

Use Case Studie

Kollaboratives Wissensmanagement für Produktionsrezepte

Version 1.1

Dr. Dirk Ortloff, Dr. Jens Popp

19. Dezember 2021



© DO-IT-Service GmbH

<https://www.do-it-service.de/>



© camLine GmbH

<https://www.camline.com/>

Dünnschicht-Fertigungsprozesse für Halbleiter, MEMS etc. nutzen ein breites Spektrum an unterschiedlichen Prozesstechnologien und einen vielfältigen Mix an verwendeten Materialien. Die Details der Fertigungsrezepte stellen einen wichtigen Wissensbestand dar. Anders als in der Mikroelektronik ist der MEMS-Fertigungsprozess in den meisten Fällen applikationsspezifisch und damit ein integraler Bestandteil des Applikationsdesigns. Die hohe Anzahl unterschiedlicher Schrittvarianten, die langen Ketten von Schritten, die für einen kompletten Fertigungsablauf erforderlich sind, das Wissen um die einzelnen Schritte, die Wechselwirkungen zwischen den verwendeten Fertigungsschritten und die Dos und Don'ts der Verkettung sind die geheime Zutat für den Fertigungserfolg und die Wettbewerbsvorteile. Um die richtige Kombination von Prozessschritten, Materialien und Prozessparametern zu finden, sind in der Regel viele teure und zeitaufwändige Experimente notwendig. Die Vielzahl der in der Produktherstellung verwendeten Fertigungsschritte ist aber nur ein sehr kleiner Bruchteil der in einem Unternehmen vorhandenen Rezepte. Die Fülle von Bearbeitungsschritten, die in einem F&E-Institut oder einer Universität nur einmal verwendet werden, erfordert ein noch sorgfältigeres Management.

Diese Anwendungsfallstudie stellt ein Projekt mit einem Forschungsinstitut vor, in dem ein Softwaresystem zum Forschungsdatenmanagement [[forschungsdaten.info](https://www.forschungsdaten.info) 2021] eingesetzt wird. Es unterstützt die MEMS-Bauteil- und Prozessentwickler bei der Verwaltung ihrer Daten, insbesondere ihres detaillierten Rezeptwissens. Sie nutzen das Softwaresystem, um ihre neuen oder geänderten Fertigungsprozesse in einer virtuellen Fertigungsumgebung zusammenzustellen und zu verifizieren. Dadurch wird die Anzahl der realen Experimente auf ein Minimum reduziert.

Wer ist der Kunde?

Der Kunde dieser Anwendungsfallstudie ist ein Institut für angewandte Forschung, das in verschiedenen Technologiebereichen wie Halbleiter und anderen Nanotechnologien aktiv ist. Das Ziel des Institutes ist es, die Lücke zwischen der Grundlagenforschung an Universitäten und der Umsetzung der neuen Technologien in der Industrie zu schließen. Aufgrund der Breite der Forschungsthemen und der angewandten Technologien, ist die Verwaltung und Weitergabe des Wissens über die Herstellungsrezepte ein großes Anliegen. Anfängliche Versuche mit Dokumenten und Tabellenkalkulationsdateien, die auf einem zentralen Server gespeichert sind, waren nicht allzu erfolgreich, da das schnelle Auffinden einer passenden und aktuellen Rezeptur immer noch kompliziert und zeitaufwendig war. Daher wandte sich das Institut an potenzielle Softwareanbieter, um verschiedene Softwarelösungen für das Rezeptur-Wissensmanagement zu evaluieren.

Die Ausgangslage

Die Entwicklung von MEMS-, NEMS- und anderen High-Tech-Bauteilen erfordert die Zusammenstellung bestimmter Kombinationen von Prozessschritten, Materialien und Prozessparametern. Diese Entwicklungsaufgabe kann zeitaufwendig sein, da selbst kleine Änderungen einzelner Prozessparameter einen erheblichen Einfluss auf die dreidimensionale Struktur und die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten haben können. Forscher müssen während der Entwicklung viele komplexe Abhängigkeiten und Randbedingungen zwischen den Prozessschritten berücksichtigen. Das Aufspüren solcher Randbedingungen erfordert in der Regel eine Reihe von kostspieligen und zeitaufwändigen Experimenten. In diesem Zusammenhang findet man immer wieder das Phänomen, dass in vielen Fällen nur die erfolgreichen Rezepte aufbewahrt und dokumentiert werden. Daten, die mit Misserfolgen in Zusammenhang stehen, werden oft verworfen, nicht richtig archiviert und meist „vergessen“. Diese Praxis hat zur Folge, dass nicht das Unternehmen, sondern nur ein einzelner Ingenieur oder eine kleine Gruppe von Ingenieuren Erkenntnisse aus den „fehlgeschlagenen“ Experimenten gewinnen. Dies führt zu einer Wiederholung dieser Fehlversuche, was Zeit, Ressourcen und Geld kostet.

Dieser Problemkomplex lag sehr ausgeprägt auch beim Institut dieses Anwendungsfalles vor. Als Folge wurde die Entwicklung von Prozessabläufen für MEMS und andere Nano-Bauteile und deren Verifikation mindestens genauso kostspielig wie die Entwicklung der eigentlichen Struktur eines Bauteils. In der Organisation dieser Use-Case-Studie stand den Prozessingenieuren für die Durchführung von Prozessentwicklungsaufgaben wenig bis gar keine Unterstützung durch irgendwelche Computer Aided Engineering Mittel (CAE) [Wikipedia 2021a] zur Verfügung. Die Verwaltung von Fertigungsrezeptwissen und die Zusammenstellung von Prozessabläufen in Form von runcards / travelers basierte auf Excel-Sheets oder Dokumenten welche quasi nur durch Kopieren, Einfügen & Änderung wiederverwendet werden konnten.

Nachteile des Wissensmanagementansatzes

Der Wissensmanagement-Ansatz dieser Anwendungsfallstudie ist teilweise immer noch recht verbreitet und hat einige Nachteile. Daher sollen diese hier noch einmal allgemein dargestellt werden.

Einer der Nachteile ist, dass die Entwicklung und die Nachverfolgung der Rezepturänderungen intransparent ist. Daher ist oft nicht klar, ob wirklich die neueste und beste Version einer Rezeptur verwendet wird. Außerdem ist unklar, ob die neueste oder die nächstbeste Referenzversion des Verfahrensschrittrezepts verwendet werden kann. Infolgedessen wird manchmal eine veraltete Version eines Prozessschrittrezepts verwendet, was die Verwendung einer suboptimalen Revision zur Folge hat. Dies erforderte manchmal ein erneutes Erlernen früherer Fehler und führte im Sinne von Lean-Six-Sigma zu Waste und Projektverzögerungen.

Ein weiterer Nachteil dieses Management-Ansatzes ist, dass eine konsistente Abwandlung eines Schrittrezepts innerhalb eines längeren Fertigungsflusses ein fehleranfälliger Prozess ist. Da die Länge komplexer Fertigungsabläufe leicht mehrere hundert Schritte überschreiten kann und derselbe Schritt möglicherweise in mehr als einer Handvoll von Fällen verwendet wird, ist eine manuelle und konsistente Änderung aller Vorkommen oft schwierig und eine Fehlerquelle. Eine solche inkonsistente Änderung kann zu einer Fehlproduktion einer ganzen Charge führen was darin resultiert, dass die Ergebnisse der Charge oder ein ganzer Versuchsplan nicht aussagekräftig ist.

Das informelle Rezeptur-Wissensmanagement bringt auch das Problem mit sich, dass das aus Experimenten gewonnene Wissen meist nur in den Köpfen der Ingenieure und vielleicht in Lessons Learned Berichten existiert. Diese informellen Berichte und die Tatsache, dass es schwierig ist, das gewonnene Wissen zu formalisieren, macht die Teilung der Erkenntnisse sehr zeitaufwendig und wenig umfassend. Das führt, öfters als akzeptabel, dazu, dass weniger erfahrene Ingenieure die gleichen „Fehler“ wiederholen wie ihre Kollegen vor einiger Zeit.

Das Projektziel

Das Hauptziel des Projekts war die Rationalisierung der Wissenserfassung durch die Bereitstellung einer Softwarelösung, die in der Lage ist, formalisiertes Fertigungswissen für die virtuelle Rezeptur- / Ablaufverifizierung zu erfassen und anzuwenden. Außerdem sollte die menschliche Fehlerquote bei der Anpassung von wiederverwendeten Prozessschrittrezepten reduziert werden. Ein weiteres Projektziel war es, das Rad nicht immer neu zu erfinden, indem Fertigungsrezepte leichter zugänglich gemacht werden können und auch die Verwendung veralteter Prozessschritte vermieden oder zumindest transparent gemacht wird.

Quick-Wins und langfristige Ziele

In einem ersten Schritt wurden Listen der am häufigsten verwendeten Prozessschritte und der aktuellsten Fertigungsabläufe seitens des Kunden zusammengestellt. Die dazu vorhandene Dokumentation in Form von Dokumenten und Laufzetteln wurde gesammelt und einer Analyse zugeführt. Bei dieser Analyse wurden dann alle Parameter, die notwendigen Einheiten und Materialien identifiziert.

Parallel dazu wurde eine Instanz des XperiDesk Process Development Execution System (PDES) [Wikipedia 2020b] als on-premise Installation eingerichtet und erste Testnutzer konfiguriert. Das System dient als zentraler Bestandteil der Entwicklungsumgebung und fungiert als umfassende Wissensbasis. In dieser wird das detaillierte Technologiewissen, das für alle Aspekte des physikalischen Entwurfsablaufs erforderlich ist, abgelegt. Um das Fabrikationswissen für die Entwurfsautomatisie-

zung und -verifikation nutzen zu können, ist ein relativ hoher Grad an Formalisierung erforderlich. Dies wird durch eine erweiterbare Parameter- und Einheitenverwaltung erreicht, die sicherstellt, dass alle Parameter im System konsistent gehalten werden und gleichzeitig ein Maximum an Flexibilität erhalten bleibt. Die Einheiten und numerischen Parameter können mit Umrechnungsformeln miteinander verbunden werden, welche die numerischen Parameter auf einen (Satz von) SI Einheiten zurückführt. So kann das System immer numerische Parameterwerte umrechnen und vergleichen, unabhängig von der verwendeten Einheit. Für komplexere oder dynamische Parameter ist die Zuordnung (und integrierte Berechnung) von Berechnungs-Modellen möglich, welche abhängige Parameter aus anderen Parametern berechenbar machen. Die Verwaltung von Prozessschritten und Materialien wird außerdem durch objektorientierte Vererbung stark vereinfacht, um durch die Definition von abstrakten Klassen (z.B. Metalle, Halbleiter) auch eine Vererbung von Eigenschaften zu ermöglichen. Die Fähigkeit der XperiDesk-Umgebung, mit abstrakten Bausteinen wie Prozessschrittclassen umzugehen, ermöglicht eine inkrementelle und kooperative Entwurfsstrategie. In der ersten Entwurfsiteration kann ein Fertigungsprozess nur abstrakte Prozessschritte oder Module wie Abscheidung oder Ätzen enthalten, die den Fertigungsprozess umreißen. Dieser Prinzipprozess kann nun einzelnen Experten zugewiesen werden, die anschließend die abstrakten Teile des Fertigungsprozesses detaillierter ausarbeiten und durch genauer spezifiziertere ersetzen.

Nachdem das Basissystem mit einer bereits vordefinierten Einheitendatenbank zur Verfügung stand und die initiale Sammlung der kundenspezifischen Rezepte, etc. abgeschlossen war, wurde mit der Konfiguration der spezifischen Einheiten, Parameter, Materialien und Prozessschritte entsprechend der Sammlung aus dem ersten Schritt begonnen. Hierbei war zu beobachten, dass die Vererbungshierarchie und die Kopiermöglichkeiten des Systems eine immer schneller werdende Konfiguration neuer Materialien und Schritte ermöglichte. Dadurch konnte die initiale Befüllung der Wissensbasis deutlich vor dem geplanten Ende und innerhalb weniger Tage abgeschlossen werden.

In einem nächsten Schritt wurden die gesammelten Fertigungsabläufe im XperiDesk System konfiguriert. Dazu konnten einfach die notwendigen Schritte/Teilabläufe nach und nach per Drag&Drop aus der Schritt-/Flussdatenbank in einen neuen Fertigungsablauf eingefügt und ggf. die Detailparametrierung einzelner Schritte angepasst werden. Da auch hier eine modulare Strukturierung der Abläufe aus wiederverwendbaren Teilabläufen vom XperiDesk System unterstützt wird, war erneut eine immer schneller werdende Konfiguration möglich. Basierend auf diesen konfigurierten Abläufen konnten nun per Knopfdruck konsistente Laufzettel erzeugt bzw. ein elektronisches Tracking&Tracing im Labor vorgenommen werden.

In der zweiten Phase des Projektes sollte das XperiDesk System bei der virtuellen Verifikation von neu zusammengestellten oder adaptierten Fertigungsabläufen unterstützen. Dafür bietet das System, entsprechend der Darstellung in [Abbildung 1](#), einen in drei Stufen unterteilten Verifikationsprozess an, wobei die ersten beiden Stufen optional sind. Jede weitere Stufe bietet mehr Genauigkeit, ist aber auch zeit- und kostenintensiver.

Die erste Stufe prüft einen Fertigungsablauf auf Herstellbarkeit und Machbarkeit. Sie verwendet eine regelbasierte Konsistenzprüfung mit benutzerdefinierten Konsistenzregeln, die einzelnen Prozessschritten zugeordnet werden können. Hiermit können beispielsweise Ausschlusskriterien wie, nach diesem Schritt darf die Verarbeitungstemperatur nicht höher als X sein, es sei denn das Material Y wurde vollständig entfernt, definiert werden. Dies erfordert auch eine kontextbasierte Rezeptauflösung, wenn sich der Materialkontext ändert oder entfernt wird. Somit kann gelerntes, abstraktes

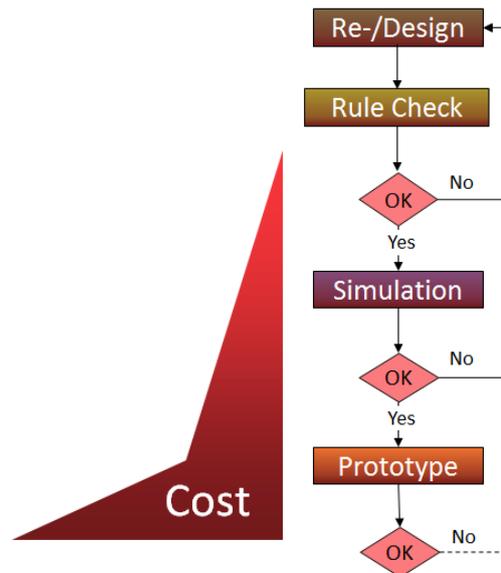


Abbildung 1: Verifikationsprozess mit drei Schritten und den entsprechenden Kosten

Prozesswissen in maschinenverarbeitbares Wissen überführt werden, welches dann von allen Ingenieuren gemeinsam genutzt werden kann.

Die zweite Verifizierungsstufe validiert die Ergebnisse des Prozesses mit kommerziellen Technology Computer Aided Design (TCAD)-Tools [Wikipedia 2020c]. Die Simulationsschnittstelle der Umgebung generiert dabei automatisch Simulationseingabedateien, indem sie für jeden Schritt ein Simulationsmodell aus der Wissensbasis mit den aktuellen Parametern aus den Prozessschritten parametrisiert. Die Modelle definieren dabei ein Eingabe-Snipplet mit Platzhaltern für die aktuellen Prozessschrittparameter für einen bestimmten Simulator. Die durch die Modelle ermöglichte Abstraktion entkoppelt effizient das Simulationswissen vom Technologiewissen und bietet damit eine komfortable Möglichkeit, virtuelle Experimente zur Verifikation und Optimierung für Technologieexperten ohne Simulationskenntnisse zu ermöglichen. Der gleiche Mechanismus kann beispielsweise auch dazu genutzt werden, eine Kostenberechnung eines Fertigungsablaufs durchzuführen. Hierbei sind die Kosten mit weitesten Sinne zu verstehen, also auch beispielsweise der CO₂ Ausstoß.

Die dritte und letzte Verifizierungsstufe einer ersten Entwicklungsiteration ist ein Prototyp, der im Labor oder in der Fertigungslinie getestet wird. Die Umgebung unterstützt diese Phase mit einem Modul zur Verfolgung von Experimenten im Sinne von ELB- [Wikipedia 2021b], LIMS- [Wikipedia 2021c] oder MES-Systemen [Wikipedia 2020a], das eine feinkörnige Steuerung dieser Verifizierungsphase ermöglicht. Der gesamte Verifikationsablauf unterstützt verschiedene Entwicklungsschleifen, von anfänglichen Prototypenschleifen über Qualifikationsläufe bis hin zu Stabilisierungsschleifen. Die Stabilisierungsphase dient dazu, die Ausbeute der Massenproduktion zu überwachen und die endgültige Schlussfolgerung für das Experiment mit dem verwendeten Goldenen Rezept zu erstellen. Diese Datensätze können in XperiDesk als Referenz für zukünftige Experimente gespeichert werden.

In diesem Kundenprojekt sollte in der zweiten Phase zunächst nur die regelbasierte Konsistenzprüfung angewendet und anschließend direkt die Prototypenfertigung durchgeführt werden. Für die Konsistenzprüfung wurden die Prozessschritte in der XperiDesk-Wissensbasis zunächst mit generischen Regeln versehen (z.B. jeder Abscheideprozess benötigt direkt vor sich einen Reinigungs-

schritt). Anschließend wurde durch Interviews mit den Experten der einzelnen Prozessschritte spezifisches Wissen bzgl. Abhängigkeiten und Vermeidungsszenarien (nicht funktionierende Schritt / Parameter- Kombinationen) ermittelt. Diese wurden dann in Regelsätzen formuliert und an die entsprechenden Prozessschritte (Klassen) angehängt. Auch hier zeigte sich die Mächtigkeit der Vererbung, da Regeln wie die „Reinigung-vor-Abscheidung“ nur einmalig in der Klasse „Abscheidung“ hinterlegt werden müssen und damit alle Schritte unterhalb abgesichert sind (aber zusätzlich spezifischere Regeln in tieferen Ebenen eingefügt werden können). Da die Prozessingenieure diese Regeln entsprechend den neu gemachten Erfahrungen im System selbst hinterlegen können, lernte das XperiDesk-System quasi nach und nach immer mehr Fertigungswissen dazu.

Durch das Basissetup enthielt das XperiDesk System eine repräsentativen Menge an kundenspezifischem Fertigungswissen. Um die Produktivsetzung einzuleiten und zu unterstützen, wurde ein Projekt für Veränderungsmanagement und Organisationsentwicklung ins Leben gerufen. Dabei wurden die Benutzer intensiv geschult, um das Buy-in zu schaffen und den Mehrwert der neuen Strukturen und der neu gewonnen Übersicht zu etablieren. Das wesentliche Ziel bestand darin sicherzustellen, dass das Leben der Forscher, trotz der notwendigen Änderungen in der Arbeitsmethodik, langfristig effizienter und effektiver wird. Zusätzlich sollten mentale Hürden durch erste Quick-Wins und den bereits im System existierenden Block an Fertigungswissen beseitigt werden. Regelmäßige Frage-Antwort-Runden, die Überwachung der Nutzung für eine nachhaltige Umstellung der Arbeitsumgebung auf das neue Tool, die Unterstützung des Auftraggebers beim Betrieb der Plattform und eine ständige Nachqualifizierung der (neuen) Mitarbeiter rundeten die Einführung ab. Diese Maßnahmen waren ein wesentlicher Bestandteil dieser effektiven Digitalisierungsmaßnahme in der Forschung und Entwicklung des Use-Case Partners.

Mehrwert für die Mitarbeiter*innen

Der Mehrwert für die Mitarbeiter*innen ergab sich aus vielfältigen Vereinfachungen im Arbeitsalltag. Die wichtigsten Verbesserungen waren:

- Der Zugang zu Informationen und Fertigungswissen der Kollegen*innen, etwa 30 Ingenieur*innen, wurde stark vereinfacht und erheblich beschleunigt, speziell in den Fällen, in denen Kollegen*innen nicht zeitnah verfügbar sind.
- Die Generierung aktueller und die Wiederverwendung historischer Laufzettel wurde erheblich vereinfacht. Da alle Abläufe in der Software einfach aufzufinden, zu kopieren und modifizieren sind, kann mit der Prototypenfertigung deutlich schneller begonnen werden.
- Neuartige Sequenzen von Prozessschritten können einfach und automatisiert auf ihre Herstellbarkeit überprüft werden.
- Das im XperiDesk integrierte Versionsmanagement für alle Entitäten verhindert ungewollte Seiteneffekte durch Änderungen (kein automatisches Feed-forward) und erlaubt die einfache Detektion der Nutzung von veralteten Versionen. Damit ermöglicht es die volle Transparenz bzgl. der Historie.

Mehrwert für das Institut

Neben dem Mehrwert für die Mitarbeiter*innen ergaben sich große Mehrwerte für das einführende Institut. Hier ist die Liste der substantiellsten Verbesserungen:

- Eine 25%ige Steigerung der Effektivität und Effizienz von Forschungs- & Entwicklungsprojekten. Mehrere Verbesserungen führten gemeinsam zu diesen Effizienzgewinnen. Der überwiegende Teil ergab sich aus der Vermeidung von längeren Suchen nach der aktuellsten Version der Fertigungsrezepte. Vor der Nutzung des XperiDesk System wurden hier sehr oft die Ansprechpartner für die einzelnen Schritte kontaktiert, um sich entsprechend rückzuversichern. Das Warten auf eine Antwort führte häufig zu entsprechenden Verzögerungen. Diese konnten mit der Einführung von XperiDesk weitestgehend eliminiert werden.
- Durch die Einführung des umfassenden Datenmanagements des XperiDesk Systems und der neuen Arbeitsabläufe wurden ebenfalls die infrastrukturellen Lücken im Bereich des Forschungsdatenmanagements [[forschungsdaten.info 2021](#)] und der Umsetzung der FAIR-Prinzipien [[Initiative 2021](#)] geschlossen.
- Eine deutliche Reduktion von Maschinenausfällen, da Inkonsistenzen in Fertigungsabläufen und damit teilweise einhergehende Kontaminationen der Maschinen / Kammern durch die Regelprüfung vermieden werden können.
- Erheblich reduzierter Wissensverlust bei Fluktuation von Mitarbeiter*innen.
- Die Versionierung der Entitäten erlaubt die automatische Erstellung eines Audit-Trails, so dass die Erfüllung der Dokumentationsanforderungen nach FDA CFR21.11 [[FDA 2019](#)] unterstützt wird.

Zusammenfassung

Die von XperiDesk unterstützte Prozessmodularisierung ermöglicht eine effiziente Wiederverwendung von Prozessschrittwissen. Der Prozessingenieur kann Prozessschritte und Prozessmodule direkt aus der Wissensbasis verwenden und zu neuen Fertigungsabläufen zusammenfügen. Die Prozessparameter können individuell an die spezifischen Anforderungen des Fertigungsprozesses angepasst werden. Mögliche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten und Modulen werden durch spezielle Kompatibilitätsregeln behandelt, die auch bei der beschriebenen Konsistenzprüfung verwendet werden. Die Fähigkeit der XperiDesk-Umgebung, mit abstrakten Bausteinen wie Prozessschrittclassen umzugehen, ermöglicht eine inkrementelle und kooperative Entwurfsstrategie. Das Vererbungsmodell stellt sicher, dass Konsistenzprüfung und Prozesssimulation auf allen Abstraktionsebenen verfügbar sind. Es wurde nachgewiesen, dass ein strukturiertes Wissensmanagement mit CAE / PDES die Forschungseffizienz deutlich verbessern kann. Durch die Fokussierung der Ingenieure auf kreative und nicht auf administrative Aufgaben kann auch eine Steigerung der Arbeitszufriedenheit beobachtet werden.

Literatur

FDA (19. Sep. 2019): *Code of Federal Regulations Title 21*. In: url: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=11> (siehe S. 7).

forschungsdaten.info (1. Nov. 2021): *Forschung und Daten managen*. In: url: <https://www.forschungsdaten.info> (siehe S. 1, 7).

Initiative, GO FAIR (1. Nov. 2021): *FAIR Principles*. In: url: <https://www.go-fair.org/fair-principles/> (siehe S. 7).

Wikipedia (26. Juni 2020a): *Manufacturing execution system*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Manufacturing_execution_system (siehe S. 5).

Wikipedia (26. Juni 2020b): *Process Development Execution System*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Process_development_execution_system (siehe S. 3).

Wikipedia (26. Juni 2020c): *Technology CAD*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_CAD (siehe S. 5).

Wikipedia (26. Mai 2021a): *Computer Aided Engineering*. In: url: https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_engineering (siehe S. 2).

Wikipedia (9. Nov. 2021b): *Elektronisches Laborbuch*. In: url: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektronisches_Laborbuch (siehe S. 5).

Wikipedia (9. Nov. 2021c): *Labor-Informations- und Management-System*. In: url: https://de.wikipedia.org/wiki/Labor-Informations-_und_Management-System (siehe S. 5).