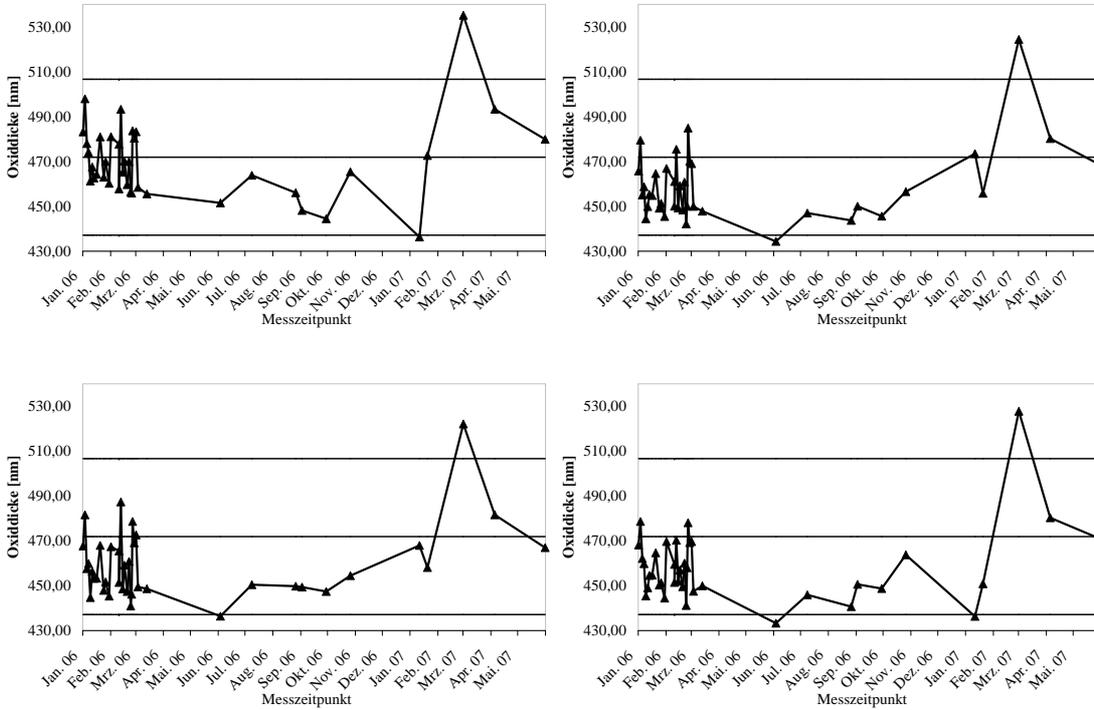


Abbildung 59: Qualitätsregelkarte ATV Nassoxid über Scheiben 1-4

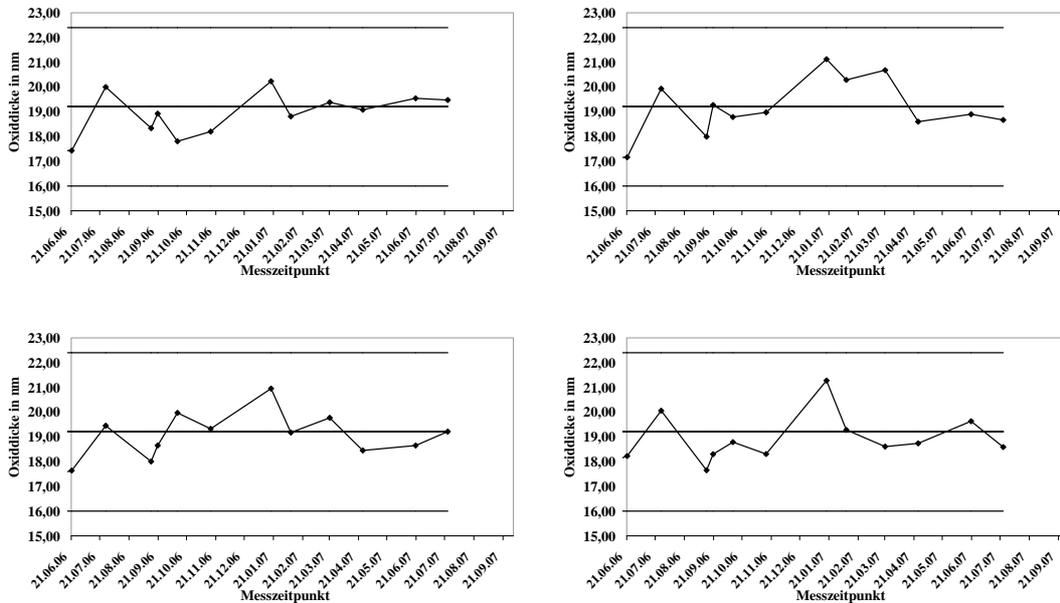


Abbildung 60: Qualitätsregelkarte ATV Trockenoxid über Scheiben 1-4

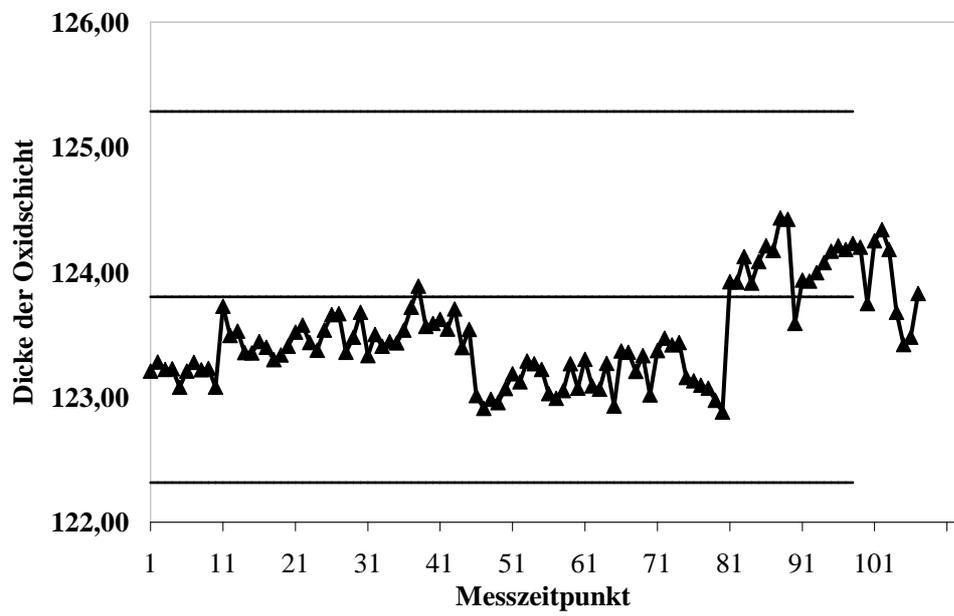


Abbildung 61: Qualitätsregelkarte Ellipsometer

D Test auf Normalverteilung Scheibe 2

$$x_{max} = 23,52$$

$$x_{min} = 16,49$$

$$R = 7,03$$

$$d = 0,47$$

$x_{min} = 16,49$ entspricht der untersten Grenze der Klassen.

Klasse	untere Grenze	Häufigkeit
1	16,49	6,00
2	16,96	5,00
3	17,43	10,00
4	17,89	24,00
5	18,36	32,00
6	18,83	53,00
7	19,30	43,00
8	19,77	23,00
9	20,24	10,00
10	20,71	8,00
11	21,17	4,00
12	21,64	2,00
13	22,11	2,00
14	22,58	2,00
15	23,05	1,00
	23,52	

Tabelle 20: Test auf Normalverteilung für ATV-Trockenoxid Scheibe 2

E Berechnung der Einsatzspannung

Berechnung der Einsatzspannung für MOSFETs. Diese Formel sollte zur Bestimmung der Toleranzbreite zur Berechnung der Fähigkeitskennzahlen verwendet werden.

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_B + \gamma_n \sqrt{2\Phi_B} \quad (29)$$

mit

$$V_{FB} = \Phi_M - \chi_{Si} - \frac{E_g}{2q} - \Phi_B - \frac{Q_f}{C_0} \quad (30)$$

Tabelle 21 stellt die Werte der Standard-MOSFETs dar, die am HPT nach [Fab08] zur Berechnung der Einsatzspannung verwendet werden. Die Berechnungen wurden mittels Microsoft-Excel durchgeführt. Besonderes Augenmerk muss auf Q_f gelegt werden, da Q_f den größten Einfluss auf die Einsatzspannung hat [Fab08].

Φ_M	Austrittsarbeit Metall (Al)	4,1 V
χ_{Si}	Elektronenaffinität Si	4,05 V
E_G	Bandlückenenergie Si bei Raumtemperatur	1,1 V
q	Elementarladung	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
N_A	Kanaldotierung	10^{16} cm^{-3}
n_i	intrinsische Ladungsträgerdichte Si bei Raumtemperatur	$1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	$8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
ϵ_{Si}	Dielektrizitätskonstante Si	11,9
ϵ_{ox}	Dielektrizitätskonstante Oxid	3,9
V_t	Thermospannung	26 mV
Q_f	feste Oxidladungen	$4 - 5 \cdot 10^{11} \frac{\text{q}}{\text{cm}^2}$
Φ_B	Bulkpotential	$V_t \cdot \ln \frac{N_A}{n_i}$
γ_n	Substratsteuerfaktor	$\frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_0\epsilon_{Si}}}{C_0}$
C_0	flächennormierte Oxidkapazität	$\frac{\epsilon_0\epsilon_{ox}}{d_{ox}}$

Tabelle 21: Werte zur Berechnung der Einsatzspannung

F K

	s-Karte (Seite 195)	R-Karte (Seite 196)
Obere Eingriffsgrenze OEG	$B_{OEG} \cdot \sigma$	$D_{OEG} \cdot \sigma$
Obere Warngrenze OWG	$B_{OWG} \cdot \sigma$	$D_{OWG} \cdot \sigma$
Mittellinie M	$a_n \cdot \sigma$	$d_n \cdot \sigma$
Untere Warngrenze UWG	$B_{UWG} \cdot \sigma$	$D_{UWG} \cdot \sigma$
Untere Eingriffsgrenze UEG	$B_{UEG} \cdot \sigma$	$D_{UEG} \cdot \sigma$

s-Karte: χ^2 -Werte aus Tab. 5

$$\bar{B}_{OEG} = \sqrt{\frac{\chi^2_{f,0,995}}{f}}, \quad B_{OEG} = \sqrt{\frac{\chi^2_{f,0,005}}{f}} \text{ bzw.}$$

$$\bar{B}_{OWG} = \sqrt{\frac{\chi^2_{f,0,975}}{f}}, \quad B_{OWG} = \sqrt{\frac{\chi^2_{f,0,025}}{f}}$$

R-Karte: $w_{n,G}$ -Werte aus Tab. 7

$$D_{OEG} = w_{n,0,995}, \quad D_{UEG} = w_{n,0,005} \text{ bzw.}$$

$$D_{OWG} = w_{n,0,975}, \quad D_{UWG} = w_{n,0,025}$$

Bei Stichproben normalverteilter Meßwerte, alle vom gleichen Umfang n, ist a_n der Erwartungswert (das langfristige Mittel) von s/σ und d_n jener von R/σ .

n	s-Karte					R - Karte				
	a_n	B_{OEG}	B_{OWG}	B_{UWG}	B_{UEG}	d_n	D_{OEG}	D_{OWG}	D_{UWG}	D_{UEG}
2	0,798	2,807	2,241	0,031	0,006	1,128	3,970	3,170	0,044	0,009
3	0,805	2,102	1,921	0,159	0,071	1,693	4,424	3,682	0,303	0,135
4	0,921	2,069	1,765	0,268	0,155	2,059	4,694	3,984	0,595	0,343
5	0,940	1,927	1,669	0,348	0,227	2,326	4,886	4,197	0,850	0,555
6	0,952	1,830	1,602	0,408	0,287	2,534	5,033	4,361	1,066	0,749
7	0,959	1,758	1,552	0,454	0,336	2,704	5,154	4,494	1,251	0,922
8	0,965	1,702	1,512	0,491	0,376	2,847	5,255	4,605	1,410	1,075
9	0,969	1,657	1,480	0,522	0,410	2,970	5,341	4,700	1,550	1,212
10	0,973	1,619	1,454	0,548	0,439	3,078	5,418	4,784	1,674	1,335
11	0,975	1,587	1,431	0,570	0,464	3,173	5,485	4,858	1,784	1,446
12	0,978	1,560	1,412	0,589	0,486	3,258	5,546	4,925	1,884	1,547
13	0,979	1,536	1,395	0,606	0,506	3,336	5,602	4,985	1,976	1,639
14	0,981	1,515	1,379	0,621	0,524	3,407	5,652	5,041	2,059	1,724
15	0,982	1,496	1,366	0,634	0,540	3,472	5,699	5,092	2,136	1,803
16	0,983	1,479	1,354	0,646	0,554	3,532	5,742	5,139	2,207	1,876
17	0,985	1,463	1,343	0,657	0,567	3,588	5,783	5,183	2,274	1,944
18	0,985	1,450	1,333	0,667	0,579	3,640	5,820	5,224	2,335	2,008
19	0,986	1,437	1,323	0,676	0,590	3,689	5,856	5,262	2,394	2,068
20	0,987	1,425	1,315	0,685	0,600	3,735	5,889	5,299	2,449	2,125

Abbildung 62: Konstanten aus [Tim04]

	x-Karte (Seite 191)	\bar{x} -Karte (Seite 194)	\bar{R} -Karte (Seite 195)
Obere Eingriffsgrenze OEG	$\mu + E_E \cdot \sigma$	$\mu + A_E \cdot \sigma$	$\mu + C_E \cdot \sigma$
Obere Warngrenze OWG	$\mu + E_W \cdot \sigma$	$\mu + A_W \cdot \sigma$	$\mu + C_W \cdot \sigma$
Mittellinie M	μ	μ	μ
Untere Warngrenze UWG	$\mu - E_W \cdot \sigma$	$\mu - A_W \cdot \sigma$	$\mu - C_W \cdot \sigma$
Untere Eingriffsgrenze UEG	$\mu - E_E \cdot \sigma$	$\mu - A_E \cdot \sigma$	$\mu - C_E \cdot \sigma$

$$x\text{-Karte: } E_E = u_{(1+\sqrt{0,95})/2}, \quad E_W = u_{(1+\sqrt{0,95})/2}$$

$$\bar{x}\text{-Karte: } A_E = \frac{2,576}{\sqrt{n}}, \quad A_W = \frac{1,960}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{R}\text{-Karte: } C_E = c_n \cdot \frac{2,576}{\sqrt{n}}, \quad C_W = c_n \cdot \frac{1,960}{\sqrt{n}}$$

Bei Stichproben normalverteilter Meßwerte, alle vom gleichen Umfang n , ist c_n der Erwartungswert (das langfristige Mittel) der Quotienten $\sigma_x / \sigma_{\bar{x}}$.

n	x - Karte		\bar{x} - Karte		\bar{R} - Karte		
	E_E	E_W	A_E	A_W	c_n	C_E	C_W
1	2,576	1,960	2,576	1,960	1,000	2,576	1,196
2	2,807	2,237	1,821	1,386	1,000	1,821	1,386
3	2,934	2,388	1,487	1,132	1,160	1,725	1,313
4	3,023	2,491	1,288	0,980	1,092	1,406	1,070
5	3,089	2,569	1,152	0,877	1,198	1,380	1,050
6	3,143	2,631	1,052	0,800	1,135	1,194	0,908
7	3,188	2,683	0,974	0,741	1,214	1,182	0,899
8	3,226	2,727	0,911	0,693	1,160	1,056	0,804
9	3,260	2,766	0,859	0,653	1,223	1,050	0,799
10	3,289	2,800	0,815	0,620	1,176	0,958	0,729
11	3,316	2,831	0,777	0,591	1,228	0,954	0,726
12	3,340	2,858	0,744	0,566	1,187	0,883	0,672
13	3,363	2,883	0,714	0,544	1,232	0,880	0,670
14	3,383	2,907	0,688	0,524	1,196	0,823	0,626
15	3,402	2,928	0,665	0,506	1,235	0,821	0,625
16	3,419	2,948	0,644	0,490	1,202	0,774	0,589
17	3,436	2,967	0,625	0,475	1,237	0,773	0,588
18	3,451	2,984	0,607	0,462	1,207	0,733	0,558
19	3,466	3,001	0,591	0,450	1,239	0,732	0,557
20	3,480	3,016	0,576	0,438	1,217	0,698	0,531
25	3,539	3,083	0,515	0,392	1,242	0,640	0,487

Abbildung 63: Konstanten aus [Tim04]

G Reinraumklassen nach ISO und US-Standard

Klasse	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1,0 μm	5,0 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1.000	237	102	35	8	
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7				352.000	83.200	2.930
ISO 8				3.520.000	832.000	29.300
ISO 9				35.200.000	8.320.000	293.000
ISO 9				35.200.000	8.320.000	293.000

Tabelle 22: Reinraumklassen nach ISO 14644-1

Klasse	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	5,0 μm
1	1.236	247	106	35	
10	12.360	2.649	1.059	353	
100		26.486	10.594	3.531	
1.000				35.315	247
10.000				353.147	2.472
100.000				3.531.470	24.720

Tabelle 23: Reinraumklassen nach US FED STD 209E

H Datentabellen Verbesserung MOSFETs

H.1 Ausbeute (Yield)

Nr.	Datum	Yield	Nr.	Datum	Yield
1	15.12.2004	4,50	34	21.03.2007	42,33
2	22.03.2005	32,28	35	22.03.2007	83,07
3	28.03.2005	46,03	36	24.03.2007	74,87
4	29.03.2005	23,54	37	26.03.2007	28,84
5	05.04.2005	13,76	38	28.03.2007	57,94
6	05.04.2005	31,48	39	30.03.2007	54,76
7	08.04.2005	32,01	40	01.04.2007	36,51
8	12.04.2005	39,42	41	03.04.2007	79,63
9	15.04.2005	8,73	42	05.04.2007	40,48
10	19.04.2005	5,82	43	16.04.2007	37,83
11	26.04.2005	6,08	44	18.04.2007	9,79
12	29.04.2005	54,23	45	20.04.2007	94,18
13	30.04.2005	74,07	46	22.04.2007	4,23
14	03.05.2005	6,88	47	10.05.2007	96,48
15	05.05.2005	64,81	48	17.05.2007	97,54
16	09.05.2005	19,84	49	11.06.2007	85,83
17	12.05.2005	55,29	50	13.06.2007	87,57
18	15.05.2005	24,87	51	14.06.2007	62,43
19	19.05.2005	56,88	52	15.06.2007	70,90
20	16.01.2006	50,53	53	16.06.2007	58,99
21	23.01.2006	74,87	54	17.06.2007	91,67
22	30.01.2006	54,50	55	23.06.2007	99,17
23	05.02.2006	72,49	56	25.06.2007	86,67
24	12.02.2006	70,11	57	27.06.2007	86,36
26	09.11.2006	75,13	59	29.06.2007	80,91
27	16.11.2006	53,97	60	29.06.2007	100,00
28	13.02.2007	0,53	61	03.07.2007	63,49
29	19.02.2007	13,23	62	06.09.2007	25,15
30	25.02.2007	17,46	63	07.09.2007	95,76
31	03.03.2007	83,07	64	08.09.2007	38,48
32	09.03.2007	35,98	65	09.09.2007	83,94
33	15.03.2007	63,49	66		

Tabelle 24: Werte zu Abbildung 44 Seite 93

H.2 Einsatzspannung V_{th}

Nr.	Datum	Mittelwert	Standard- abweichung	Nr.	Datum	Mittelwert	Standard- abweichung
1	15.12.2004	0,76	0,35	33	21.03.2007	-0,17	0,31
2	22.03.2005	1,09	0,37	34	22.03.2007	0,01	0,23
3	28.03.2005	-0,56	0,43	35	24.03.2007	0,03	0,09
4	29.03.2005	0,87	0,33	36	26.03.2007	-0,02	0,43
5	05.04.2005	-0,83	0,47	37	28.03.2007	0,10	0,24
6	05.04.2005	1,16	0,60	38	30.03.2007	-0,09	0,08
7	08.04.2005	0,00	0,51	39	01.04.2007	0,01	0,33
8	12.04.2005	-0,31	0,41	40	03.04.2007	0,00	0,19
9	15.04.2005	-0,39	0,66	41	05.04.2007	0,00	0,16
10	19.04.2005	-0,88	0,39	42	16.04.2007	0,39	0,57
11	26.04.2005	-1,01	0,48	43	18.04.2007	0,53	0,55
12	29.04.2005	-0,18	0,45	44	20.04.2007	-0,20	0,24
13	30.04.2005	-0,30	0,49	45	22.04.2007	0,46	1,05
14	03.05.2005	-1,53	0,57	46	10.05.2007	0,19	0,11
15	05.05.2005	-0,16	0,43	47	17.05.2007	0,33	0,23
16	09.05.2005	-0,62	0,56	48	11.06.2007	-0,05	0,11
17	12.05.2005	-0,13	0,43	49	13.06.2007	-0,06	0,14
18	15.05.2005	-0,01	0,37	50	14.06.2007	-0,24	0,25
19	19.05.2005	-0,07	0,60	51	15.06.2007	0,30	0,14
20	16.01.2006	0,35	0,33	52	16.06.2007	-0,12	0,20
21	23.01.2006	0,30	0,46	53	17.06.2007	-0,10	0,05
22	30.01.2006	0,29	0,49	54	23.06.2007	-0,20	0,13
23	05.02.2006	0,41	0,14	55	25.06.2007	0,00	0,22
24	12.02.2006	0,34	0,28	56	27.06.2007	0,05	0,03
25	09.11.2006	0,20	0,30	57	27.06.2007	0,12	0,31
26	16.11.2006	-0,02	0,29	58	29.06.2007	0,06	0,32
27	13.02.2007	-0,05	0,78	59	29.06.2007	-0,29	0,23
28	19.02.2007	0,48	1,01	60	03.07.2007	-0,25	0,25
29	25.02.2007	0,33	0,55	61	06.09.2007	0,63	0,78
30	03.03.2007	-0,40	0,24	62	07.09.2007	0,04	0,22
31	09.03.2007	-0,35	0,32	63	08.09.2007	0,30	0,56
32	15.03.2007	-0,12	0,50	64	09.09.2007	0,00	0,21

Tabelle 25: Werte zu Abbildung 44 Seite 93

H.3 Dekaden I_{on}/I_{off}

Nr.	Datum	Mittelwert	Standard- abweichung	Nr.	Datum	Mittelwert	Standard- abweichung
1	15.12.2004	4,26	0,49	33	21.03.2007	6,41	1,93
2	22.03.2005	5,30	0,93	34	22.03.2007	6,70	1,06
3	28.03.2005	3,93	0,59	35	24.03.2007	5,13	1,41
4	29.03.2005	4,43	0,65	36	26.03.2007	6,51	1,26
5	05.04.2005	3,77	0,49	37	28.03.2007	5,32	1,46
6	05.04.2005	6,13	0,81	38	30.03.2007	4,95	1,00
7	08.04.2005	3,76	0,51	39	01.04.2007	4,95	1,72
8	12.04.2005	4,28	0,63	40	03.04.2007	4,37	0,95
9	15.04.2005	3,51	0,32	41	05.04.2007	4,22	1,16
10	19.04.2005	3,46	0,32	42	16.04.2007	3,90	0,61
11	26.04.2005	3,87	0,44	43	18.04.2007	3,69	0,48
12	29.04.2005	4,09	0,62	44	20.04.2007	3,89	0,96
13	30.04.2005	4,44	0,72	45	22.04.2007	6,95	0,54
14	03.05.2005	4,72	0,68	46	10.05.2007	4,87	0,64
15	05.05.2005	4,20	0,63	47	17.05.2007	5,08	0,63
16	09.05.2005	3,74	0,48	48	11.06.2007	6,38	0,59
17	12.05.2005	4,13	0,68	49	13.06.2007	5,66	0,63
18	15.05.2005	3,35	0,33	50	14.06.2007	5,28	1,45
19	19.05.2005	5,65	1,06	51	15.06.2007	6,94	0,57
20	16.01.2006	3,69	0,28	52	16.06.2007	3,87	0,44
21	23.01.2006	3,78	0,27	53	17.06.2007	6,18	0,69
22	30.01.2006	4,01	0,41	54	23.06.2007	7,05	0,35
23	05.02.2006	3,56	0,31	55	25.06.2007	7,85	0,76
24	12.02.2006	3,74	0,28	56	27.06.2007	6,96	0,47
25	09.11.2006	5,72	0,87	57	27.06.2007	7,35	0,65
26	16.11.2006	4,94	1,11	58	29.06.2007	7,26	0,94
27	13.02.2007	3,20	0,00	59	29.06.2007	6,42	0,35
28	19.02.2007	5,89	1,59	60	03.07.2007	6,99	0,95
29	25.02.2007	4,07	0,92	61	06.09.2007	4,94	1,65
30	03.03.2007	4,57	0,74	62	07.09.2007	7,26	0,96
31	09.03.2007	6,14	1,78	63	08.09.2007	5,62	1,48
32	15.03.2007	5,19	1,00	64	09.09.2007	6,21	1,10

Tabelle 26: Werte zu Abbildung 44 Seite 93

I Statistik Zeitverkürzung von Studien-/Bachelor- und Diplomarbeiten

Tabellen 27 und 28 stellen die Statistik zu Abbildungen 49 und 50 aus Seite 98 und 98 dar:

Spalte 1 *Max*: Dauer der Arbeit, die am längsten gedauert hat.

Spalte 2 *Min*: Dauer der Arbeit, die am kürzesten gedauert hat.

Spalte 3 *MW*: Mittelwert aller Arbeiten, die in diesem Semester begonnen haben.

Spalte 4 *Anzahl*: Anzahl an Arbeiten, die in diesem Semester begonnen wurden.

Semester	Max	Min	MW	Anzahl
WS 02/03	7	6	7	2
SS 03	13	4	9	3
WS 03/04	15	15	15	1
SS 04	28	5	14	5
WS 04/05	20	6	13	2
SS 05	11	6	9	3
WS 05/06	7	7	7	1
SS 06	8	6	7	5
WS 06/07	10	6	8	2
SS 07	6	6	6	1

Tabelle 27: Werte zu Abbildung 49

Semester	Max	Min	MW	Anzahl
WS 00/01	5	5	5	1
SS 01	6	6	6	1
SS 04	13	8	10	3
SS 05	9	6	8	3
WS 05/06	14	7	10	3
SS 06	8	8	8	1
WS 06/07	8	6	7	2

Tabelle 28: Werte zu Abbildung 50

J Zusätzliche Komponenten für die WB

- **Belegungs- /Buchungssystem für Geräte**
- **External Editor:** Editierung von Seiten im html-Format mit „word“ähnlichem Editor
- **WEB-DAV:** WebDAV is a way to manage files over HTTP, an extension to the normal protocol of the World wide web. You can think of it as something in-between FTP and a network share on your local network.; Kontrolle, dass nur ein User an einer Datei arbeitet
- **Cookies:** Ermöglicht es, dass User länger als eine Session eingeloggt bleiben. Es wurde eingestellt, dass alle vier Wochen eine erneute Anmeldung stattfinden muss.
- **ZMySQLData:** Externe MySQL-Datenbank-Anbindung, die von plone aus aufgerufen werden kann. Verwendung: Partikelmessungen, MOSFET-Ergebnisse
- **Wissensdatenbank als Suchanbieter in den Browser aufnehmen:** Aktuelle Firefox- und Internet Explorer-Versionen bieten die Möglichkeit oben rechts Suchanbieter einzubinden. Neben den etablierten Web-Suchmaschinen wie Google kann auch die WB dort eingebunden werden, um schnell Suchergebnisse zu erhalten, ohne vorher die WB explizit aufzurufen.

Abbildungsverzeichnis

1	Zeitliche Entwicklung des QM	4
2	Prägende Persönlichkeiten für QM	5
3	Prozessmodell aus DIN 9000 [Din05]	10
4	PDCA nach [Lin05]	11
5	Teilansicht 1 des Reinraums am LTE / HPT	16
6	Teilansicht 2 des Reinraums am LTE / HPT	16
7	Haar auf 4Mb DRAM Strukturen (aus [Foe07])	19
8	Kosmetik-Partikel auf 4Mb DRAM Aluminiumbahnen (aus [Foe90])	19
9	Organisationsstruktur im universitären Bereich	20
10	QFD - House of Quality	26
11	Grafische Darstellung der Fähigkeit	42
12	Arten von QRK	44
13	Grundsätzlicher Aufbau von QRK	45
14	Trends bei QRK: Mittelwert außerhalb der Grenzen	50
15	Trends bei QRK: Run	50
16	Trends bei QRK: Trend	50
17	Trends bei QRK: Schwingung	50
18	Trends bei QRK: Middle Third 1	50
19	Trends bei QRK: Middle Third 2	50
20	Verteilung der Messpunkte 1 bis 9 auf den Silizium-Substrate	55
21	Einschubrichtung der Silizium-Substrate in ATV-Oxidationsofen	56
22	Dickenverteilung von Scheibe 2	58
23	Histogramm und Gaußfit- Verteilung der Klassen für Scheibe 2	59
24	Grafische Darstellung der Prozessfähigkeit des ATV-Ofens	61
25	Qualitätsregelkarte für Messpunkt 5 auf Scheibe 2 im jeweiligen run	63
26	Zusammenhang zwischen Systemgrößen und Systemwirkung aus [Kle07]	65
27	Versuchsraumabdeckung einfaktorierlicher Versuchsplan nach [Lin05]	66
28	Versuchsraumabdeckung moderne Versuchsplanung - DoE nach [Lin05]	66
29	Versuchsraumabdeckung D-Optimaler Versuchsplan	68
30	Spitze aus Versuch 9 - aus [Bib07]	72
31	Spitze aus Versuch 20 - aus [Bib07]	72
32	Grundsätzlicher Aufbau Ishikawa-Diagramm	81
33	Ishikawa-Diagramm: Einzelprozess Lithographie MOSFET-Prozess nach [Sch07]	82
34	Ishikawa-Diagramm: Verringerung der Ausbeute an Bauelementen beim MOSFET-Prozess	83
35	Anordnung der Scheiben für Leybold Aluminium Aufdampfen	87
36	Blende für Leybold Aufdampfanlage alt - neu	87
37	Vergleich der Dickenverteilung Aluminium pro vier Scheiben alt	88
38	Vergleich der Dickenverteilung Aluminium pro vier Scheiben neu	88

39	Überblick Messpunkte für Partikelmessungen im Reinraum	89
40	Grafische Darstellung der Partikel der Größe $0,3 - 5\mu m$ an MP 7	90
41	Reinraumklasse Schleuse - Partikelgröße $0,5\mu m$	91
42	Reinraumklasse Abzug - Partikelgröße $0,5\mu m$	91
43	Verfügbarkeit der Geräte für Technologie	92
44	Mittelwerte über die Ausbeute von Standard-MOSFETs	93
45	Beispiel-Kennlinie I_{on}/I_{off} Standard-MOSFETs	94
46	Mittelwerte über I_{on}/I_{off} von Standard-MOSFETs	95
47	Mittelwerte über die Einsatzspannung V_{th} von Standard-MOSFETs	95
48	Standardabweichung der Einsatzspannung V_{th} von Standard-MOSFETs	96
49	Zeitverkürzung der Studien- und Bachelorarbeiten	98
50	Zeitverkürzung der Diplomarbeiten	98
51	Wissensmanagement als Zentrales Informationssystem	100
52	Screenshot des aktuellen <i>plone</i> User-Interface	104
53	Buchungssystem für Geräte	106
54	Überblick über Aufbau der WB	107
55	Detaillierter Überblick über Aufbau des Ordners <i>Technologie</i> der WB	108
56	MOSFET-Gesamtprozess grafisch	115
57	Laufzettel Prozess-Schritt 6 - Feldoxidation	116
58	Laufzettel Prozess-Schritt 8.7 - Gateoxidation	117
59	Qualitätsregelkarte ATV Nassoxid über Scheiben 1-4	118
60	Qualitätsregelkarte ATV Trockenoxid über Scheiben 1-4	118
61	Qualitätsregelkarte Ellipsometer	119
62	Konstanten aus [Tim04]	122
63	Konstanten aus [Tim04]	123

Tabellenverzeichnis

1	Methoden aus dem PDCA-Kreis	13
2	Übersicht Prozessgeräte	17
3	Übersicht Messgeräte	17
4	Ungeeignete Methoden zur Anwendung am HPT	24
5	Geeignete Methoden nach Wichtigkeit sortiert	24
6	Anforderungen an MFU und PFU Parameter	41
7	Komponenten von QRK	45
8	Mittels QRK kontrollierte Geräte	52
9	Zeitaufwand für Kontrolle	53
10	Parameter Standardprozess Trockenoxid	55
11	Ergebnisse in [nm] Vorlaufuntersuchung ATV-Trockenoxid Scheibe 2	57
12	Zählender Test auf Normalverteilung	58
13	Berechnung der Mittellinie und Grenzen für Scheibe 2	62
14	Parameter und Einstellungen für die Trockenätzanlage	70
15	Errechnete Einstellungen für das DoE	70
16	Ergebnisse aus den Versuchen für das DoE	71
17	Berechnete optimale Parameter und Einstellungen für die Trockenätzanlage	72
18	Schritte zur effektiven Fehlerbehandlung	74
19	Überblick über die einzelnen Bereiche des <i>plone</i> -Interface in Abbildung 52	104
20	Test auf Normalverteilung für ATV-Trockenoxid Scheibe 2	120
21	Werte zur Berechnung der Einsatzspannung	121
22	Reinraumklassen nach ISO 14644-1	124
23	Reinraumklassen nach US FED STD 209E	124
24	Werte zu Abbildung 44 Seite 93	125
25	Werte zu Abbildung 44 Seite 93	126
26	Werte zu Abbildung 44 Seite 93	127
27	Werte zu Abbildung 49	128
28	Werte zu Abbildung 50	128

Literatur

- [Aka92] Y. Akao, *QFD-Quality Function Deployment*, Verlag Moderne Industrie Landsberg/Lech, 1992.
- [Bar94] T.B. Barker, *Quality by Experimental Design*, Marcel Dekker, 1994.
- [Bib07] J. Biba, *Entwicklung eines anisotropen Trockenätzverfahrens zur Herstellung von Feldemissionsspitzen*, Bachelorarbeit, echnische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, 2007.
- [Bow99] C.L. Bowen, *Integrated Statistical Process Control as a Productivity Improvement Tool*, IEEWSEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 1999.
- [Che00] A. Chen, R.S. Guo, P.C. Yeh, *An Effective SPC Approach to Monitoring Semiconductor Quality Data with Multiple Variation Sources*, Proceedings of ISSM: The Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacturing, Pages 446 - 449, 2000.
- [Cor06] Software Cornerstone, <http://www.brookssoftware.com>, 2006.
- [Cro95] P.B. Crosby, *Quality Without Tears: The Art of Hassle-Free Management*, McGraw-Hill Publishing Co., 1995.
- [Cro78] P.B. Crosby, *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*, McGraw-Hill Professional, 1978.
- [DBZ07] Webseite: DBZ Deutsches Benchmarking Institut, <http://www.benchmarkingforum.de>, 2007.
- [Dem00] W.E. Deming, *Out of the Crisis*, B&T, 2000.
- [DGQ03] DGQ, Deutsche Gesellschaft für Qualität eV, *Prüfmittelmanagement*, Beuth, Berlin, 2003.
- [DGQ04] DGQ, Deutsche Gesellschaft für Qualität eV, *FMEA-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, Band 13-11*, Beuth, Berlin, 2004.
- [Die03] E. Dietrich, A. Schulze, *Statistische Verfahren zur Maschinen- und prozessqualifikation*, Hanser, 2003.
- [Die06] E. Dietrich, A. Schulze, *Prüfprozesseignung*, Hanser, 2006.
- [Din00a] DIN, Deutsches Institut für Normung eV, *DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme Anforderungen (ISO 9001:2000)*, 2000.
- [Din00b] DIN, Deutsches Institut für Normung eV, *DIN EN ISO 9004: Qualitätsmanagementsysteme Leitfaden zur Leistungsverbesserung (ISO 9004:2000)*, 2000.

- [Din02] DIN, Deutsches Institut für Normung eV, *DIN EN ISO 19011: Leitfaden für Audits von QM- und/oder UM-Systemen*, 2000.
- [Din05] DIN, Deutsches Institut für Normung eV, *DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)*, 2005.
- [Din06] DIN, Deutsches Institut für Normung eV, *DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*, 2006.
- [Fab08] B. Fabel, *Arbeitstitel: Gatestack Engineering mit ultrdünnen atomar selbstlimitierenden Dielektrika*, Doktorarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, to be published 2008.
- [Fae07] Webseite: Faes, <http://www.faes.de/Basis/Basis-Statistik/basis-statistik.html>, 2007.
- [Foe90] H. Föll, *21.IFF-Ferienkurs KFA Jülich*, 1990.
- [Foe07] H. Föll, *Vorlesungsskript Electronic Materials*, <http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat>, Hyperscripte, Electronic Materials, 2007.
- [FME01] QS-9000, *FMEA - Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse QS-9000*, 2001.
- [For92] Ford, Motor Company Essex, *Handbook TOPS (8D)*, 1992.
- [Fra06] C. Frappaolo, *Knowledge Management*, Capstone, 2006.
- [Frie06] H.-J. Friedrich, *Content Management mit Plone*, Springer, 2006.
- [Gai04] L. Gail, H.-P. Hortig, *Reinraumtechnik*, Springer, 2004.
- [Gei05] W. Geiger, W. Kotte, *Handbuch Qualität*, vieweg, 2005.
- [Gem06] S. Gembry, J. Herrmann, *Qualitätsmanagement*, Haufe, 2006.
- [Ham00] M. Hamada, C.F.J. Wu, *Experiments - Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*, Wiley, 2000.
- [Hei64] Heinold, Gaede *Ingenieur-Statistik*, Oldenbourg, 1964.
- [Her99] Hering, Triemel, Blank, *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, Springer, VDI Buch, 1999.
- [Hil02] U. Hillerigmann, *Silizium-Halbleitertechnologie*, Teubner, 2002.

- [Int07] K. Mistry, C. Allen, C. Auth, B. Beattie, D. Bergstrom, M. Bost, M. Brazier, M. Buehler, A. Cappellani, R. Chau, C.-H. Choi, G. Ding, K. Fischer, T. Ghani, R. Grover, W. Han, D. Hanken, M. Hattendorf, J. He, J. Hicks, R. Huessner, D. Ingerly, P. Jain, R. James, L. Jong, S. Joshi, C. Kenyon, K. Kuhn, K. Lee, H. Liu, J. Maiz, B. McIntyre, P. Moon, J. Neiryneck, S. Pae, C. Parker, D. Parsons, C. Prasad, L. Pipes, M. Prince, P. Ranade, T. Reynolds, J. Sandford, L. Shifren, J. Sebastian, J. Seiple, D. Simon, S. Sivakumar, P. Smith, C. Thomas, T. Troeger, P. Vandervoorn, S. Williams, K. Zawadzki, *A 45nm Logic Technology with High-k+Metal Gate Transistors, Strained Silicon, 9 Cu Interconnect Layers, 193nm Dry Patterning, and 100% Pb-free Packaging*, IEDM, 2007.
- [Ish85] K. Ishikawa, *What is Total Quality Control? the Japanese Way: The Japanese Way*, Prentice Hall, 1985.
- [Ish86] K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*, Asian Productivity Organization, Japan, 1986.
- [Jur00] J.M. Juran, A. Blanton Godfrey, *Juran's Quality Handbook*, McGraw-Hill Publ.Comp., 2000.
- [Kam99] G. Kamiske, J.-P. Brauer, *Qualitätsmanagement von A bis Z*, Hanser, 1999.
- [Kam04] G. Kamiske, *Qualitätsmanagement: Methoden, Praxisbeispiele, Hintergründe*, Symposium Publishing, 2004.
- [Kle06] W. Kleppmann, *Taschenbuch Versuchsplanung*, Carl Hanser Verlag, 2006.
- [Kle07] B. Klein, *Versuchsplanung - DoE*, Oldenbourg, 2007.
- [Kos06] C. Kostka, S. Kostka, *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess. Methoden des KVP*, Hanser Wirtschaft, 2006.
- [Kro03] D. Kroslid, K. Konrad Faber, K. Magnusson, *Six Sigma*, Hanser Wirtschaft, 2003.
- [Lea07] Webseite Leanmanufacturing, <http://www.leanmanufacturing.de>, 2007.
- [Lik04] J. Liker, *The Toyota Way*, McGraw Hill, 2004.
- [Lin05] G. Linß, *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, Fachbuchverlag Leipzig, 2005.
- [Liu06] Y. Liu, *Statistische Prozesskontrolle zur Überwachung des ATV-Oxidationsofens und des Ellipsometers*, Bachelorarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, 2006.
- [Mar98] H.-P. Martin, H. Schumann, *Die Globalisierungsfalle*, Rowohlt, 1998.
- [Mas03] R.L. Mason, R.F. Gunst, J.L. Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments*, Wiley, 2003.

- [Met06] K. Metaxiotis, J. Psarras, *Analysing the value of knowledge management leading to innovation*, International Journal for Knowledge Management Studies, Vol. 1, Nos. 1/2, pp.79–89., 2006.
- [Now07a] L. Nowack, B. Fabel, T. Maul, M. Sterkel, W. Kraus, W. Hansch, *Improving the Organizational Structure of a University Semiconductor Laboratory by Implementing a Knowledge Management System*, ICKM, 4th International Conference on Knowledge Management, Wien, 2007.
- [Now07b] L. Nowack, W. Kraus, T. Maul, M. Sterkel, B. Fabel, W. Hansch, *Improving Quality of Research at a University Semiconductor Lab by Implementing a Knowledge Management System*, EURO XXII, 22nd European Conference on Operational Reserach, Prague, 2007.
- [Now07c] L. Nowack, W. Hansch, *Wissensmanagement in einem universitären Halbleiter-Labor*, Wissensmanagement - Das Magazin für Führungskräfte, Vol.7 Pages 34-35, 2007.
- [Ohn93] T. Ohno, *Das Toyota-Produktionssystem*, Campus Verlag, Frankfurt/Main, New York, 1993.
- [Old07] Kurs: Qualitätssicherung durch Statistische Prozeßkontrolle Uni Oldenburg, <http://iso-espc.informatik.uni-oldenburg.de/Kurs/>, 2007.
- [Pas06] S. Pastore, *Web Content Management Systems: using Plone open source software to build a website for research institute needs*, IEEE: International Conference on Digital TelecommunicationsICDT '06, Page(s):24 - 24, 2006.
- [Pfe96] T. Pfeifer, *Wissensbasierte Systeme in der Qualitätssicherung*, Springer, 1996.
- [Mas07] T. Pfeifer, R. Schmitt, *Masing - Handbuch Qualitätsmanagement*, Masing - Handbuch Qualitätsmanagement, 2007.
- [Pha06] H. Pham, *Springer Handbook of Engineering Statistics*, Springer, 2006.
- [plo05] plone, enfoldsystems, *The definitive guide to plone*, 2005.
- [plo07] OSS plone, <http://plone.org/>, 2007.
- [QFD07] Webseite QFD-Institut Deutschland e.V., <http://www.qfd-id.de/>, 2007.
- [Qua07] Webseite: Qualitätsmanagement unter einem D,A,CH, <http://www.quality.de/>, 2007.
- [Rem05] J. Remus, *Infonautik*, GABAL management, 2005.
- [Rin99] H. Rinne, H.-J. Mittag, *Prozeßfähigkeitsmessung für die industrielle Praxis*, Fachbuchverlag Leipzig, 1999.

- [Rod03] G. Rodriguez-Ortiz, *Knowledge Management and Quality Certification in a Research and Development Environment*, Proceedings of the Fourth Mexican International Conference on Computer Science (ENC'03), 2003.
- [Rol03] H. Rollett, *Knowledge Management - Processes and Technologies*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [Rom95] G. Rommel, F. Brück, R. Diederichs, R.-D. Kempis, H.-W. Kaas, G. Fuhry, *Qualität gewinnt*, McKinsey & Company Inc., SchäfferPoeschel, 1995.
- [Ros88] Ph.J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering - Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*, McGraw-Hill, 1988.
- [Sch02] Chr. Schorn, *Entwicklung eines Trockenätzprozesses zur vertikalen Strukturierung von Silizium*, Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, 2002.
- [Sch07] B. Schäfer, *Herstellung von MOSFET-integrierten Field Emitter Arrays*, Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, 2007.
- [She80] W.A. Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, ASQC/Quality Press, 1980.
- [She87] W.A. Shewhart, *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*, Dover Publications Inc., 1987.
- [Shi95] Shigeo Shingo, *A Study of the Toyota Production System: From an Industrial Engineering Viewpoint (Produce What Is Needed, When It's Needed)*, B&T, 1995.
- [Sta] Software Statistica, <http://www.statsoft.de>.
- [Tag86] G. Taguchi, *Introduction to Quality Engineering. Designing Quality into Products and Processes*, Kraus International Publications, White Plains/New York, 1986.
- [Tag04] G. Taguchi, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [Tay67] F.W. Taylor, *The Principles of Scientific Management*, Norton & Company, 1967.
- [The05] P. Theden, H. Colsman, *Qualitätstechniken*, Hanser, 2005.
- [Thi04] G.K. Thiruvathukal, K. Läufer, *PLONE AND CONTENTMANAGEMENT*, IEEE: COMPUTING IN SCIENCE & ENGINEERING, 2004.
- [Tim04] W. Timischl, *Qualitätssicherung - Statistische Methoden*, Hanser, 2004.

- [Tra00] O.D. Trapp, L.J. Lopp, R.A. Blanchard, *Semiconductor Technology Handbook*, Components Technology Institute, Inc., 2000.
- [Ulm87] Transferzentrum Qualitätssicherung Ulm, *SPC Statistische Prozesskontrolle*, TQU, 1987.
- [Wem06] T. Wember, *Technische Statistik und statistische Versuchsplanung*, Dr. Theo Wember Training & Coaching, 2006.
- [Wik07a] Webseite: Wikipedia (Suchbegriff Wissen, Information), <http://de.wikipedia.org/>, 2007.
- [Wik07b] Webseite: Wikipedia (Suchbegriff Wissen, Information), <http://en.wikipedia.org/>, 2007.
- [Wik07c] Webseite: Wikipedia (Suchbegriff Statistischer Test), <http://de.wikipedia.org/>, 2007.
- [Zhu06] T. Zhu, *Maschinenfähigkeitsuntersuchung anhand einer Kathodenzerstäubungsanlage*, Bachelorarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik, 2006.
- [Zin98] R. Zinner, *Begriffe-Regeln-Formeln Qualitätsmanagement*, Cornelsen, 1998.
- [Zol02] H.-D. Zollondz, *Grundlagen Qualitätsmanagement*, Oldenbourg, 2002.
- [zop07] OSS zope, <http://zope.org/>, 2007.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Technische Elektronik im Fachgebiet Halbleiterproduktionstechnik and der Technischen Universität München.

Mein erster (und größter) Dank gilt Professor Hansch, der es für richtig hielt, mich in sein Team aufzunehmen. Die Arbeit im Team wurde durch seinen Optimismus, seine Art, Zweifel aus dem Weg zu räumen und das Team immer bei der Stange zu halten, zu einem großen Vergnügen. Vielen Dank dafür.

Bei Professorin Schmitt-Landsiedel bedanke ich mich für die freundliche Aufnahme am Lehrstuhl.

Desweiteren danke ich meinem Kollegen Dipl.-Ing. Bernhard Fabel für seine tatkräftige Unterstützung und Zusammenarbeit. Ohne ihn wäre die technischen und technologische Umsetzung sicherlich langsamer und beschwerlicher gewesen.

Dem Technologieleiter und Administrator Dipl.-Ing. Werner Kraus gilt mein besonderer Dank sowohl für die Unterstützung beim Aufbau des Qualitätsmanagementsystems als auch speziell bei der Zusammenarbeit zur Einführung des Wissensmanagementsystems. Er hat immer neue Ideen, die zu einer weiteren Verbesserung des Gesamtsystems führen. Außerdem haben wir bei diversen Espressi gute Gespräche geführt, die ich nicht missen möchte.

Meinen anderen Kollegen, Dipl.-Ing. Martin Sterkel und Dipl.-Ing. Thomas Maul, danke ich für die vielen Gespräche und entgegengebrachte Unterstützung. Dipl.-Ing. Markus Becherer danke ich ebenfalls für die Anregungen und Ideen, die er immer wieder mit mir diskutierte.

Frau Silke Boche, die als chemisch-technische Assistentin am Lehrstuhl tätig ist, möchte ich noch namentlich danken, dass ich in ihr eine gute Freundin und Ratgeberin nicht nur bei der Arbeit gefunden habe.

Allen anderen am Lehrstuhl tätigen Studenten, Doktoranden, Werkstatt, wiss. und nicht-wiss. Mitarbeitern etc, die ich hier nicht namentlich erwähne, möchte ich für die Kollegialität, den Humor und gelegentliche Ablenkungsmanöver (z.B. im *Kaptol* oder im *Steinheil* ...) danken.