

Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme

Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg



in Kooperation mit



Forum Industrie 4.0

Editorial



Hartmut Rauen

Innovationen, Lösungskompetenz und Spitzenqualität sind zentrale Merkmale unserer Branche. Und auch Industrie 4.0 steht genau hierfür. Die Schlüsselbegriffe sind Digitalisierung und Vernetzung. Informations- und Internettechnologien werden Schritt für Schritt in die Produkte und Prozesse der Unternehmen integriert.

Dem deutschen Maschinen- und Anlagenbau kommt als Anbieter und Anwender von Industrie 4.0 eine Schlüsselrolle zu. Er integriert neueste Technik in Produkte und Prozesse. Zugleich ist er Datenquelle für Industrie 4.0: Er erfasst die Daten, interpretiert sie, innoviert damit und entwickelt neue Geschäftsmodelle. Dabei ist Industrie 4.0 nicht nur ein Thema der größeren Unternehmen, sondern muss auch für den Mittelstand wirtschaftlich und nutzbringend umsetzbar sein.



Dr. Christian Mosch

Um im Zeitalter der Digitalisierung auch in Zukunft erfolgreich sein zu können, gilt es in digitalen Wertschöpfungsketten zu agieren. Es geht darum, Informationen in einem Digitalen Zwilling von Komponenten, Maschinen und Anlagen durchgängig zur Verfügung zu stellen. Nur so können Simulationen aus dem Engineering, Live-Daten aus der Produktion und Optimierungsanalysen kombiniert werden. Diese Möglichkeit ist auch die Grundvoraussetzung dafür, Maschinen und Anlagen bei Anwendern virtuell in Betrieb zu nehmen. Somit können sie vorab abgesichert werden. Das spart Zeit in der tatsächlichen Inbetriebnahme, reduziert Aufwände und damit auch Kosten.



Etienne Axmann

Vor diesem Hintergrund versteht sich der vorliegende Leitfaden „Virtuelle Inbetriebnahme – Leitfaden zur wirtschaftlichen Einführung“ als praxisorientiertes Werkzeug. Es werden Maßnahmen aufgezeigt, um die Virtuelle Inbetriebnahme im eigenen Unternehmen wirtschaftlich einzuführen. Hiervon profitieren auch die Lieferanten und Kunden. Anforderungen können klarer beschrieben und erfüllt werden. Auf die Kosten und Nutzen wird ein besonderes Augenmerk gelegt. Letztlich geht es darum, mit der Virtuellen Inbetriebnahme wirtschaftlichen Mehrwert zu schaffen. Der VDMA realisiert mit diesem Leitfaden einen Umsetzungsbaustein für die Praxis. Er liefert einen weiteren Baustein zur Umsetzung von Industrie 4.0 und dem Digitalen Zwilling.

Unser ausdrücklicher Dank gebührt Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl und Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel vom Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart sowie Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse vom Institut für Forschung und Transfer e.V. für die wissenschaftliche Aufbereitung des Leitfadens. Zudem gilt es, den beteiligten VDMA-Mitgliedern für ihr Engagement im projektbegleitenden Arbeitskreis zu danken.

Wir wünschen Ihnen eine spannende und inspirierende Lektüre.

Hartmut Rauen

Stellvertretender
VDMA-Hauptgeschäftsführer

Dr. Christian Mosch

VDMA-Forum Industrie 4.0

Etienne Axmann

VDMA Robotik + Automation

Inhaltsverzeichnis

- 01 Editorial**
- 02 Inhalt**
- 03 Vorwort**
- 04 Management Summary**
- 05 Einleitung und Grundprinzipien der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN)**
 - 05** Adressaten dieses Leitfadens
 - 05** Grundlegende Motivation für VIBN
 - 05** Definition der VIBN
 - 06** Beteiligte entlang der Zulieferkette im Maschinen- und Anlagenbau
 - 07** Der VIBN-Prozess
- 09 Zielbild der integrierten VIBN**
 - 09** Integration der VIBN in den Lebenszyklus
 - 09** Kopplung von VIBN und dem übrigen Engineering als Pull-Push-Gefüge
 - 10** Aufbau und Nutzung des virtuellen Testaufbaus
 - 12** VIBN als Ausgangspunkt für den Digitalen Zwilling
 - 13** Fazit
- 14 Kosten und Nutzen der VIBN**
 - 14** Qualitative Nutzen der VIBN
 - 14** Nutzen der VIBN für den Betreiber
 - 16** Nutzen der VIBN für den Systemlieferanten
 - 18** Nutzen der VIBN für den Komponentenlieferanten
 - 19** Quantitative Kosten-Nutzen-Abschätzung
 - 20** Kostenanalyse
 - 22** Nutzenpotenzialabschätzung
 - 23** Ergebnisauswertung
 - 23** Kapazitätsanpassung
- 24 VIBN erfolgreich im Unternehmen einführen**
 - 25** Pilotphase –
 - 25** Kurzfristige Planung und Einführung
 - 25** Strategische Ziele festlegen
 - 25** Projektteam zusammenstellen
 - 26** Auswahlkriterien für das Simulationswerkzeug definieren
 - 26** Betrachtung von technischen Schnittstellen und Austauschformate der Simulationswerkzeuge
 - 27** Vorauswahl Simulationswerkzeug treffen
 - 27** Pilotprojekte durchführen
 - 29** Entscheidung zum Simulationswerkzeug treffen
 - 29** VIBN-Begleitdokument erstellen
 - 30** Produktivphase – mittel- und langfristige Planung und Etablierung
 - 31** VIBN im Engineering verankern
 - 31** VIBN effizienter gestalten
- 34 Ausblick**
- 37 Checkliste für die Einführung von VIBN im eigenen Unternehmen**
- 38 Quellenverzeichnis**
- 39 Impressum**

Vorwort



Prof. Oliver Riedel



Prof. Alexander Verl



Prof. Jochen Deuse



Dr. Ralph Richter

Für den Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland ergibt sich durch die konsequente Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses eine Vielzahl an neuen Wertschöpfungspotenzialen. Bisherige Entwicklungen haben spannende Einzellösungen hervorgebracht, es fehlt jedoch an einer strukturierten Umsetzung entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses. Zu den einzelnen Entwicklungen zählen Fortschritte in den Bereichen Virtualisierung und Cloud-Technologien, AR/VR, Künstliche Intelligenz und Machine Learning sowie in besonderem Maße die Bereiche Simulation und Datenmodellierung. Bei der Betrachtung eines vollständig digitalisierten Lebenszyklus von Produkt und Produktion spricht man vom Digitalen Zwilling. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau hat die Möglichkeit, auf dem Weg zu ganzheitlichen Digitalisierungslösungen eine Vorreiterrolle einzunehmen. Der Produktentstehungsprozess und insbesondere die Produktion werden durch die konsequente Digitalisierung transparenter, intelligenter und flexibler – genau passend, um auf die Herausforderungen eines globalen und hoch individualisierten Marktes zu reagieren.

Eine Simulationsmethode, die bereits heute im Produktentstehungsprozess eine maßgebliche Rolle spielt, ist die Virtuelle Inbetriebnahme. Aus digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen ist in den vergangenen 15 Jahren eine Technologie entstanden, die eine Absicherung von Komponenten, Maschinen und Anlagen in einer virtuellen Umgebung ermöglicht, bevor diese real in Betrieb genommen werden. Bei deren Einsatz werden erwiesenermaßen Vorteile für die Qualität von Automatisierungssoft-

ware und das gesamte Produktionssystem erreicht. Zudem werden Verbesserungen der Entwicklungsprozesse, bspw. bei der Kommunikation der Disziplinen und dem Zeitmanagement, erreicht.

Für immer mehr Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau nimmt die Virtuelle Inbetriebnahme eine signifikante Rolle ein. Die konsequente Weiterentwicklung der Virtuellen Inbetriebnahme in einem Schulterschluss aus Forschungslandschaft, Herstellern von Simulationssoftware und dem Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland ist dabei eine spannende Erfolgsgeschichte für sich. Heute können mit der steigenden Anzahl an Unternehmen, die auf die Virtuelle Inbetriebnahme setzen, neue Potenziale entlang von Zulieferketten erschlossen und die ganzheitliche, wertschöpfungskettenübergreifende Digitalisierung vorangetrieben werden.

Mit dem vorliegenden Leitfaden ist erstmals ein praxisbezogenes Dokument entstanden, das aus der Sicht des Anwenders den erfolgreichen operativen und nachhaltig wirtschaftlichen Einstieg in die Virtuelle Inbetriebnahme unterstützt. Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre und einen erfolgreichen Start bei den eigenen (ersten) Schritten hin zu einer effizienten und gewinnbringenden Virtuellen Inbetriebnahme.

**Prof. Oliver
Riedel**
ISW

**Prof. Alexander
Verl**
ISW

**Prof. Jochen
Deuse**
RIF

**Dr. Ralph
Richter**
RIF

Management Summary

Die Virtuelle Inbetriebnahme gewinnt als umsetzungsnaher Teil der Digitalisierung im Maschinen- und Anlagenbau über alle Branchenwege hinweg an Bedeutung. Dieser Leitfaden ermöglicht mit einer Kosten-Nutzen-Betrachtung und einer methodischen Handlungsanweisung einen effizienten Einstieg.

Die Virtuelle Inbetriebnahme ist ein prädestinierter Anwendungsfall, um in durchgängigen digitalen Prozessketten zu denken. Damit ist sie auch ein Anwendungsbeispiel für den Digitalen Zwilling. Der Digitale Zwilling ist das Herzstück der Industrie 4.0. Als digitales Abbild von Maschinen, Komponenten und Produkten kombiniert er Simulationen aus dem Engineering, Live-Daten aus der Produktion und Optimierungsanalysen. Die Ergebnisse sind neue Erkenntnisse über Produkte und Prozesse, gewonnen auf effizientem und intelligentem Wege. Schnell wird klar, welche Möglichkeiten und Potentiale sich damit für die Unternehmen verbinden lassen – und das über den gesamten Produktions- und Produktzyklus hinweg.

Die Realisierung der Virtuellen Inbetriebnahme hat enormes Potenzial für den Maschinen- und Anlagenbau und deren Kunden. Bei Bestandsanlagen bietet das frühzeitige Durchspielen unterschiedlicher Szenarien Einsparpotenziale. Die Absicherung von Anlagenkonfigurationen führt zur gesteigerten Prozessqualität und der Erhöhung der Anlageneffizienz in der eigenen Produktion. Die Reduktion des Time-to-Market neuer Produkte und neue datenbasierte Geschäftsmodelle der Maschinenlieferanten sind nur einige wenige mögliche Mehrwerte.

Handlungsanweisungen für den Lieferanten und Kunden

Die Vielzahl an Daten und Informationen in den Unternehmen eignen sich schon heute für die Realisierung der Virtuellen Inbetriebnahme für die eigenen Komponenten, Maschinen oder Anlagen. In der initialen Betrachtung stehen die Kosten und Nutzen im Fokus. In diesem Leitfaden wird hierauf besonderen Wert gelegt. Auf Grundlage des neu entwickelten Kosten-Nutzen-Schemas kann in einer einfachen tabellarischen Form der Return-of-Investment ermittelt werden.

Eingerahmt wird die Kosten-Nutzen-Betrachtung durch technische Erläuterungen und einer methodischen Einführungsstrategie. Es wird deutlich, dass ohne digitale Prozessketten Engineering-Daten im späteren Verlauf verloren gehen. Sie gelangen mit Ihren Erkenntnissen nicht bis in die Produktion. Ziel muss es also sein, die Virtuelle Inbetriebnahme in den gesamten Lebenszyklus zu integrieren. Der erste Schritt ist meist der Schwierigste. Die im Zuge dieses Leitfadens entwickelte Herangehensweise hilft, diese Einstiegshürde zu senken.

Durch die konsequente Umsetzung der Virtuellen Inbetriebnahme kann die Qualität der Software und des gesamten Produktionssystems verbessert werden. Eine langwierige physische Inbetriebnahme und stressige Einsätze am Bestimmungsort können vermieden werden. Eine Checkliste gibt Anreize für die eigene Umsetzung und vereinfacht die Beschreibung der Anforderungen an das eigene Unternehmen.

Einleitung und Grundprinzipien der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN)

Adressaten dieses Leitfadens

Dieser Leitfaden adressiert alle Beteiligten entlang von Zulieferketten im Maschinen- und Anlagenbau und richtet sich an das Management und die Entscheider im jeweiligen Unternehmen und Fachbereich. Der Leitfaden ist als Anwendungshilfe zu bestehenden Richtlinien und Standards zu sehen.

Themen des Leitfadens sind:

- Die Grundprinzipien der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) und das Konzept der integrierten VIBN.
- Die Kosten- und Nutzenpotenziale der VIBN.
- Die erfolgreiche Einführung und zielgerichtete Umsetzung der VIBN im Unternehmen.

Grundlegende Motivation für VIBN

Die Entstehung und Nutzung eines Produktionssystems¹ durchläuft mehrere Phasen des Lebenszyklus, in denen es zu Fehlern und somit Kosten kommen kann. Nach der „Rule of Ten“ (dt. Zehnerregel) der Fehlerkosten [1] erhöhen sich die Kosten zur Behebung eines Fehlers um den Faktor „10“, für jede Phase des Lebenszyklus in der der Fehler fortbesteht. Die frühe Fehlererkennung und -behebung, möglichst noch im Engineering², senkt die Kosten eines Produktionssystems daher erheblich. Die Durchlaufzeit und die Qualität eines Produktionssystems werden positiv beeinflusst. Die frühe Fehlererkennung ist besonders für die Software von Produktionssystemen relevant, da deren Anteil stetig durch die zunehmende Komplexität mechatronischer Produkte steigt [2]. Die VIBN ermöglicht eine frühzeitige Fehlererkennung und spart somit Kosten und Zeit bei der Herstellung und Nutzung von Produktionssystemen.

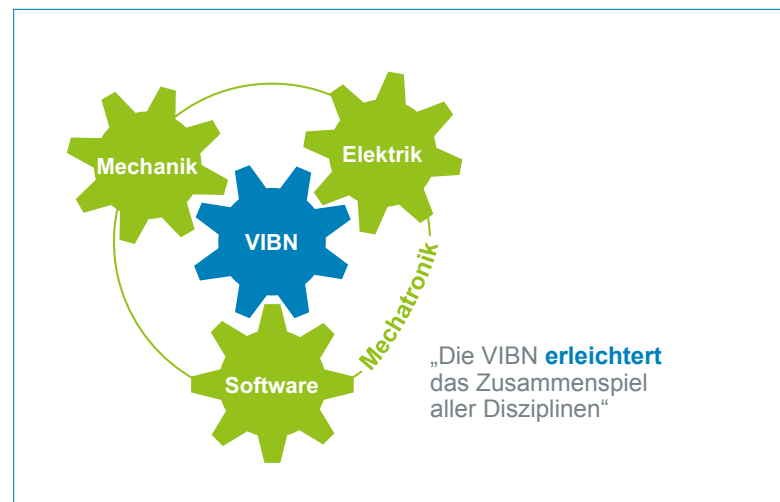


Abbildung 1: Die VIBN erleichtert, unter Bereitstellung eines mechatronischen Simulationsmodells, die Zusammenarbeit der Beteiligten im Engineering

Definition der VIBN

Die VIBN ist eine Simulationsmethode, bei der das Steuerungssystem mit einem Simulationsmodell der Komponente, Maschine oder Anlage verbunden wird [3], um frühe, entwicklungsbegleitende Tests des Produktionssystems zu ermöglichen. Durch die Nutzung von Simulationsmodellen für die VIBN können Sachverhalte aus einzelnen Disziplinen des Engineerings, sowie explizit deren Zusammenspiel im mechatronischen³ Kontext, veranschaulicht werden (siehe Abbildung 1).

Sinnbildlich ermöglicht die VIBN ein Umschalten des realen Betriebs eines Produktionssystems in den virtuellen Betrieb (siehe Abbildung 2). Der Zusammenschluss aus Steuerungssystem und simuliertem Produktionssystem wird als virtueller Testaufbau bezeichnet. Dieser ermöglicht z. B. eine virtuell abgebildete Anlage ein-

¹ Im Kontext des Leitfadens ist ein Produktionssystem eine Komponente, Maschine oder Anlage

² Die Entwicklung und/oder Konstruktion werden im Rahmen des Leitfadens zusammengefasst als Engineering bezeichnet.

³ Zu den mechatronischen Disziplinen zählen alle für das Unternehmen relevanten Tätigkeiten aus den Bereichen Mechanik, Elektrik und Elektronik, Fluidik und Pneumatik, Informatik und Software. Im weiteren Verlauf des Leitfadens wird vereinfachend der Sammelbegriff „Mechatronik“ verwendet.

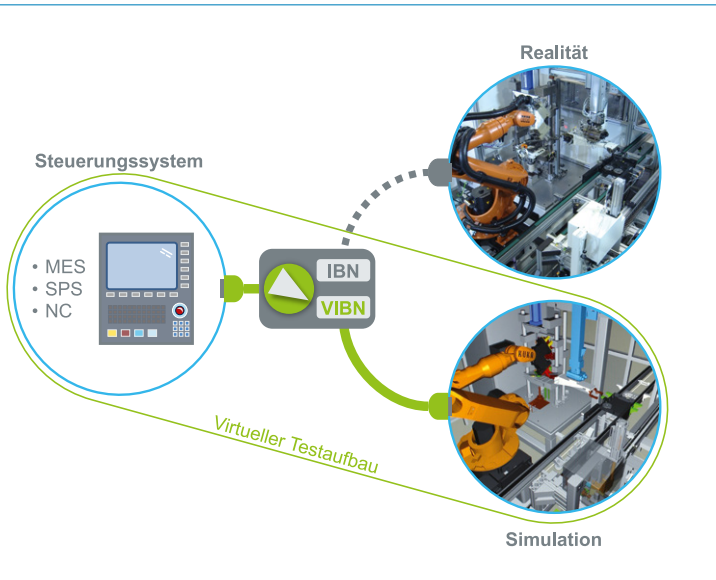


Abbildung 2: Sinnbild der VIBN: Umschalten zwischen Realität und Simulation [4]

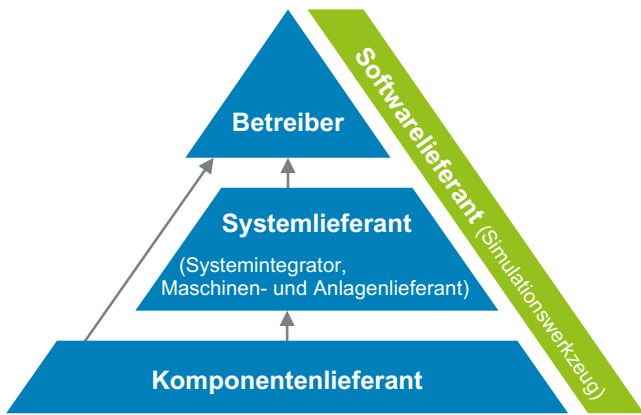


Abbildung 3: Die Zulieferkette im Maschinen- und Anlagenbau im Kontext der VIBN

zusetzen, um frühzeitig zu experimentieren, zu testen und zu erproben, solange sich die reale Anlage noch im Aufbau befindet. Nach Aufbau der realen Anlage kann das Steuerungssystem idealerweise ohne weitere Änderung an der realen Anlage betrieben werden und erzeugt dasselbe Verhalten. Die virtuelle Anlage wird weiterhin im Rahmen von Tests verwendet, um eine Belegung der realen Anlage zu vermeiden oder deren Beschädigung auszuschließen.

Bei der Einführung und Nutzung von VIBN ist die gesamte Zulieferkette des Unternehmens zu betrachten und nicht nur die eigenen internen Prozesse und Strukturen (siehe Abbildung 3).

Im folgenden Abschnitt werden die Beteiligten entlang der Zulieferkette genauer betrachtet.

Beteiligte entlang der Zulieferkette im Maschinen- und Anlagenbau

Der **Betreiber** eines Produktionssystems steht an der Spitze der Zulieferkette und beauftragt einen Systemlieferanten ein automatisiertes Produktionssystem (für z. B. Montage, Fertigung oder Logistik) zu liefern (Serienmaschinenbau) oder ggfs. zu entwickeln (Sondermaschinenbau). Ein Beispiel für einen Betreiber ist ein OEM⁴ (bspw. ein Automobilbauer), der auf diesen Maschinen oder Anlagen Produkte für einen Kundenmarkt herstellt.

Als **Systemlieferant** wird die Gruppe aus Systemintegrator, Maschinen- und Anlagelieferant verstanden. Die Kompetenzen des Systemintegrators liegen in der Zusammenführung und Integration eigener oder zugekaufter Teillösungen und Komponenten zu einem automatisierten Produktionssystem. Komponenten-, Maschinen- und Anlagelieferanten liefern ihre Teillösungen direkt an den Betreiber aus. In einem solchen Fall übernimmt der Betreiber die Aufgabe der Integration.

Der **Komponentenlieferant** stellt die benötigten Teillösungen auf Produktbasis (Serienmaschinenbau) oder Projektbasis (Sondermaschinenbau) bereit. Die Komplexität einer Komponente variiert, beispielsweise von einem Drucksensor bis hin zu einem mehrachsigen Roboter.

Der **Softwareanbieter** stellt im Kontext der Zulieferkette das Simulationswerkzeug (oft auch: Simulationssoftware) zur Modellierung und Simulation von Komponenten, Maschinen und Anlagen bereit und steht mit der gesamten Zulieferkette in Beziehung.

4 OEM – Original Equipment Manufacturer

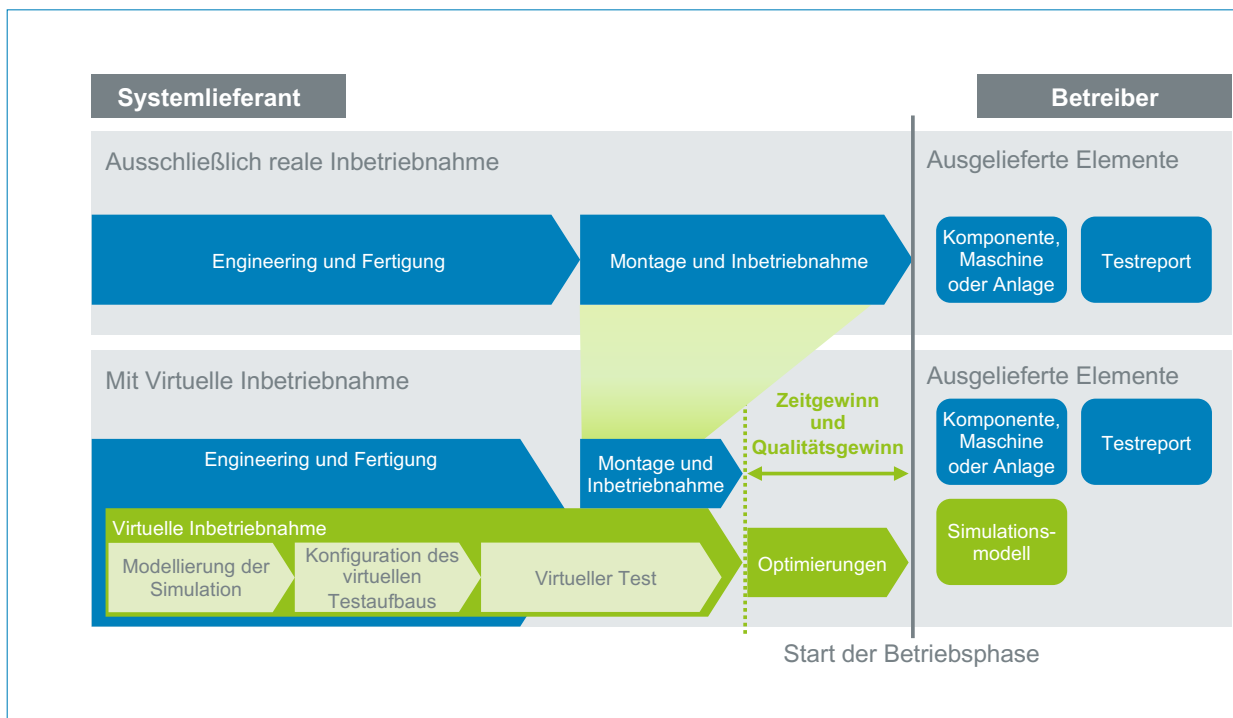


Abbildung 4: Gegenüberstellung des Lebenszyklus ohne und mit VIBN für den Maschinen- und Anlagenbau

Zur Nutzung von VIBN entlang der Zulieferkette, benötigt es einen individuellen VIBN-Prozess im Engineering. Diese VIBN-Prozesse sind später eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Zusammenarbeit der unterschiedlichen Partner bei der VIBN.

Der VIBN-Prozess

Der VIBN-Prozess wird in Abbildung 4 dem konventionellen Engineering gegenübergestellt, wobei die Einflüsse im Lebenszyklus durch die VIBN in Grün dargestellt sind.

Der VIBN-Prozess teilt sich hierbei in vier Phasen:

- Modellierung der Komponente, Maschine oder Anlage für die Simulation
- Konfiguration des virtuellen Testaufbaus
- Ausführung der virtuellen Tests
- Nutzung der verbleibenden Zeit bis zur Auslieferung für Optimierungen

Ein **Systemlieferant** agiert vor dem „Start der Betriebsphase“. Er zieht den Nutzen der VIBN daraus, dass der virtuelle Testaufbau seiner Komponente, Maschine oder Anlage früher als der reale Aufbau zur Verfügung steht. Somit kann er parallel zu Engineering und Fertigung

mit dem Testen beginnen. Die frühen Tests am virtuellen Testaufbau verkürzen die Zeit für die reale Inbetriebnahme (IBN) und entschärfen den kritischen Pfad im Engineering durch ein Simultaneous Engineering⁵. Durch den früheren Beginn der Tests ist ein ausführlicheres und intensiveres Testen möglich, was sich positiv auf die Qualität des zu liefernden Produktionssystems auswirkt. Sobald die Komponente, Maschine oder Anlage am virtuellen Testaufbau abgenommen ist, steht die verbleibende Zeit dem Lieferanten für Optimierungen zur Verfügung. Dies geschieht meist parallel zum Transport, Aufbau und der IBN am Einsatzort. So kann der **Betreiber** nicht nur zeitgerecht, aufgrund verkürzter IBN-Zeit, sondern bereits bedarfsoptimiert in die Betriebsphase übergehen. Beispielsweise können Durchlaufzeiten oder Energieverbräuche virtuell optimiert werden.

⁵ Definition aus VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 Digitale Fabrik – Grundlagen, 2008: „Eine Form der Ablauforganisation im Rahmen der Produktionsvorbereitung, bei der die verschiedenen Aufgaben wie Produktkonstruktion, Fertigungsplanung und Fabrikplanung nicht mehr sequenziell, sondern zeitlich parallel erfolgen.“

Der Einsatzzweck und der Mehrwert von VIBN können veranschaulicht werden, indem die Tätigkeiten und das Tätigkeitsumfeld mit dem der realen IBN verglichen werden (siehe Abbildung 5). Die VIBN ersetzt die reale IBN nicht vollständig. Sie verkürzt diese durch das Vorziehen zahlreicher Testaktivitäten. Zusätzlich ermöglicht der virtuelle Test die Betrachtung von Störsituationen, die in der Realität nur schwer nachgestellt werden können oder mit dem Risiko von schweren Schäden verbunden sind.

Den Vorteilen in der virtuellen Testphase des Engineerings stehen Mehraufwände bei der erstmaligen Einführung und kontinuierlichen Bereitstellung der VIBN gegenüber. Zu den Mehraufwänden gehören:

- einmalige Kosten wie Hardware und Software für VIBN,
- laufende Kosten wie Software-Lizenzen, Personal und
- Zeitaufwände für die Modellierung der Simulation und der Konfiguration des virtuellen Testaufbaus.



Virtuelle Inbetriebnahme

Reale Inbetriebnahme

- ✓ Systemtest
- ✓ Abnahmetest
- ✓ Softwaretest
- ✓ Test des Gutfalls

- ✓ Systemtest
- ✓ Abnahmetest
- ✓ Softwaretest
- ✓ Test des Gutfalls

- ✓ Test des Schlechtfalls
- ✓ Test von Störsituationen
- ✓ Gefundene Fehler aus dem Engineering können einfach in Software, Mechanik, Elektrik behoben werden
- ✓ Früheres und häufigeres Testen bereits während der Entwicklung
- ✓ Einfache Datenaufzeichnung
- ✓ Besserer Einblick in die Wirkzusammenhänge
- ✓ Ruhige Arbeitsumgebung
- ✓ Ergonomisches Arbeiten
- ✓ Keine Anreise notwendig

- ✓ Test der Verkabelung
- ✓ Test der E/A-Belegung
- ✓ Gefundene Fehler aus dem Engineering können nur in der Software einfach behoben werden
- ✓ Test und Auslegung einzelner Prozesse

Abbildung 5: Tabellarische Gegenüberstellung von VIBN und realer IBN; grau: mittels VIBN und IBN möglich, grün: nur bei VIBN möglich, blau: nur bei IBN möglich

Zielbild der integrierten VIBN

Integration der VIBN in den Lebenszyklus

Für eine erfolgreiche VIBN sollte diese frühzeitig und durchgängig in das eigene Engineering integriert werden (Abbildung 6). Bei kundenspezifischen Entwicklungen im **Sondermaschinenbau** ermöglicht ein Simulationsmodell als technisches Kommunikationsmittel, eine enge Kopplung zwischen dem Lieferanten und dem Betreiber. Beide Beteiligten können ihren Vorstellungen iterativ am Modell abgleichen. Im **Serienmaschinenbau** ist der Einsatz der Simulationsmodelle bereits in der Angebotsphase von Nutzen, um dem Betreiber eine realistische Darstellung des angebotenen Produkts am bewegten 3D-Modell vorführen zu können. Sowohl für den Sonder- als auch für den Serienmaschinenbau, kann ein sequenzielles Engineering mittels VIBN aufgehoben werden. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Disziplinen werden durch eine frühzeitige Zusammenführung der Teilergebnisse am Simulationsmodell sichtbar. Interdisziplinäre Teams, die sich anhand des Simulationsmodells verständigen, entwickeln Teillösungen in agilen, kurzen Zyklen.

Die für die VIBN erstellten Simulationsmodelle und Testaufbauten bestehen über die Phasen des Engineerings hinaus und sollten weiter genutzt werden (grüne Pfeile in Abbildung 6). Ein Konzept für die weitere Nutzung ist der Digitale Zwilling, mehr dazu in Abschnitt „VIBN als Ausgangspunkt für den Digitalen Zwilling“ (Seite 12).

Kopplung von VIBN und dem übrigen Engineering

Für die prozessuale Integration von VIBN im Engineering ist die Etablierung eines neuen Gefüges aus „Pull“ und „Push“, zusammen mit den mechatronischen Disziplinen, erforderlich (siehe Abbildung 7). In der Pull-Phase fordert die VIBN Informationen in Form von Engineering-Daten aus den mechatronischen Disziplinen. Aus diesen Daten werden das Simulationsmodell und der virtuelle Testaufbau erstellt. In der Push-Phase meldet die VIBN die Testergebnisse der Verifikation und Validierung an die einzelnen mechatronischen Disziplinen zurück. Die Ergebnisse werden von den Disziplinen für Fehlerbehebungen und Optimierungen genutzt.

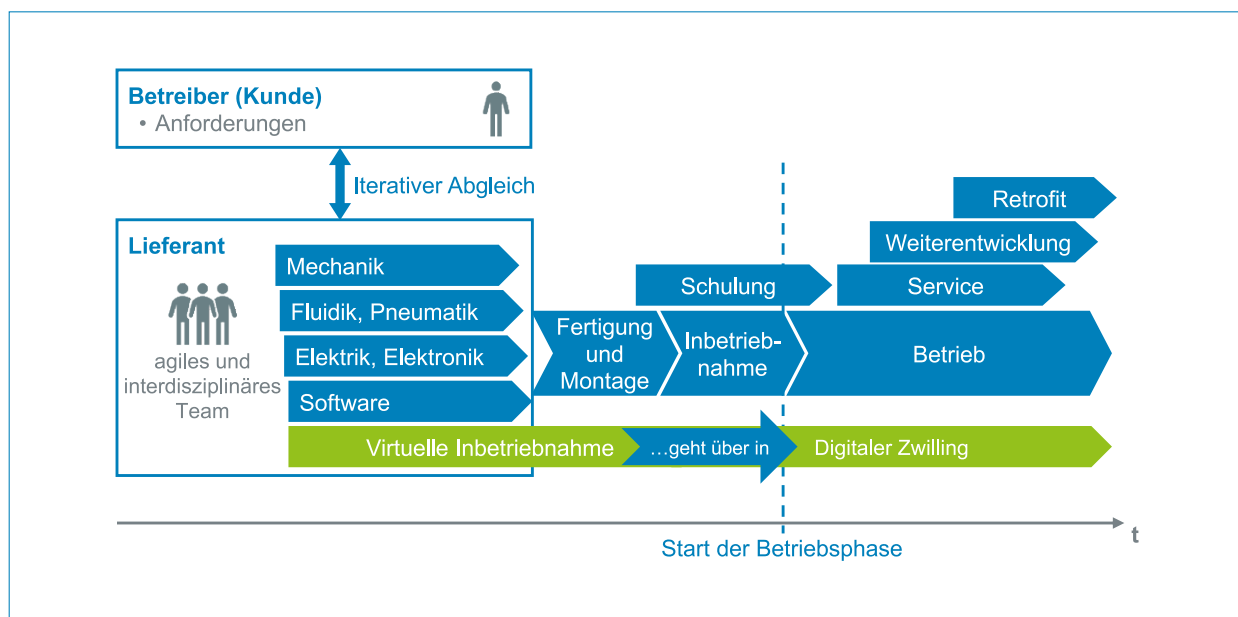


Abbildung 6: Zielbild einer in den Lebenszyklus integrierten VIBN im Maschinen- und Anlagenbau

In einem ideal integrierten VIBN-Prozess wird aus dem Pull und Push ein iteratives Vorgehen geschaffen, das eine neue Dynamik im gesamten Engineering erzeugt. Diese Dynamik bietet eine Reihe von Vorteilen, die in einer höheren Qualität der Komponente, Maschine oder Anlage münden:

- Fehler aus der Konzept- und der Realisierungsphase werden früher entdeckt.
- Optimierungsschleifen werden früher gestartet und häufiger durchgeführt.
- Beteiligtes Personal erhält früher einen Einblick in das gesamte Produktionssystem.

Aufbau und Nutzung des virtuellen Testaufbaus

Die VIBN benötigt ausführbare Simulationsmodelle einer Komponente, Maschine oder Anlage. Die Simulationsmodelle bilden u.a. folgende Zusammenhänge ab:

- Prozesslogik
- Kinematik
- Materialfluss
- Physikalische Effekten
- Sensoren und Aktoren
- (Bus-)Kommunikation

Das Steuerungssystem wird nicht in das Simulationsmodell integriert, sondern mit der Simulation verknüpft. Der virtuelle Testaufbau, also die Verknüpfung des Simulationsmodells mit dem Steuerungssystem, wird als X-in-the-Loop-System (XiL-System) bezeichnet. Mit der Nutzung von XiL-Systemen werden, gegenüber einem realen Testaufbau, folgende Vorteile erreicht:

- Geringere Kosten beim Aufbau
- Geringerer Aufwand bei kontinuierlicher Neukonfiguration
- Keine Beanspruchung von physischen Ressourcen (z. B. Montage- und Hallenfläche)
- Kein Verschleiß und keine Beschädigung von Betriebsmitteln

Die Ausprägungen von XiL werden anhand der Art der Steuerung unterschieden in:

- **Model-in-the-Loop (MiL):** die Steuerungssoftware wird in einer Modellsprache abgebildet.
- **Software-in-the-Loop (SiL):** die Steuerungssoftware läuft in einer Emulation.
- **Hardware-in-the-Loop (HiL):** die Steuerungssoftware läuft auf der realen Hardware der Steuerung.

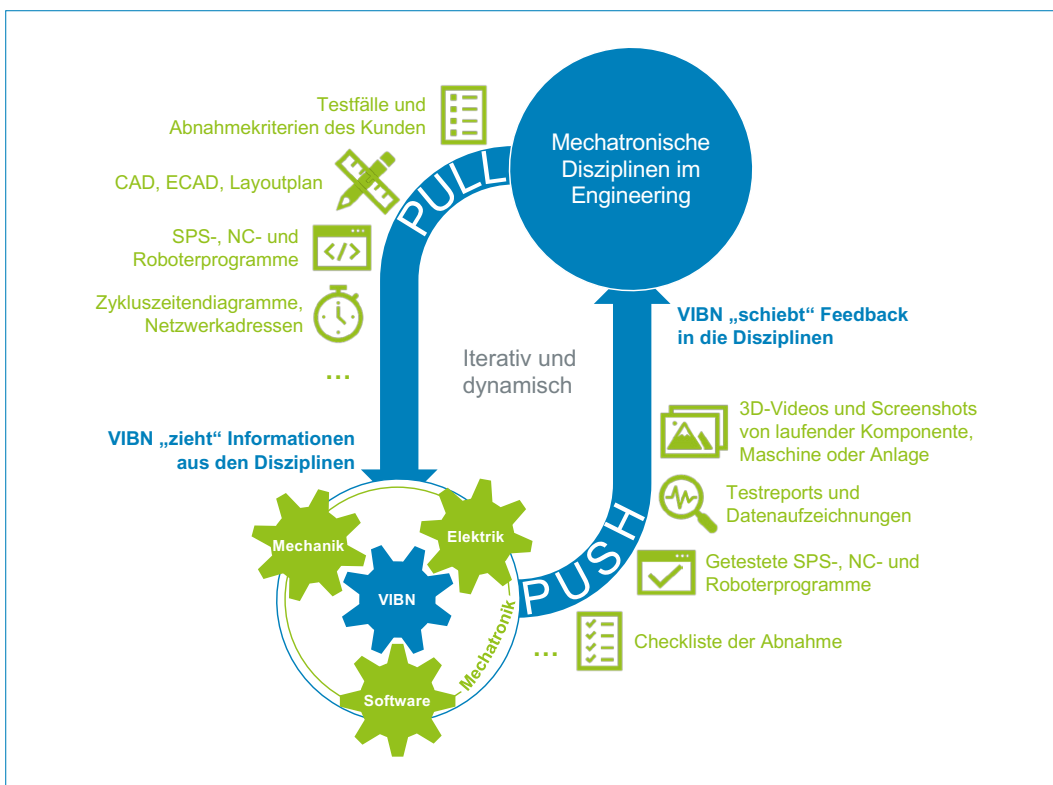


Abbildung 7: Push-Pull-Gefüge zwischen VIBN und den mechatronischen Disziplinen im Engineering

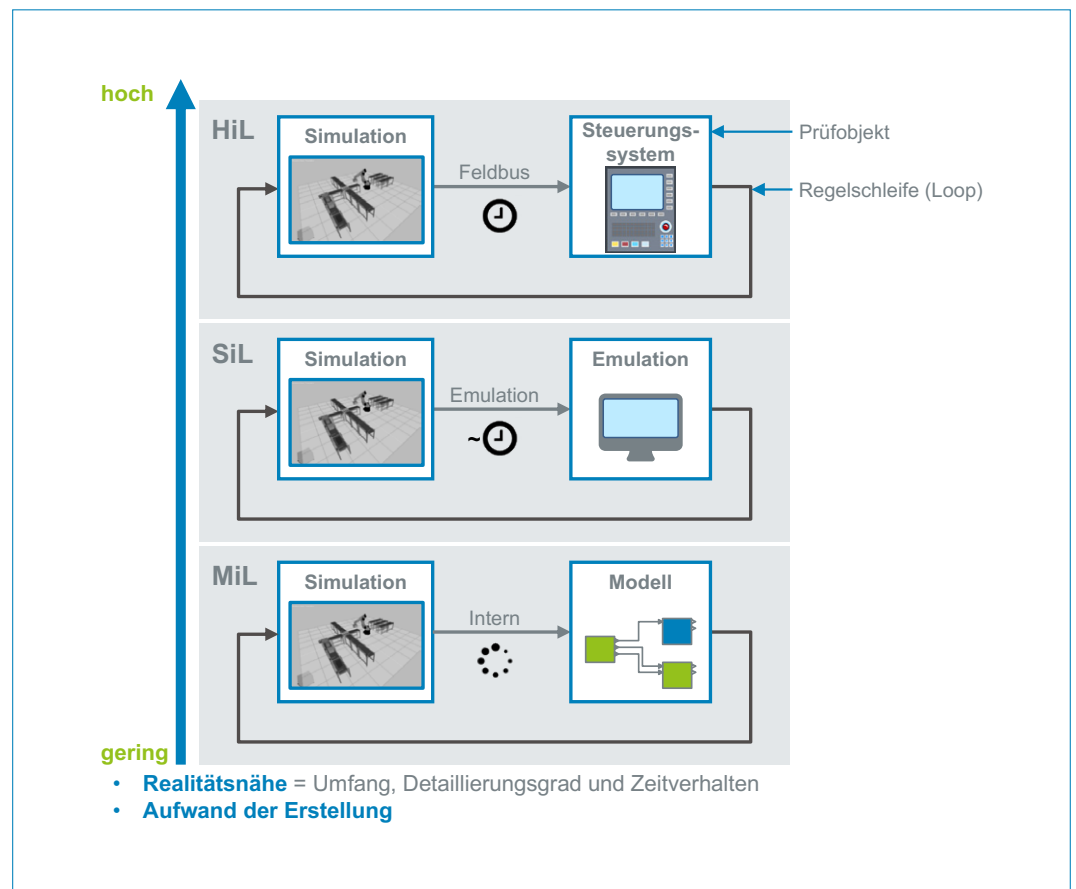


Abbildung 8: Realitätsnähe und Aufwand der XiL-Systeme aus Simulationsmodell, Kommunikationsstrecke und Steuerungssystem

Neben dem Steuerungssystem sind auch die Kommunikationsstrecke, das Simulationsmodell, das Simulationswerkzeug und der Umfang bei der Modellierung zwischen den XiL-Systemen unterschiedlich [5] (siehe Abbildung 8). Abhängig von der gewünschten Nähe zur realen Komponente, Maschine oder Anlage, wird das passende XiL-System eingesetzt. Der Aufwand zur Erstellung steigt mit der Realitätsnähe an. Die Komplexität des Simulationsmodells selbst, steht hiermit nicht im Zusammenhang. Idealerweise werden MiL, SiL und HiL in dieser Reihenfolge, passend zum Fortschritt im Engineering, eingesetzt. Die Kopplungen von mehreren Steuerungssystemen mit einer Simulation sind technisch möglich und werden in der Praxis eingesetzt.

Die für die VIBN erforderlichen Simulationswerkzeuge werden kommerziell von unterschiedlichen Anbietern vertrieben. Der Funktionsumfang der Simulationswerkzeuge unterscheidet u. a. wie modelliert und während

der Ausführung mit der Simulation interagiert werden kann (siehe Best Practice⁶ „Ganzheitlicher Einsatz von VIBN-Simulationsplattformen“). Der Mehrwert von Simulationswerkzeugen entsteht in der Anwendung von explizit digital zur Verfügung stehenden Methoden, welche an der realen Anlage nicht oder nur mit großem Aufwand anwendbar sind. Die folgenden Methoden werden genutzt (siehe auch [5]) für:

- **Das Erstellen von virtuellen Steuer- und Signaltafeln.**

Die Elemente auf den Tafeln werden zum Eingreifen (Taster, Schalter) oder zum Beobachten (z. B. durch Lampen oder Signalläufe) während der Simulation genutzt.

6 Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

- **Das Beeinflussen von Signalen während der Simulation.**

Dies wird dann genutzt, wenn an der virtuellen Komponente, Maschine oder Anlage eine Fehlersituation hervorgerufen werden soll. Die Methode sieht hierzu das Überschreiben (auch als „Forcing“ bezeichnet) der eigentlichen Werte einzelner Signale oder Signalgruppen vor.

- **Die Nachverfolgung (auch als „Tracing“ bezeichnet) von Signalen.**

Die Signale werden während der Simulation aufgezeichnet und als Rohdaten abgespeichert. Eine gleichzeitige grafische Darstellung ist möglich.

- **Das gezielte Herbeiführen eines Anfangszustands in der Simulation.**

Die Methode verkürzt die Zeit zur Vorbereitung eines Tests und macht die Tests wiederholbar.

- **Das Verändern der Simulationszeit im Vergleich zur Realzeit.**

Eine beschleunigte Simulation erlaubt eine größere Spanne der Lebensdauer zu betrachten oder Zwischenzustände zu überspringen. Eine verlangsamte Simulation ermöglicht ein besseres Betrachten von Zustandsänderungen.

Der Entwickler, Tester oder Inbetriebnehmer geht bei der Testausführung am virtuellen Testaufbau nach dem Prinzip **Bedienen, Beobachten, Protokollieren** vor. Dabei ist es für den Erfolg erforderlich, die Abläufe, Testfälle oder Anwendungsszenarien vorab zu definieren und schriftlich festzuhalten.

Abbildung 9 zeigt das Vorgehen zur Erstellung von Testfällen und der anschließenden Testausführung. Die Erstellung einzelner Testfälle erfolgt bezogen auf eine Funktionalität des

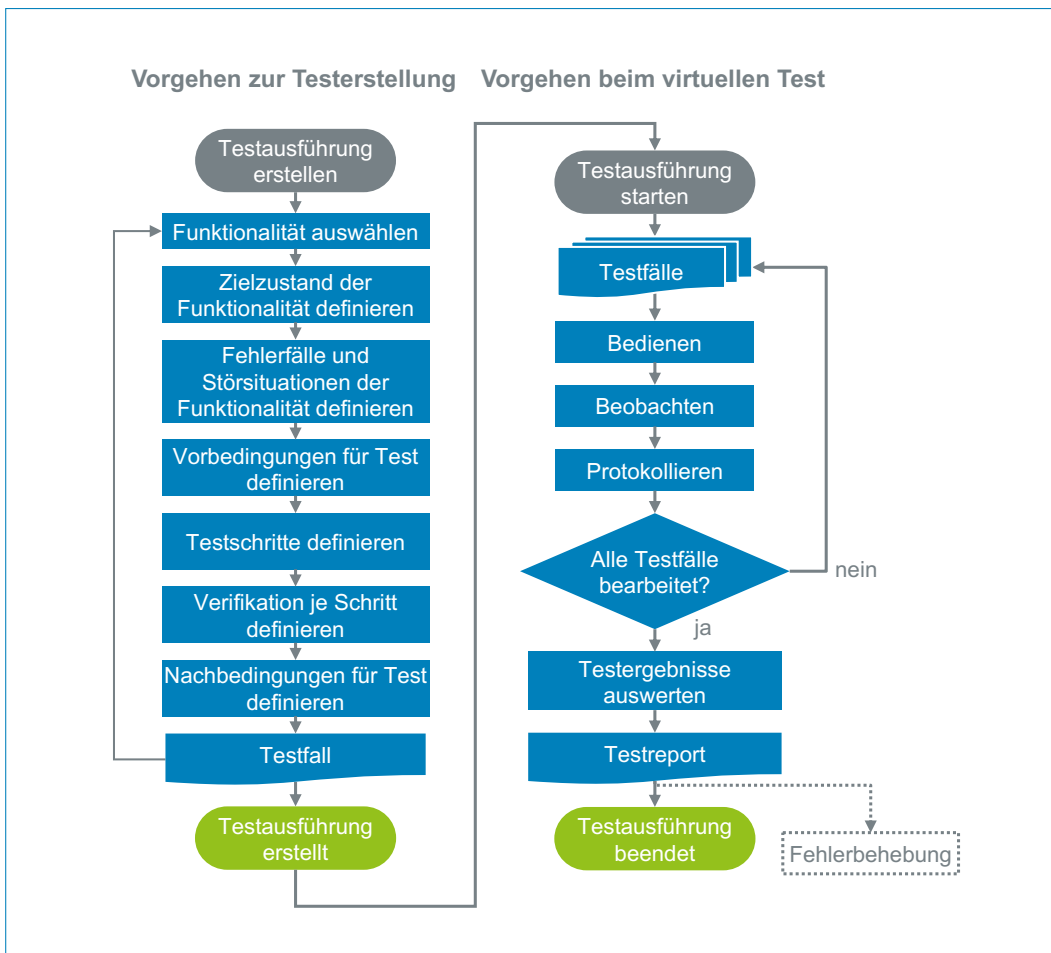


Abbildung 9: Ablaufdiagramme für die Testerstellung und Testausführung

Produktionssystem. Diese können spezifizierte Funktionen, Anforderungen des Betreibers oder bestehende Serviceroutinen beinhalten.

Der Testreport wird als Information zur Fehlerbehebung und Optimierung an die Verantwortlichen der mechatronischen Disziplinen weitergegeben und enthält implizit den Nachweis über den Reifegrad des getesteten Systems und dessen Software. Er dient, neben der Weitergabe an Dritte, auch der späteren Nachvollziehbarkeit. Werden Fehlerbehebungen oder Optimierungen durchgeführt, ist eine erneute Testausführung mit den gleichen Testfällen notwendig (Regressionstest).

VIBN als Ausgangspunkt für den Digitalen Zwilling

Die modellierten Simulationsmodelle und aufgebauten XiL-Systeme können als wichtige Basis für den Digitalen Zwilling dienen. Der Begriff „**Digitaler Zwilling**“ steht für eine als praxisnahe digitale Darstellung eines realen Systems. Hierfür werden Simulationsmodelle aus unterschiedlichen Simulationsdisziplinen, historische Daten sowie Echtzeitdaten aus dem Feld kombiniert und mit Methoden der Auswertung, Vorhersage und Beeinflussung nutzbar gemacht. [6]

Mit Industrie 4.0 hat sich der Einsatzzweck des Digitalen Zwillings auf die produzierende Industrie und insbesondere den Maschinen- und Anlagenbau ausgeweitet. Dort wird er beschrieben als „...visionäre Zielsetzung, dass alle Informationen über eine (technisches) System jederzeit und in der jeweils vom Nutzer benötigten Weise digital zur Verfügung stehen.“ [7]. Der Digitale Zwilling hat bisher noch nicht vollumfänglich den produktiven Einsatz erreicht [8] [9] [10].

Die Möglichkeiten des Digitalen Zwillings sind [6]:

- Die Verifikation der realen Komponente, Maschine oder Anlage.
- Das Vorhersagen der Lebensdauer und des Zustands der realen Komponente, Maschine oder Anlage (Condition Monitoring und Predictive Maintenance).

- Das Absichern von Modifikationen an der realen Komponente, Maschine oder Anlage.
- Das Untersuchen von Fehlersituationen aus dem Betrieb.

Die zur Verifikation und Validierung einer Komponente, Maschine oder Anlage eingesetzten Simulationsmodelle der VIBN können als Teilmodell eines Digitalen Zwillings eingesetzt werden.

Der Digitale Zwilling wird für neue Geschäftsmodelle in Betracht gezogen, um in Zukunft virtuelle Showrooms, individuelle Schulungen im Sinne eines reibungsloseren Produktionsstarts, die erweiterte Nutzung von Retrofitmaßnahmen⁷ und die Veranschaulichung von datengetriebenen Optimierungen zu ermöglichen. Damit wird der Digitale Zwilling in Zukunft zu einem wichtigen Bestandteil der Bestellung und Auslieferung einer Maschine, Komponente oder Anlage.

Fazit

Bereits heute ist die VIBN als gewinnbringende Simulationsmethode im Engineering des Maschinen- und Anlagenbaus im Einsatz. Ein vollständig integrierter VIBN-Prozess hilft im Engineering die Zeitvorgaben zu beherrschen, und erhöht die Qualität der zu liefernden Komponente, Maschine oder Anlage maßgeblich, da Fehler früher erkannt und behoben werden können. Zeit- und Qualitätsgewinn kommen sowohl dem Lieferanten, als auch dem Betreiber zugute. Die für die VIBN genutzten Simulationsmodelle, Simulationswerkzeuge, virtuelle Methoden und XiL-Systeme müssen beherrscht werden, um eine erfolgreiche VIBN zu ermöglichen. Die VIBN ist außerdem die Basis für den Digitalen Zwilling, der wiederum neue Geschäftsmodelle ermöglicht.

⁷ Retrofit: Aufrüstung von Bestandsanlagen mit Digitalisierungstechnik

Kosten und Nutzen der VIBN

Die nachfolgenden Abschnitte dieses Leitfadens unterstützen bei der Identifikation von Nutzenpotenzialen beim Einsatz von VIBN für das eigene Unternehmen, sowie der darauf aufbauenden quantitativen Kosten-Nutzen-Abschätzung anhand von Checklisten.

Qualitative Nutzen der VIBN

Eine umfassende Betrachtung des qualitativen Nutzenpotenzials der VIBN erfolgt anhand der fünf Zieldimensionen Zeit, Qualität, Kosten, Transparenz und Reaktionsfähigkeit [11] – speziell für den Betreiber, System- und Komponentenlieferant.

Nutzen der VIBN für den Betreiber Zeit

Die VIBN ermöglicht für den Betreiber einen früheren Markteintritt („time to market“) und somit einen zeitlichen Vorteil gegenüber anderen Wettbewerbern (siehe Abbildung 10). Dies wird durch die reduzierte Engineering-Zeit der Systemlieferanten ermöglicht. Die VIBN der Anlage und die Optimierung der Anlagensteuerung anhand des Simulationsmodells, ermöglichen die Fehlererkennung und -behebung bereits vor der Inbetriebnahme vor Ort und stellen so das schnelle Erreichen des Betriebspunkts sicher.

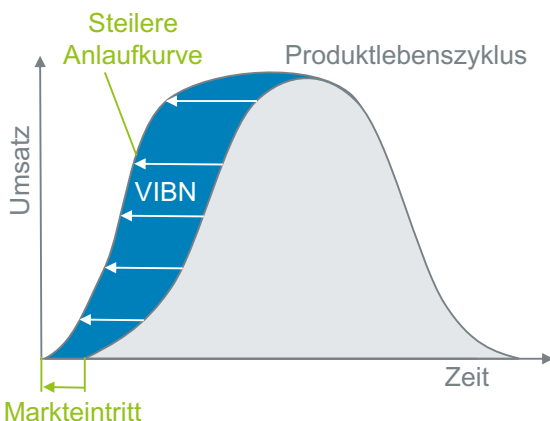


Abbildung 10: Potenziale für den Betreiber durch VIBN

Unterstützt wird dies durch die Qualifikation der Mitarbeiter am virtuellen Modell. Die Anlage kann früher Umsatz generieren, was sich in einer steileren Anlaufkurve widerspiegelt. Die Automatisierung der Testausführung stellt einen weiteren Ansatz zur Optimierung in fortgeschrittenen Umsetzungen der VIBN dar.

Qualität

Eine höhere Anlagenqualität wird durch die Fehlererkennung und -behebung, bereits während des Engineerings, erreicht. Fortlaufende Optimierungen der Anlagensteuerung führen zu einem höheren Reifegrad bei der Inbetriebnahme und tragen so maßgeblich zur Steigerung der Anlaufkurve bei. Nach erfolgreichem Anlauf der Anlage beim Betreiber, kann durch eine fortgeschrittene Umsetzung der VIBN auch zukünftig eine erweiterte Absicherung von Optimierungen und Modifikationen erfolgen. Ermöglicht wird dies durch die Simulation parallel zum Betrieb. Die Voraussetzung hierzu sind die Übergabe der erforderlichen Simulationsmodelle, als erweiterter Lieferumfang des Systemlieferanten, sowie die fortlaufende Definition und Überprüfung von Fehlersituationen.

Kosten

Durch die Verringerung der Integrations- und Anlaufkosten von Anlagen in komplexeren Produktionssystemen, können die Anlaufkosten reduziert werden. Kosten für die Anpassung können hierdurch zusätzlich verringert werden. Es werden typische Ausbringungsverluste in der Anlaufphase reduziert, da das Personal vorab geschult und die Anlagenverfügbarkeit zum SOP⁸ sichergestellt wird. Die Reduzierung von Anlaufverlusten wird sowohl durch die verkürzte Anlaufdauer als auch die Vermeidung von Ausschuss erzielt. Die virtuelle Absicherung ermöglicht das Ausschließen von Kollisionen in einer Anlage und verringert dadurch Reparaturkosten.

Transparenz

Das virtuelle Anlagenabbild wird zur Simulation und Visualisierung von Testläufen eingesetzt und steigert so das Verständnis von Systemlieferant und Anlagenbetreiber, insbesondere bei komplexen Anlagen. Dadurch wird eine bessere Abstimmung ermöglicht. Korrekturen hinsichtlich der Anlagenkonstruktion und Funktionalitäten können noch innerhalb des Engineerings vorgenommen werden. Das gesteigerte gemeinsame Verständnis und die frühe Absicherung unterstützen das Projektmanagement. Meilensteine und Liefertermine werden besser planbar. Auf Basis der Simulationsmodelle können in der fortgeschrittenen Anwendung der VIBN virtuelle Schulungsszenarien für Bediener und Instandhalter, anhand der Anlagenmodelle, abgeleitet werden (siehe Best Practice⁹ zur „Aus- und Weiterbildung im Bereich der VIBN mittels virtueller Laborumgebung“).

Reaktionsfähigkeit

Die gesteigerte Transparenz der Anlage mittels der Simulationsmodelle begünstigt die schnelle Umsetzung von Anpassungsbedarfen und neuen Servicekonzepten. Daraus ergeben sich ein verbesserter Support und Service durch den Systemlieferanten, sowohl in Bezug auf geplante Anlagen (Greenfield, siehe Best Practice⁹ zur „VIBN in der Greenfieldplanung von Agilen Produktionssystemen“), als auch bestehende Anlagen (Brownfield, siehe Best Practice⁹ zur „Integration von neuen Modulen in einem Brownfield-Produktionssystem“). Eine erneute Anpassung einer bereits virtualisierten Anlage kann schneller realisiert werden, da die nötigen Simulationsmodelle bereits bestehen. Auch im zukünftigen Betrieb können fortlaufende Service- und Wartungsprojekte an den Anlagen virtuell geplant und abgesichert werden. Kürzere Integrationszeiten bzw. Anlaufzeiten in Green- und Brownfield werden so erreicht. Das Anlagenpersonal kann am virtuellen Modell geschult werden, ohne Stillstände des Produktionssystems herbeizuführen.

⁹ Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

Zieldimension	Nutzenbeschreibung
Frühzeitige Inbetriebnahme und Reduzierung der Anlaufzeit (Zeit)	<input type="checkbox"/> Frühere Umsetzung der Anlage durch Reduktion der Engineeringzeit <input type="checkbox"/> Schnelles Erreichen des Betriebspunkts durch steile Anlaufkurve <input type="checkbox"/> Beschleunigung durch die Automatisierung von Testausführungen (*)
Höhere Anlagenqualität (Qualität)	<input type="checkbox"/> Fehlererkennung und -vermeidung während des Engineerings <input type="checkbox"/> Höherer Reifegrad der Anlagensteuerung bei der Inbetriebnahme <input type="checkbox"/> Erweiterte Absicherung durch die betriebsparallele Simulation von Fehlersituationen (*)
Reduzierung von Anlaufkosten (Kosten)	<input type="checkbox"/> Reduzierung von Integrationsrisiken und -kosten <input type="checkbox"/> Sicherstellung der Anlagenverfügbarkeit zum SOP <input type="checkbox"/> Reduzierung von Anlaufverlusten (Zeitdauer, fehlerhafte Produkte) <input type="checkbox"/> Vermeidung von Anlagenkollisionen und Reparaturbedarfen
Steigerung der Anlagentransparenz (Transparenz)	<input type="checkbox"/> Visualisierung mittels virtuellem Anlagenabbild bei der Testausführung <input type="checkbox"/> Bessere Abstimmung zwischen Systemlieferant und Betreiber <input type="checkbox"/> Bessere Planbarkeit von Meilensteinen und Lieferterminen <input type="checkbox"/> Personalschulung am virtuellen Anlagenmodell (höhere Mitarbeiterqualifikation) (*)
Schnellere Umsetzung von Anpassungsbedarfen (Reaktionsfähigkeit)	<input type="checkbox"/> Verbessertes Support und Service durch den Systemlieferanten <input type="checkbox"/> Virtuelle Absicherung von Service- und Wartungsprojekten <input type="checkbox"/> Änderungen bestehender Anlagen mit minimiertem Risiko und Anlagenstillstand (*) <input type="checkbox"/> Einführung weiterer Produktionsschichten durch parallele Personalschulung am Modell

(*) Die fortgeschrittene Umsetzung der VIBN und Nutzung der Simulationsmodelle sind erforderlich, um diese Potenziale realisieren zu können

Tabelle 1: Zusammenfassung der VIBN-Nutzenpotenziale für Betreiber

**Nutzen der VIBN für den Systemlieferanten
Zeit**

Es werden Engineering- und Inbetriebnahme-prozesse virtuell und in interdisziplinärer Zusammenarbeit durchgeführt. Abläufe können parallelisiert werden, sodass die Umsetzung eines Simultaneous Engineerings gefördert wird. Besonders im Vordergrund steht bei der VIBN die Erprobung und Validierung der Steuerungssoftware in Interaktion mit dem Simulationsmodell der Anlage in frühen Projektphasen. Dabei durchgeführte Integrations- und Systemtests führen zu einer Verkürzung der IBN und der Anlaufphase beim Betreiber. Mit virtuellen Modellen können Vorabnahmen ohne physische Aufbauten erfolgen und zahlreiche Tests vor der physischen Abnahme stattfinden (siehe Best Practice¹⁰ zur „VIBN zur Planung und Realisierung komplexer Logistiksysteme“).

Qualität

Auf Basis eines Simulationsmodells von Anlagen können ganze Produktionsszenarien weit umfassender getestet und optimiert werden als an einer realen Anlage. Dabei erfolgen die Fehlererkennung und -behebung bereits im Engineering, also vor der kostenintensiven Phase der IBN. Es wird zusätzlich der Daten-

austausch zwischen verschiedenen Anlagenkomponenten und Schnittstellenteilnehmern sowie die Vollständigkeit von Komponenten und Software des Gesamtsystems überprüft. So kann eine frühe Evaluation der Kommunikation zwischen Steuerung und Hardwarekomponenten erfolgen. Eine höhere Testabdeckung wird durch die Überprüfung künstlich induzierter Fehler und kritischer Anlagenzustände ermöglicht. Diese sind im realen Betrieb sehr riskant, verursachen bei einer realen IBN meist hohe Kosten und erfordern mehr Zeit. Unfall- und Gefahrensituationen für Personen bei der IBN werden dadurch vermieden. Im Rahmen einer fortgeschrittenen Umsetzung der VIBN können unterschiedliche Steuer- und Regelstrategien automatisiert evaluiert werden, um eine optimierte Anlagensteuerung zu realisieren.

Kosten

Frühzeitige und kontinuierliche Tests ermöglichen zusätzlich eine erhöhte Effizienz in der Projektabwicklung, die mit einer Kostenreduktion einhergeht (siehe Abbildung 11). Nachträgliche Änderungen im Engineering werden so möglichst vermieden. Eilaufträge im eigenen Betrieb oder die Neubeschaffung von Zukaufteilen, aufgrund kurzfristiger konstruktiver Änderungen von Anlagenkomponenten, werden deutlich reduziert. Virtuelle Tests reduzieren Hardwarekosten und personelle Aufwände zum Aufbau physischer Teststände. Insbesondere für Serienanlagen und

¹⁰ Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

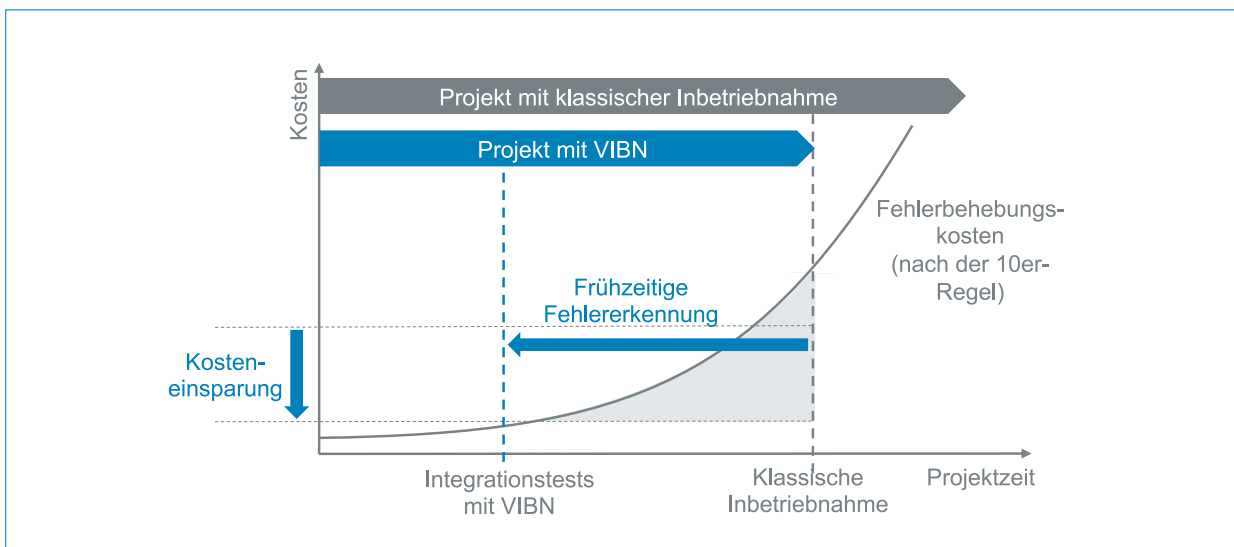


Abbildung 11: Frühzeitige Fehlererkennung und -vermeidung im Engineering

Zieldimension	Nutzenbeschreibung
Verkürzung der Projekt-Durchlaufzeit (Zeit)	<input type="checkbox"/> Effiziente und parallelisierte Engineeringprozesse (Simultaneous Engineering) <input type="checkbox"/> Frühzeitige Erprobung der Steuerungssoftware <input type="checkbox"/> Vermeidung des Aufbaus kompletter Anlagenteile zur Vorabnahme <input type="checkbox"/> Verkürzung der realen Inbetriebnahme und der Anlaufphase
Steigerung der Produktqualität (Qualität)	<input type="checkbox"/> Höhere Softwarereife durch gesteigerte Testabdeckung <input type="checkbox"/> Evaluation der Kommunikation zwischen Steuerung und Hardwarekomponenten <input type="checkbox"/> Vermeidung von fehlenden Komponenten oder fehlender Software <input type="checkbox"/> Virtuelle Tests kritischer und riskanter Anlagenzustände <input type="checkbox"/> Vermeidung von Unfall- und Gefahrensituationen für Personen <input type="checkbox"/> Optimierung von Steuer- und Regelstrategien in frühen Engineeringphasen (*)
Höhere Effizienz in der Projektabwicklung (Kosten)	<input type="checkbox"/> Vermeidung von nachträglichen Änderungen im Engineering <input type="checkbox"/> Reduzierung von Hardwarekosten und Aufbauarbeiten für Testzwecke <input type="checkbox"/> Automatisierte Testausführungen (*) <input type="checkbox"/> Reduzierte Reisekosten für die Inbetriebnahme <input type="checkbox"/> Vermeidung von Vertragsstrafen
Verbessertes Maschinen- und Prozessabbild (Transparenz)	<input type="checkbox"/> Höhere Transparenz der Anlagen (-funktionalität) für Engineering und Management <input type="checkbox"/> Testläufe mittels Simulation, Reproduzierbarkeit von Testszenarien <input type="checkbox"/> Abstimmung und Anpassung mit Betreiber im Engineering (*)
Kurzzyklische Regelkreise (Reaktionsfähigkeit)	<input type="checkbox"/> Frühzeitiges Feedback <input type="checkbox"/> Interdisziplinäre Projektteams und kurzzyklische Meilensteine zur Synchronisierung <input type="checkbox"/> Dezentrale, virtuelle Durchführung von Inbetriebnahmeprozessen (*)

(*) Die fortgeschrittene Umsetzung der VIBN und Nutzung der Simulationsmodelle sind erforderlich, um diese Potenziale realisieren zu können

Tabelle 2: Zusammenfassung der VIBN-Nutzenpotenziale für Systemlieferanten

bei wiederholt auftretenden Testabläufen können durch eine Automatisierung der Testausführung weitere Personalressourcen entlastet werden. Die IBN beim Betreiber kann aufgrund der gesteigerten Produktqualität (Software reife) zeitlich reduziert werden. Für Mitarbeiter entstehen so geringere Reiseaufwände. Vertragsstrafen auf Grund von Terminverzug sind frühzeitig absehbar und können präventiv vermieden werden.

Transparenz

Ein verbessertes Maschinen- und Prozessabbild, in Form des Simulationsmodells, unterstützt die Kommunikation und Verständnisbildung im Engineering und schafft eine erhöhte Transparenz sowie Eindeutigkeit des Projektstatus, auch gegenüber dem Management. So können Unternehmensbereiche einen Einblick in den Status des Engineerings und die Produktfunktionalitäten erhalten, die nicht direkt am Engineeringprozess beteiligt sind. Es werden Testläufe mit Hilfe der Simulation durchgeführt,

visualisiert und reproduzierbar gestaltet. Diese können für zukünftige Engineering-Tätigkeiten wiederverwendet werden. Bei fortgeschrittener Integration der VIBN in den Unternehmensprozessen, können auf Basis der Simulation, noch im Engineering Abstimmungen mit dem Betreiber stattfinden. Anpassungen an der Anlage können ebenfalls vorgenommen werden, ohne die Projektdauer zu verlängern und die Lieferfristen zu gefährden.

Reaktionsfähigkeit

Die Erstellung eines Simulationsmodells der Anlage in der Konstruktionsphase fördert die Umsetzung aufeinander abgestimmter und agiler Engineeringprozesse und ermöglicht ein frühzeitiges Feedback durch den Kunden. Kurzzyklisch gewählte Meilensteine zur Synchronisierung sorgen für regelmäßige Abstimmungen innerhalb des Unternehmens und mit dem Betreiber. Aufwändige Nachforderungen nach Auslieferung des Produktionssystems werden so vermieden.

Im Zuge einer fortgeschrittenen Etablierung der VIBN im Unternehmen kann die Abstimmung der beteiligten Abteilungen und Mitarbeiter auch dezentral erfolgen. Von internationalen Kooperationen des Engineeringteams, bis hin zur VIBN – parallel zum Transport der Anlage –, sind vielfältige Szenarien mit einer hohen Flexibilität bezüglich Zeit und Einsatzort möglich.

Nutzen der VIBN für den Komponentenlieferanten

Zeit

Ein Nutzen ergibt sich durch effizienteres Engineering gemeinsam mit den Kunden, wenn Simulationsmodelle der Komponenten genutzt werden können. Insbesondere mit parametrierbaren Modellen können aufwändige Abstimmungsrunden reduziert werden, so dass beide Seiten Zeit sparen. Zusätzlich ist vorteilhaft, wenn die Kunden die Modelle in Standardformaten anfordern und einfach in das VIBN-Simulationswerkzeug importieren können. Dadurch wird ein universeller Datenaustausch¹¹ gewährleistet und der Komponentenlieferant kann die Modelle einfacher und sicherer individuell erzeugen und zur Verfügung stellen.

Qualität

Hersteller können aufgrund ihrer Expertise Simulationsmodelle ihrer Komponenten für die VIBN in hoher Qualität erstellen. Mit einer passgenauen Auslegung und Konfiguration

der virtuellen Komponenten kann auch der Systemlieferant die Qualität seines Simulationsmodells der Anlage verbessern. Denn die notwendigen Fähigkeiten der Anlage werden durch die virtuelle Erprobung der Komponentenfunktion und -eignung maßgeblich sichergestellt. Hierbei steigern digitale Engineering-Prozesse sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Effizienz deutlich.

Kosten

Die Erstellung und Bereitstellung von Simulationsmodellen bedeuten für den Komponentenlieferanten zunächst einmal zusätzliche Kosten. Den zentralen Nutzen jedoch stellt die aktive Teilnahme an der digitalen Wertschöpfungskette dar, die eine Erweiterung des Geschäftsmodells ermöglicht. Der Komponentenlieferant erweitert, durch die Bereitstellung des Digitalen Zwilling zu seinen Komponenten, den Lieferumfang. Die im eigenen Engineering entstandenen Simulationsmodelle werden dem Systemlieferanten angeboten, welcher dadurch seinen eigenen Modellierungsaufwand reduzieren kann. Neben der Nutzung für die VIBN können die Simulationsmodelle auch zukünftig durch die Betreiber für den industriellen Digitalen Zwilling verwendet werden (siehe Abbildung 12). Letztlich kann durch die Verankerung des Simulationsmodells und zusätzlicher Services in den Unternehmensprozessen eine Differenzierung vom Wettbewerb erfolgen und dadurch ein verbesserter Marktzugang realisiert werden.

¹¹ Bislang existieren häufig werkzeugspezifische Formate, aber keine branchenübergreifenden standardisierten Austauschformate. Zukünftige Entwicklungen im Kontext der Normung und Standardisierung sind erforderlich.

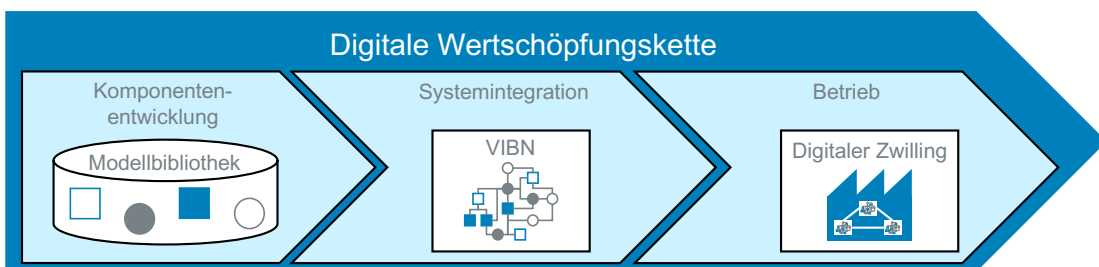


Abbildung 12: Marktvorteil durch die Mitwirkung an der digitalen Wertschöpfungskette

Zieldimension	Nutzenbeschreibung
Reduzierung der time to market (Zeit)	<input type="checkbox"/> Bereitstellung von Simulationsmodellen vor physischer Lieferung <input type="checkbox"/> Reduzierung der time to market durch virtuelle Integrationstests <input type="checkbox"/> Bereitstellung unterschiedlicher etablierter Dateiformate (*)
Steigerung der Komponentenqualität (Qualität)	<input type="checkbox"/> Sicherstellung der Funktionsfähigkeit durch digitales Engineering <input type="checkbox"/> Virtuelle Absicherung anhand von Demonstrationsszenarien <input type="checkbox"/> Absicherung des Datenaustausches zwischen unterschiedlichen Informationsmodellen
Digitale Wertschöpfung als Erweiterung des Geschäftsmodells (Kosten)	<input type="checkbox"/> Erprobung ohne physische Prototypen <input type="checkbox"/> Aufbau und Pflege einer digitalen Komponentenbibliothek mit Simulationsmodellen <input type="checkbox"/> Virtuelle Erprobung von Komponentenfunktion und -eignung <input type="checkbox"/> Verbessertes Marktzugang durch erhöhte Sichtbarkeit (*)
Verbesserte Produkttransparenz (Transparenz)	<input type="checkbox"/> Darstellung von Funktionalität und Verhalten anhand von Simulationsmodellen <input type="checkbox"/> Nutzung des Simulationsmodells in Vertrieb und Support <input type="checkbox"/> Bereitstellung von Modellen in Lieferanten übergreifenden Komponentenbibliotheken <input type="checkbox"/> Verbesserte Sichtbarkeit am Markt (*)
Schnellere Reaktion auf Kundenbedürfnisse (Reaktionsfähigkeit)	<input type="checkbox"/> Gezielte Abstimmung auf Bedarfe des Betreibers auf Basis von Simulationsmodellen <input type="checkbox"/> Virtuelle Erprobung in Integrationsszenarien <input type="checkbox"/> Kurzfristige virtuelle Modellanpassungen (*)

(*) Die fortgeschrittene Umsetzung der VIBN und Nutzung der Simulationsmodelle sind erforderlich, um diese Potenziale realisieren zu können

Tabelle 3: Zusammenfassung der VIBN-Nutzenpotenziale für Komponentenlieferanten

Transparenz

Die Funktionalität und das Verhalten von Komponenten können transparent dargestellt und den Systemlieferanten die Simulationsmodelle, durch Vertrieb und Support, bereitgestellt werden. Eine Integration der Komponenten in lieferantenübergreifende Komponentenbibliotheken, weist eine zusätzliche Möglichkeit zur Verbreitung auf. Die Verbreitung von Simulationsmodellen und das transparente Aufzeigen von Funktionalitäten erhöht die Sichtbarkeit am Markt.

Reaktionsfähigkeit

Anpassungsbedarfe auf Kundenbedürfnisse können gezielt auf Basis der Simulationsmodelle abgestimmt werden. Die Erprobung in Integrationsszenarien ermöglicht die kurzzyklische Abstimmung ohne die Entwicklung physischer Demonstratoren.

Quantitative Kosten-Nutzen-Abschätzung

Zur strategischen Planung zählt auch ein fundiert abgeschätztes Kosten-Nutzenpotenzial der VIBN. Die dreistufige Methodik soll dazu befähigen, die Potenziale für Unternehmen zu beziffern (Abbildung 13). Diese Methodik

richtet sich primär an Systemlieferanten aus dem Serien- und Sondermaschinenbau, kann jedoch auch für die Bedürfnisse von Komponentenlieferanten, sowie Betreibern, angepasst verwendet werden.

Stufe 1

Kostenanalyse

Eine Kostenanalyse bildet die Grundlage für die Kosten-Nutzen-Abschätzung. Es werden Bereiche und Prozesse identifiziert, die durch die VIBN beeinflusst werden. Die bestehenden Kosten werden systematisch erfasst. Zur Unterstützung wird eine Checkliste bereitgestellt, welche die beeinflussten Bereiche und Prozesse aufzeigt (siehe Tabelle 4).

Stufe 2

Nutzenpotenzialabschätzung

Es folgt die Abschätzung prozentualer Einsparungspotenziale, welche durch VIBN erreichbar sind. Aus der Gegenüberstellung der anfallenden absoluten Kosten aus der Prozesskostenanalyse und der prozentualen Einsparungspotenziale können die absoluten Einsparungen abgeleitet werden.

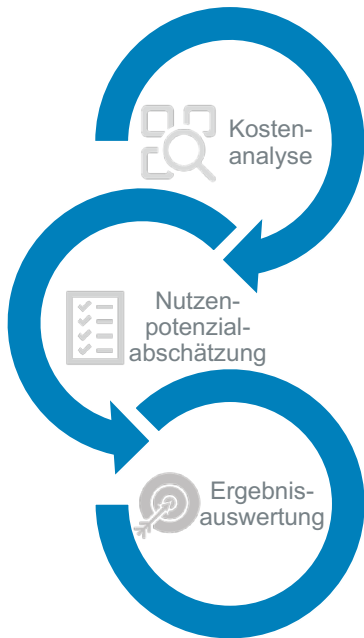


Abbildung 13: Vorgehen bei der quantitativen Kosten-Nutzen-Abschätzung

Stufe 3

Ergebnisauswertung

Diesen Einsparungspotenzialen sind die Kosten der VIBN gegenüberzustellen. Nachgelagert findet die Auswertung der tatsächlich realisierten Einsparungen, auf Basis eines durchgängigen Projektcontrollings, statt.

Kostenanalyse

Eine quantitative Kosten-Nutzen-Abschätzung setzt eine saubere Prozesskostenanalyse voraus. So kann die Ermittlung der Einsparpotenziale und deren Monitoring gewährleistet werden. Die Prozesskostenanalyse sollte mit der Einführung der VIBN, anhand eines Pilotprojekts, durchgeführt werden.

Die Prozesskostenanalyse sollte unternehmensindividuell erfolgen. Es ist empfehlenswert bei der Kosten-Nutzen-Abschätzung alle Unternehmensprozesse zu betrachten und nicht nur die Prozesse des Engineerings. Die Spalte „Kostenposition“ in Tabelle 4 zeigt von der VIBN beeinflusste Bereiche im Unternehmen. Die Ist-Kosten, also ohne VIBN, werden innerhalb der Spalte „Kosten“ erfasst. Die Erfassung kann

dabei entweder auf Basis eines einzelnen Projekts oder der unternehmensweiten Einführung in allen Projekten angewendet werden. „Die Checkliste ist anhand von drei zentralen Bereichen strukturiert: Gemeinkosten & Rückstellungen, Operative Kosten sowie der Bereich After Sales.“ Den einzelnen Bereichen werden relevante Unternehmensaktivitäten zugeordnet, welche durch die VIBN direkt beeinflusst werden.

Gemeinkosten & Rückstellungen

Vertrieb & Organisation: Zu erfassen sind die Kosten, die entweder vor oder unabhängig von einer Projektdurchführung entstehen. Dies umfasst z. B. Kosten für die Akquisition von Aufträgen, Messeauftritte und Marketing oder zur Kundengewinnung und -bindung. Einsparpotenziale erwachsen beispielsweise durch eine Erhöhung des Anteils der erfolgreich akquirierten Aufträge, wenn die eigenen Produkte mit VIBN angeboten werden. Ein weiterer Kostenfaktor ist das Vorhalten des Fachpersonals für die Inbetriebnahme. Anwendererfahrungen zeigen, dass die Personal-Fluktuation und damit verbundene Kosten durch die höhere Sozialverträglichkeit des VIBN-Arbeitsprofils abnehmen. Dies kann sich auch in der Kosten-Nutzen-Kalkulation widerspiegeln.

Garantien & Kulanz: Zu erfassen sind die Kosten, welche mit der vertraglich vereinbarten korrekten Auslieferung der Komponente, Maschine oder Anlage in Zusammenhang stehen, beispielsweise Vertragsstrafen bei Verzug der Anlagenauslieferung oder verzögerter Abnahme durch Nichterfüllung des Pflichtenhefts. Die Hälfte von im Jahr 2017 befragten Unternehmen verzeichneten hier deutliche Verbesserungen [12]. Verzögerungen resultieren zusätzlich in zugestandener Kulanz für Folgeprojekte, um die Kundenbindung aufrechtzuerhalten.

Operative Kosten

Engineering/Fertigung: Zu erfassen sind die Kosten, welche mit der werksseitigen operativen Durchführung eines Projekts zusammenhängen. Die Einführung der VIBN verursacht zusätzliche, jedoch einmalige Aufwände, welche nicht in den später erfassten Kosten zur Einführung abgedeckt sind, z. B. durch Prozessanpassungen.

Kostenposition	1 - Kostenanalyse		2 - Nutzenpotenzialabschätzung		3 - Ergebnisauswertung		Kommentar / Beispiele
	zutreffend <input checked="" type="checkbox"/>	Kosten EUR	beinflussbar? <input checked="" type="checkbox"/>	Potenzial in %	Einsparung EUR	Erfüllung in %	
Vertrieb / Organisation							
1 Akquisitionskosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Messeauftritte, Marketing etc.
2 Kundengewinnung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Erfolgsquote, Vertreterprovisionen etc.
3 Fachpersonal	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Gewinnung von Fachmitarbeitern für die (V)IBN
4	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
Kulanzen / Garantien							
1 Kulenzen	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Rabatte für Folgeaufträge etc.
2 Garantien/Gewährleistung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Rückstellungen für Leistungen zur Nachbesserung
3 Vertragsstrafen	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Vertragsstrafen bei Verzögerung der Endabnahme
4	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
Engineering / Fertigung							
1 Personal	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Personalkosten für Entwicklung, Montage etc. inklusive Analyse von Alternativen
2 Prototypenbau	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Prüfkosten etc.
3 Qualitätssicherung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Kosten durch vermeidbare Fehler, z.B. für Eilaufträge
4 Nachbesserungen	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
5	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
Inbetriebnahme							
1 Personalkosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Personalkosten während der Inbetriebnahme
2 Aufstellfläche	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Bereitstellung von Flächen für Vorabnahmen
3 Material	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Bereithaltung von Material und Werkzeug
4 Reisekosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Kosten für Anreise und Unterkunft der IBNIer
5 Nachlieferungen	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Kosten für kurzfristige Anlagenanpassungen
6	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
Betrieb							
1 Stillstandskosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Kosten für Anlagenstillstände für Optimierung/Umbau
2 Schulungskosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Kosten für durchzuführende Schulungen
3 Umrüstkosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Anpassungen zur Produktion anderer Produkte
4	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
Service							
1 Wartung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Werkzeuge, Messinstrumente, etc.
2 Personalkosten	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Anreise, Zuschläge etc.
3 Fernwartung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				Lizenzen, Hardware
4	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
		Σ		Σ			
After Sales							
				Zusätzliche Kosten durch VIBN	Mehrausgabe EUR	Erfüllung in %	Mehrausgabe EUR
				Kosten zur Einführung VIBN			VIBN-Hardware, Lizenzen, Schulungen etc.
				Personalkosten VIBN-Verantw.			Gehalt des für die VIBN abgestellten Personals
				Personalkosten Projektaufwände			Zusätzlicher Personalaufwand VIBN anderer Abteilungen

Tabelle 4: Checkliste Kosten-Nutzen-Abschätzung

Inbetriebnahme: Zu erfassen sind die Kosten, die direkt mit der Inbetriebnahme in Zusammenhang stehen. Dies umfasst insbesondere das für die Inbetriebnahme vorzuhaltende Personal, Reisekosten zum Installationsort und benötigtes Material. Die VIBN bietet hier ein enormes Einsparungspotenzial, da die Personalkosten für die physische Inbetriebnahme signifikant verringert werden können. Dies setzt sich aus der verringerten Zeit vor Ort (teils bis zu 75 %) [12] sowie den kompakteren Planungsmöglichkeiten zusammen. Best-Practice Erfahrungen zeigen, dass sich Wochenend- und Nacharbeit kurz vor der Abnahme oft vermeiden lässt. Weitere Faktoren sind die Verringerung benötigter Werksfläche, welche für (Vor-) Abnahmen vorgehalten wird.

After Sales

Betrieb: Zu erfassen sind Aufwände, welche für das Unternehmen nach Inbetriebnahme der Anlage anfallen. Hierunter fallen Positionen, welche in einer für einen Betreiber angepassten Kosten-Nutzen-Abschätzung wichtig sind:

- Kosten, welche durch den Stillstand einer Anlage für Optimierungs- und Umbaumaßnahmen anfallen.
- Kosten, welche durch nötige Schulungsmaßnahmen anfallen.
- Kosten für Rüstvorgänge bei Produktionsanpassungen für neue Produkte.

Service: Zu erfassen sind die Aufwände, welche durch nötige Dienstleistungen nach Auslieferung und Abnahme der Anlage entstehen. Das können Kosten sein, die bei regelmäßigen Wartungen des Produktes anfallen, selbst wenn diese durch den Betreiber vergütet werden. Die VIBN erlaubt es, einen Teil dieser Dienstleistungen Remote durchzuführen, wodurch sich neben dem Zeiteinsatz auch Reisekosten reduzieren und sich die Flexibilität der eingesetzten Mitarbeiter erhöht.

Nutzenpotenzialabschätzung

Sobald eine vollständige Prozesskostenanalyse vorliegt, sollte eine monetäre Zielgröße für das Unternehmen formuliert werden. Hierbei unterstützen die Tabellen 1 – 4. Einzutragen sind die möglichen prozentualen Einsparungen je Kostenposition.

Die Nutzenpotenzialabschätzung in Bezug auf schwer messbare, quantitative Nutzen, z. B. zusätzliche Aufträge, deren Akquisition durch die VIBN erst ermöglicht wird, kann zum Teil erst nach der Einführung erfolgen. Ein erfahrener VIBN-Spezialist kann vorab wertvolle Abschätzungen geben.

Zusätzliche Kosten zur Durchführung der VIBN

Den vorab ermittelten Potenzialen sind nachfolgend die mit der Durchführung der VIBN einhergehenden Kosten gegenüberzustellen.

Kosten zur Einführung der VIBN

Zu erfassen sind die Kosten, die als Investition zur Einführung der VIBN im Unternehmen notwendig sind. Dies umfasst sowohl Investitionen in erforderliche Hard- und Software, die Bestandteil eines VIBN-Arbeitsplatzes sind, als auch Investitionen in Mitarbeiterschulungen.

Hierzu zählen:

- Software-Lizenzen & Schulungen
- PC-Workstations
- VIBN-Teststände (z. B. SPS für HiL-Anwendungen)

Dem Vorgehen zur Realisierung eines Pilotprojekts ergänzen (siehe ab Seite 27), ergeben sich die genauen Informationen für einen Arbeitsplatz direkt aus der Vorauswahl der Simulationswerkzeuge. Zum Erhalt der Funktionalität VIBN sollten über die Pilotphase hinaus mehrere VIBN-Arbeitsplätze im Unternehmen vorgehalten werden.

Personalkosten des VIBN-Verantwortlichen

Die VIBN sollte als unternehmenskritischer Prozess betrachtet werden, daher empfiehlt sich die Ernennung eines VIBN-Verantwortlichen, welcher entsprechende laufende Personalkosten für VIBN verursacht.

Die einzelnen Positionen der Arbeitsplätze und VIBN-Verantwortlichen werden addiert und mit der geplanten Anzahl an Arbeitsplätzen/Verantwortlichen multipliziert. Wurde sich bei der Prozesskostenanalyse für eine Betrachtung je Projekt entschieden, sollte berücksichtigt werden, dass sich die Investitionskosten für die Einführung der VIBN überproportional auswirken,

sollten sie nicht über die Pilotphase hinaus über mehrere Projekte abgeschrieben werden. Die Kapazität eines Arbeitsplatzes sollte für die Aufteilung auf mehrere Projekte abgeschätzt werden. Der erforderliche Aufwand ist projektspezifisch. Schätzwerte aus Experteninterviews zeigen, dass etwa 15-20 Projekte pro Jahr und Arbeitsplatz für eine durchschnittliche Projektgröße durchgeführt werden können. Die Kosten für Anfangsinvestitionen und die VIBN-Verantwortlichen werden entsprechend in den Feldern in Spalte 2 anteilig aufgetragen. Sollte die VIBN für das Unternehmen eine Zukaufleistung bleiben, so kann dies an diesem Punkt als Unterauftrag kalkuliert werden.

Personalkosten durch wiederkehrende Projektaufwände

Die VIBN verursacht auch in weiteren Abteilungen zusätzliche Personalkosten für jedes Projekt. Sowohl beim Systemlieferanten als auch beim Betreiber fallen diese an. Die Positionen in Tabelle 5 geben eine Hilfestellung für die Verortung dieser Kosten für die jeweils Beteiligten der Zuliefererkette.

Für die einzelnen Positionen sind die zusätzlichen Aufwände in Personentagen einzuschätzen. Hieraus können die zusätzlichen Personalkosten berechnet werden.

Ergebnisauswertung

Nach Ende der Pilotphase ist eine Auswertung der Pilotprojekte möglich. In Tabelle 4 können die tatsächlich angefallenen Kostenpositionen, beispielsweise mittels Informationen aus dem Controlling, eingetragen und Abweichungen von den in der Potenzialanalyse festgelegten Zielgrößen vermerkt werden.

Kapazitätsanpassung

Aus dem in der Pilotphase angefallenen Aufwand für die VIBN kann die Jahreskapazität je Arbeitsplatz berechnet werden. Es sind dabei Sekundäreffekte zu berücksichtigen, die den zukünftigen Aufwand je Projekt reduzieren werden. Lerneffekte, etablierte Prozesse, wiederverwendbare oder durch Zulieferer bereitgestellte Verhaltensmodelle können den Aufwand je Projekt mittelfristig deutlich reduzieren. Erfahrungen aus Experteninterviews im Industriebeirat zeigen, dass eine Reduzierung des Aufwandes je Projekt und Arbeitsplatz um 50 % bis 75 % möglich ist.

Position	Betreiber	Projekttag	Systemlieferant	Projekttag
VIBN Grobkostenabschätzung, Bereitstellung von Ablaufdiagrammen und Zeitvorgaben	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	–
Technische Anfrageuntersuchung, VIBN-Spezifikation, Angebotsbewertung	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	–
VIBN-Kick-Off-Workshop, Termin- & Ressourcenplanung, Klärung Modellierungskonzept und Zuständigkeiten	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Erstellung Simulationsmodell	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Aufbau virtueller Testaufbauten und VIBN-HW/SW-Infrastruktur	<input type="checkbox"/>	–	<input checked="" type="checkbox"/>	
Verifikation/ Validierung und Abnahme der virtuellen Testaufbauten	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Zusätzliche übergeordnete Steuerungsaufwände (z. B. Koordination der Lieferanten)	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	–
	Σ		Σ	

relevant | irrelevant

Tabelle 5: Tätigkeitspositionen für zusätzliche Personalkosten durch wiederkehrende Projektaufwände

VIBN erfolgreich im Unternehmen einführen

Eine erfolgreiche Einführung zeichnet sich durch ein schnelles Erreichen eines positiven Kosten-Nutzen-Verhältnisses aus. Die Einführung der VIBN im eigenen Unternehmen ist ein strategisches Projekt, welches sowohl eine ausführliche Planung als auch eines Controllings bedarf. Erfahrungen zeigen, dass die Einführung durch einzelne Mitarbeiter in einem Nebenprojekt zumeist nicht zum Erfolg führt¹².

Die Einführung erfolgt in zwei Phasen: Die Pilotphase und die Produktivphase.

Die **Pilotphase** hat die Zielstellung, in einem Projekt Erfahrungen mit dem Thema VIBN zu sammeln. Auf dieser Erfahrung aufbauend,

wird ein Simulationswerkzeug ausgewählt und ein unternehmensspezifischer VIBN-Prozess entworfen. Die Pilotphase sollte dabei eine kurzfristige Zeitdauer von einem oder mehreren Standardprojekten umfassen, jedoch zwei Jahre nicht überschreiten.

In der **Produktivphase** ist das Ziel, die Strukturen der VIBN im Unternehmen und dem Engineering zu etablieren und die Effizienz zu steigern. Dies wird durch eine mittel- und langfristige Planung mit einer Zeitdauer von bis zu 5 Jahren erreicht.

Abbildung 14 zeigt beide Phasen und die jeweiligen Aufgabenpakete. Nach der erfolgreichen Einführung der VIBN im Unternehmen entstehen neue Nutzenpotenziale (vgl. Kapitel Ausblick).

12 Die Angabe entstammt den Experteninterviews welche im Rahmen der Leitfadenerstellung mit Beiratsmitgliedern des VDMA durchgeführt wurden.

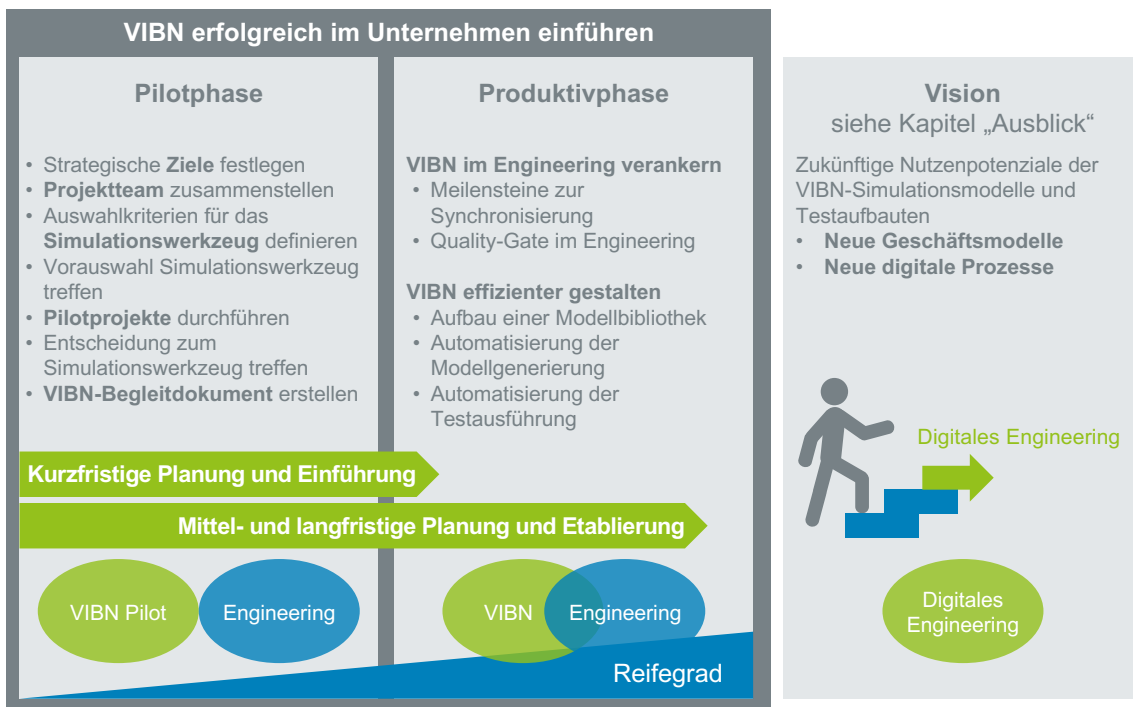


Abbildung 14: Die Phasen bei der Einführung von VIBN im Unternehmen

Pilotphase – Kurzfristige Planung und Einführung

Zwei Erfolgskriterien für eine erfolgreiche Pilotphase sind die Festlegung auf einen Stichtag zum Abschluss der Pilotphase und das Einbinden der Führungsebene durch kontinuierliches Reporting. Ein wichtiges Ergebnis der Pilotphase ist der Entwurf eines VIBN-Prozesses für das zukünftige Engineering. Dafür sind die Schaffung von organisatorischen Schnittstellen und die Auswahl eines Simulationswerkzeugs notwendig.

Die VIBN führt zu einem kulturellen Wandel des bisherigen Engineerings. Um den Wandel zu unterstützen ist es wichtig, Schnittstellen zwischen den Organisationseinheiten des Engineerings (also den mechatronischen Disziplinen) und dem neuen VIBN-Prozess zu schaffen. Die Schnittstellen sind dabei individuell vom Unternehmen abhängig und müssen im Praxiseinsatz identifiziert werden. Von Beginn an wird ein VIBN-Begleitdokument angelegt, das alle wichtigen Erkenntnisse und das Vorgehen dokumentiert.

Abbildung 15 veranschaulicht die einzelnen Prozessschritte der Pilotphase, die im folgenden Abschnitt genauer beleuchtet werden.

Strategische Ziele festlegen

Zu Beginn der Pilotphase ist festzulegen, welche strategischen Ziele mit der Einführung und Nutzung der VIBN verfolgt werden. Dabei sind die für das Unternehmen relevanten Nutzenpotenziale der VIBN (Kapitel „Kosten und Nutzen der VIBN“) zu identifizieren. Basierend auf ausgewählten Nutzenpotenzialen sind messbare Zielgrößen abzuleiten.

Beispiel: Wenn das Ziel die Steigerung der Softwarequalität ist, sollten geeignete Zielgrößen wie „Arbeitszeit zur Fehlerbehebung am Installationsort“ oder „Anzahl Bugreports bei der Abnahme“ als Kennzahlen verwendet werden.

Für die Zielgrößen ist der aktuelle Ist-Zustand zu erfassen und darauf basierend ein Soll-Zustand zu planen, welcher nach der Einführung der VIBN angestrebt wird. Die Differenz aus Ist- und Soll-Zustand der Zielgrößen ergibt ein grob geschätztes Einsparpotenzial durch die Nutzung von VIBN. Dabei kann das Einspar-

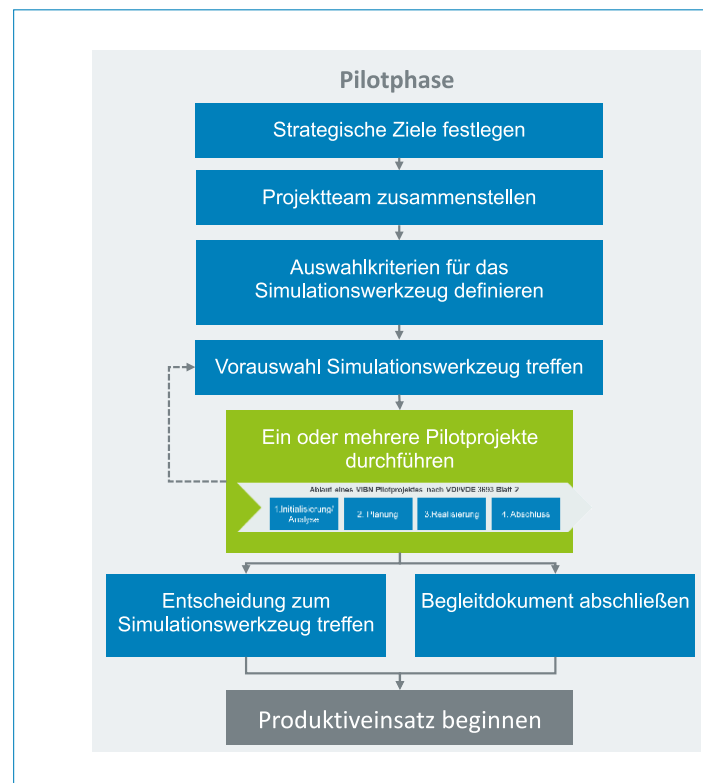


Abbildung 15: Pilotphase zur erfolgreichen Einführung von VIBN im Unternehmen

potenzial genutzt werden, um ein Budget für die Einführung von VIBN festzulegen. Eine fundierte Kosten-Nutzen-Abschätzung für die Produktivphase kann erst nach der Pilotphase, mithilfe der tatsächlich entstandenen Kosten und Nutzen, durchgeführt werden.

Während der Festlegung der strategischen Ziele ist ein externer VIBN-Experte zur Unterstützung hilfreich. Auch Gespräche mit dem eigenen Projektteam oder den Inbetriebnehmern sind bei der Festlegung der Zielgrößen relevant. Erkenntnisse und Rückmeldungen von Kolleginnen und Kollegen müssen jedoch in Bezug zur Unternehmensstrategie gesetzt werden. Ansonsten besteht die Gefahr in alten Lösungsansätzen, Denkmustern und Gewohnheiten zu verharren.

Projektteam zusammenstellen

Bei der Zusammenstellung des Projektteams muss darauf geachtet werden, dass die Expertise und Erfahrung aus der IBN, in dem neuen Team vorhanden sein muss. Das Projektteam sollte mit der vollen Kapazität eingeplant wer-

Muss-Kriterien	Beschreibung
Erfüllung von Schnittstellenstandards	Erfüllung von Standards zur Kommunikation oder Import/Export von CAD-Geometriedaten.
Materialfluss	Die Materialflusssimulation ist in mehreren Modelltiefen möglich: diskret ereignisorientiert, auf Basis der Kinematik und auf Basis der Physik.
Echtzeitanforderungen	Zeitdeterministische Berechnung (bei SPS-Abläufen und Kollisionsberechnungen bei Robotik, CNC oder Motion Control im Bereich von 1-10 ms, bei einer Feldbussimulation im Zeitbereich von unter einer Millisekunde).
HiL/SiL-Betrieb	Der HiL- oder SiL-Betrieb wird ermöglicht durch Unterstützung von Schnittstellenstandards oder Kopplung von Zusatzhardware.
Modellumfang/ Prozesssimulation	Bestimmte Effekte und Elemente können abgebildet werden, z. B. Kollisionen, Abtrag, Reibung, Vibrationen, Fluide, Erwärmung oder Verschleiß.
Skalierbarkeit	Es kann zwischen der Betrachtung einer Maschine, Anlage oder Fabrik umgeschaltet werden (Verkettung und Strukturierung von Modellen zu Gesamtsimulation).

Tabelle 6: Beispiele für Muss-Kriterien für die Auswahl eines Simulationswerkzeugs

den, damit die Durchführung der Pilotphase nicht durch dringliches operatives Geschäft in Verzug gerät. Ergänzende Expertise kann phasenweise aus den mechatronischen Disziplinen, dem Prozessmanagement und der IT-Abteilung eingebunden werden.

Auswahlkriterien für das Simulationswerkzeug definieren

Im nächsten Schritt müssen Auswahlkriterien für ein mögliches Simulationswerkzeug identifiziert und gewichtet werden. Die Kriterien sollten vom VIBN-Projektteam und weiteren erfahrenen Mitarbeitern erarbeitet werden. Es kann zwischen „Muss-Kriterien“ (Tabelle 6) und „Kann-Kriterien“ (Tabelle 7) unterschieden werden. Die VDI-Richtlinie 3633 [13] bietet eine Checkliste mit weiteren Kriterien für Simulationswerkzeuge. Die Kriterien sollten für die spätere Auswahl des Simulationswerkzeuges über einen Faktor gewichtet werden.

Betrachtung von technischen Schnittstellen und Austauschformaten der Simulationswerkzeuge

Die Schnittstellen und Austauschformate zwischen dem Simulationswerkzeug und anderen Werkzeugen des Engineerings (Abbildung 16) spielen bei der Auswahl eine wichtige Rolle, da auf Kompatibilität geachtet werden muss. Das potenzielle Simulationswerkzeug

sollte daher auf die Unterstützung der im Unternehmen eingesetzten Standards und Austauschformate¹³ überprüft werden.

Für eine aufwandsarme Modellierung eines Produktionssystems sollten möglichst viele bestehende Engineering-Daten (z. B. CAD Geometriedaten und Schaltpläne) verwendet werden. Die Simulationswerkzeuge stellen dafür Schnittstellen oder Funktionen für den **Import** zur Verfügung. Weiterhin entstehen im Engineering Simulationsmodelle in anderen Simulationswerkzeugen, welche bisher nicht in die VIBN-Simulationsmodelle übertragen werden. Erste Ansätze zur Übertragung und Kopplung bietet der Functional Mockup Interface Standard¹⁴, der bereits von einigen Simulationswerkzeugen unterstützt wird.

Für den **Export** von Ergebnissen und Informationen aus dem Simulationswerkzeug sind ebenfalls Schnittstellen vorhanden. Diese werden zur Bereitstellung der Ergebnisse und Informationen (z. B. Datenreihen und Testergebnisse) in das Engineering eingesetzt.

¹³ Der Leitfaden unterscheidet bei den Begriffen der Standards und Dateiformate nicht, ob es sich dabei um Normen, Konsortialstandards oder De-Facto Standards handelt.

¹⁴ <https://fmi-standard.org>.

Kann-Kriterien	Beschreibung
Vorhandene Modellbibliotheken	Modell- oder Komponentenbibliotheken werden angeboten, was den Modellierungsaufwand reduziert (z. B. Robotermodelle, Busklemmen, Antriebsmodelle).
Schnittstellen ins Simulationswerkzeug	Erfüllung von Standards zum Import, welche wiederkehrende Modellierungsaufgaben vereinfachen.
Schnittstellen aus dem Simulationswerkzeug	Möglichkeiten, Ergebnisse und Informationen aus dem Simulationswerkzeug zu exportieren (z. B. aufgezeichnete Signalverläufe).
API (Application Programming Interface)	Schnittstelle, um sich mit externen Softwarewerkzeugen anzukoppeln.
Erweiterungsschnittstelle	Möglichkeit, die Funktionalität oder Benutzeroberfläche durch eigene Plugins zu erweitern.
Versionsverwaltung	Das Simulationswerkzeug bietet die Möglichkeit einer Versionsverwaltung oder die Simulationsmodelle können in eine vorhandene Versionsverwaltung integriert werden.
Plugins für andere Tools	Vorhandene Plugins, mit denen sich das Simulationswerkzeug in vorhandene Tools des Unternehmens integriert, z. B. Mechanik (CAD/PDM), Elektrik (Stromlaufplanung).
Bedienkonzepte	Art und Weise, wie modelliert werden kann, z. B. CAD-Plugin, Blockschaltbild, Textbasiert, 3D/2D-Oberfläche.
Kosten	Anschaffungs-, Lizenz- und Schulungskosten sollen innerhalb eines bestimmten Budgets liegen.
Schulungen, Support	Möglichkeiten und Umfang an angebotenen Schulungen und Support zur Unterstützung bei der Modellierung die der Softwareanbieter bereitstellt.

Tabelle 7: Beispiele für Kann-Kriterien für die Auswahl eines Simulationswerkzeugs

Die **Kommunikationsschnittstelle** dient im XiL-System zur Verbindung von Simulationswerkzeug und Steuerungssystem.

Vorauswahl Simulationswerkzeug treffen

Vor der Durchführung des Pilotprojekts werden am Markt verfügbare Simulationswerkzeuge evaluiert. Dazu werden Informationen zu den Simulationswerkzeugen recherchiert. Außerdem ist es sinnvoll, sich durch Schulungen beim Softwareanbieter oder durch einen externen Dienstleister unterstützen zu lassen. Auf Basis der eingeholten Informationen werden Bewertungsmethoden wie z. B. die Nutzwert- oder Prioritätenanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Nutzwertanalyse wird für die gewichteten Muss- und Kann-Kriterien der Erfüllungsgrad für die einzelnen Simulationswerkzeuge bestimmt. Anschließend wird das Simulationswerkzeug mit dem höchsten Erfüllungsgrad für das Pilotprojekt ausgewählt. Anhängig vom geplanten Budget, kann das Pilotprojekt auch mit mehreren Simulations-

werkzeugen gestartet werden. Dies bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Simulationswerkzeuge im direkten Vergleich praxisbezogen zu evaluieren. Im Budget sind dann mehrfach Lizenzkosten, Schulungen und Zeitaufwand zu berücksichtigen.

Pilotprojekte durchführen

Bei der Auswahl eines Pilotprojekts sollte darauf geachtet werden, ein für das Unternehmen typisches Projekt zu identifizieren, welches die häufigsten Herausforderungen im Engineering und bei der Inbetriebnahme beinhaltet (siehe Best Practice¹⁵ zum „Vorgehen zur Auswahl eines VIBN-Pilotprojekts und -Tools“). Weitere Kriterien zur Auswahl sind die Komplexität und der Zeitplan. Die Komplexität beschreibt den technischen Anspruch, die Herausforderungen und die Risiken des Projektes. Der Zeitplan

¹⁵ Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

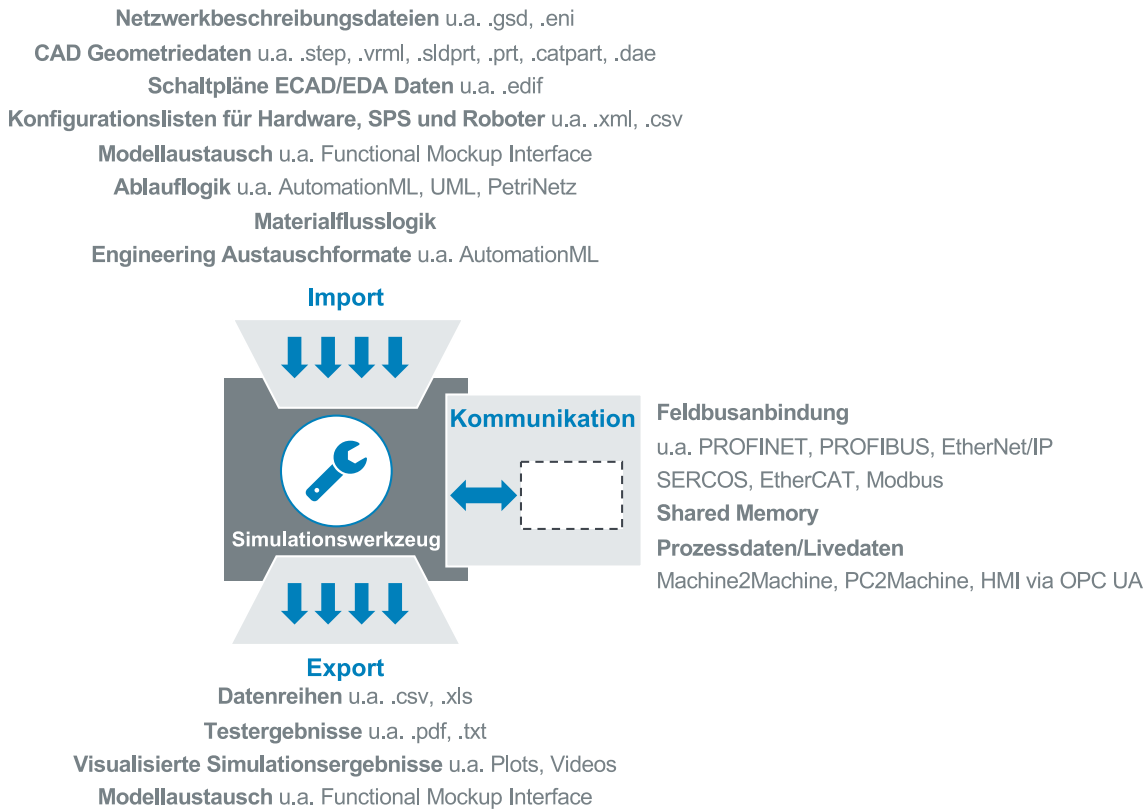


Abbildung 16: Exemplarische Schnittstellen und (Austausch-)Formate für Simulationswerkzeuge für Import, Kommunikation und Export

stellt den Projekterfolg in Abhängigkeit zum zeitlich reibungslosen Ablauf dar. Projekte mit einem kritischen Zeitplan, die zusätzlich eine hohe Komplexität aufweisen, sind für VIBN prädestiniert. Für die Pilotphase sind diese Projekte jedoch zu vermeiden, da das Risiko besteht, dass bei Problemen mit der noch neuen VIBN das komplette Projekt scheitert und nicht ausreichend Kapazität besteht, die VIBN zu evaluieren¹⁶. Empfehlenswert für die Pilotphase sind Projekte mit mittlerer Komplexität und einem nicht kritischen Zeitplan. Diese Projekte zeichnen sich dadurch aus, dass der Einsatz der VIBN bereits ab dem ersten Projekt einen Mehrwert liefert und Fehler, die im Lernprozess passieren können, nicht

den Gesamterfolg des Projekts gefährden. Wenn keine entsprechenden Projekte in den beschriebenen Grenzen im Unternehmen vorhanden sind, kann zunächst ein Teilprojekt ausgewählt werden. Dadurch werden die Komplexität und die Zeitschiene, passend für ein Pilotprojekt, reduziert.

Ein Messedemonstrator kann beispielweise ein sinnvolles Pilotprojekt darstellen, da bei Messeprojekten zwar ein harter zeitlicher Anschlag existiert, die Komplexität aber meist reduziert ist. Bei externen Projekten ist darauf zu achten, dass der Betreiber offen für neue Ansätze ist und eine langjährige vertrauensvolle Partnerschaft besteht. Die Nutzung von VIBN im Projekt ist in offener Kommunikation mit dem Betreiber zu planen und auftretende Verzögerungen und Zusatzaufwände in der Einführungsphase mit zu erwartenden Vorteilen abzugleichen.

¹⁶ Die Hinzunahme eines Experten oder Dienstleisters für VIBN ermöglicht es, ein komplexeres und kritischeres Projekt auszuwählen oder auch ein zu Scheitern drohendes Projekt mit VIBN zu unterstützen.

Entscheidung zum Simulationswerkzeug treffen

Erst nach dem Abschluss des Pilotprojekts ist eine endgültige Bewertung des Simulationswerkzeugs möglich. Der bisherige Erfüllungsgrad der Kriterien wird um die gewonnenen praktischen Erkenntnisse ergänzt. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass neben der reinen Erfüllung eines Kriteriums auch der Aufwand zur Erfüllung Berücksichtigung findet. Beispielsweise unterscheiden sich Simulationswerkzeuge stark im Aufwand zum automatischen Import von Engineering-Daten. Neben dem reinen Erfüllungsgrad ist auch die Akzeptanz des Simulationswerkzeugs im Projektteam zu evaluieren.

Wurden mehrere Simulationswerkzeuge im Pilotprojekt eingesetzt, kann jetzt im direkten Vergleich die Auswahl getroffen werden. Wenn nur ein Simulationswerkzeug eingesetzt wurde, ist die Entscheidung anhand des Erfüllungsgrads der Auswahlkriterien zu treffen. Ist der vorgegebene Erfüllungsgrad nicht erreicht, oder die Akzeptanz nicht gegeben, ist die Entscheidung gegen das Simulationswerkzeug zu fällen. In diesem Fall sind die Schritte „Vorauswahl Simulationswerkzeug treffen“ und „Pilotprojekt durchführen“ erneut zu durchlaufen.

VIBN-Begleitdokument erstellen

Während der Pilotphase ist ein internes VIBN-Begleitdokument zu erstellen und während der Bearbeitung der Phase zu ergänzen. Dieses Dokument unterstützt das Projektteam bei der erfolgreichen Planung, Durchführung und Dokumentation der Pilotphase sowie der weiteren Begleitung des VIBN-Prozesses in der Produktivphase. Für den Aufbau des Dokuments haben sich folgende Inhaltspunkte etabliert:

- Beschreibung der Motivation für VIBN im Unternehmen und des Fokus bei der Durchführung
- Festlegung wer, wann, welche Daten zur Durchführung der VIBN benötigt
- Festlegung des Ablageorts und -formats für Dateien, Dokumente und Ergebnisse
- Festlegung der Abläufe im VIBN-Prozess – inklusive Phasen und Meilensteinen
- Dokumentation von Erkenntnissen während der VIBN zur Übertragung auf die reale IBN

Die Fertigstellung des VIBN-Begleitdokument beendet die Pilotphase und dient als Startpunkt für die Produktivphase.

Weitere Unterstützung bei der Durchführung eines Pilotprojekts liefert die VDI/VDE-Richtlinie 3693 [7]. Diese stellt ein detailliertes Vorgehen zur Durchführung eines Pilotprojekts bereit, indem neben den Phasen eines Pilotprojekts auch die daran beteiligten Rollen aus dem Unternehmen identifiziert werden. In Abbildung 17 können die beschriebenen Phasen eines Pilotprojekts nachvollzogen werden.

Produktivphase – mittel- und langfristige Planung und Etablierung

Die Ziele der Produktivphase sind den bisher separierten Prozess der VIBN mit dem Engineering zusammenzuführen. Ein erster Schritt zur Etablierung der VIBN, ist die mittel- und langfristige Planung der strategischen Ziele. Dazu werden die bereits getätigten und geplanten Investitionen in ein Verhältnis zu qualitativem und quantitativem Nutzen gesetzt und strategisch bewertet. Basis der Bewertung ist die Kosten-Nutzen-Abschätzung, mit Hilfe der tatsächlich angefallenen Kosten und Nutzen aus der Pilotphase. Diese wird mit strategischen Fragenstellungen kombiniert:

- Welche bisher nicht betrachteten Nutzen können aus einer Zusammenführung von VIBN und Engineering und einer Effizienzsteigerung der VIBN erreicht werden?
- Wie viel Personal und wie viel Struktur kann und will sich das Unternehmen für die VIBN leisten?
- Wie ist die Akzeptanz von VIBN im Unternehmen und kann bzw. muss diese noch erhöht werden?
- Wie früh im Engineering kann und muss die VIBN beginnen?

Ein weiterer Schritt zur Einführung der VIBN ist die Anpassung der bestehenden Unternehmensstruktur. Dafür werden die bisher in der Pilotphase beteiligten Ressourcen als fester Bestandteil in die Unternehmensstruktur überführt und weitere Ressourcen geschaffen. Bei der Anpassung der Unternehmensstruktur helfen folgende Handlungsempfehlungen:

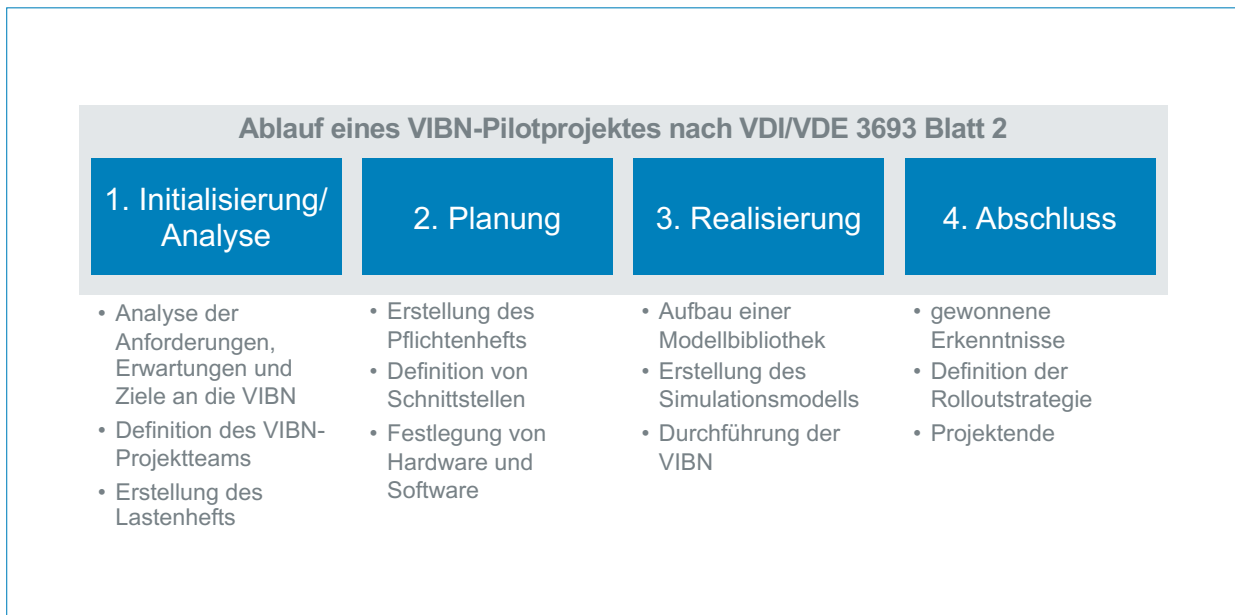


Abbildung 17: Ablauf eines Pilotprojekts zur Evaluation der VIBN im Unternehmen, aus VDI/VDE 3693 Blatt 2 [7]

- 1. Schlüsselpositionen mit Verantwortung schaffen, welche die VIBN im Unternehmen vorantreiben, diese jedoch auch gegenüber der Geschäftsführung und Management verantworten.**
- 2. VIBN-Abteilungen und -strukturen schaffen und in der Unternehmensstruktur eingliedern (siehe Best Practice¹⁷ „Standortübergreifende Zusammenarbeit bei der virtuellen Inbetriebnahme“)**
- 3. Personen im VIBN-Team integrieren welche bereits praktische Erfahrungen mit Inbetriebnahme besitzen.**
- 4. Räumlichkeiten als Labore mit VIBN-Testaufbauten zur Verfügung stellen, um die Prozesse örtlich zu bündeln und den interdisziplinären Austausch zu fördern.**

VIBN im Engineering verankern

In der Produktivphase wird die VIBN über definierte Zeitpunkte im Engineering verankert, siehe Abbildung 18. Diese Verankerungen sind über vorab definierte **Meilensteine** und ein **Quality-Gate** realisierbar.

Die **Meilensteine** dienen zur Synchronisation der unterschiedlichen Disziplinen zu einem definierten Zwischenziel. Die VIBN akkumuliert die Zwischenstände zu einem gemeinsamen Simulationsmodell und bietet so die Möglichkeit, die jeweiligen Fortschritte sichtbar zu machen. Im Falle einer Asynchronität zwischen den Disziplinen sind Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Das **Quality-Gate** dient dazu, die Qualität des Gesamtsystems, insbesondere des Softwareanteils, sicherzustellen. Die VIBN macht die Qualität durch die dokumentierten Tests am Simulationsmodell mess- und bewertbar. Ein definierter Schwellwert der erfolgreichen Testausführung dient als Schranke für den Beginn der Inbetriebnahme am realen System. Im Falle eines Scheiterns der Tests an diesem Quality-Gate sind Gegenmaßnahmen einzuleiten. Neben dem Primärziel, die Software abzusichern, ist darauf zu achten, dass bei jedem gefundenen Fehler die zugeliferten Ergebnisse aller Disziplinen kritisch geprüft werden, um eine zielgerichtete Ursachenermittlung sicherzustellen. Die anschließende Fehlerbehebung findet in der Softwareabteilung oder der entsprechenden Fachabteilung statt. Eine praktische Umsetzung der Integration eines VIBN-Prozesses und der daraus

¹⁷ Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

resultierende Nutzen findet sich im Best Practice¹⁸ zur „Durchlaufzeitverkürzung durch integrierte VIBN-Prozesse“.

VIBN effizienter gestalten

Der wirtschaftliche Erfolg in der Produktivphase der VIBN ist abhängig von der Reduktion der Aufwände, insbesondere beim Erstellen der Simulationsmodelle und Testaufbauten, sowie bei der Testfallerstellung und Testausführung. Im Folgenden werden Methoden vorgestellt, welche die Effizienz von VIBN steigern können und den Reifegrad zur integrierten VIBN weiter erhöhen.

Aufbau einer Modellbibliothek

Bereits in der Pilotphase werden erste Simulationsmodelle des Produktionssystems entwickelt sowie der Aufwand für die Modellierung identifiziert. Für eine effiziente VIBN

sollte die mehrfache Modellierung gleicher Komponenten und Teilsysteme des Produktionssystems vermieden werden. Durch die Einführung eines Bibliothekskonzepts wird die Entwicklung der virtuellen Teilmodelle getrennt von der Modellierung des VIBN-Simulationsmodells im Projektgeschäft betrieben. Wie in Abbildung 19 dargestellt entsteht ein Simulationsmodell projektbezogen durch die Projektierung aus der Bibliothek.

Die Nutzung einer Modellbibliothek ist **sinnvoll**, wenn...

- ... im Engineering bereits Bibliotheken mit mechatronischen Komponenten verwendet werden.
- ... viele gleiche oder ähnliche (virtuelle) Komponenten in aufeinanderfolgenden Projekten eingesetzt werden.

Die Nutzung einer Modellbibliothek ist wenig sinnvoll, wenn es bisher kein etabliertes Bibliothekskonzept im Engineering gibt und eine Strukturierung des Produktportfolios erst

18 Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

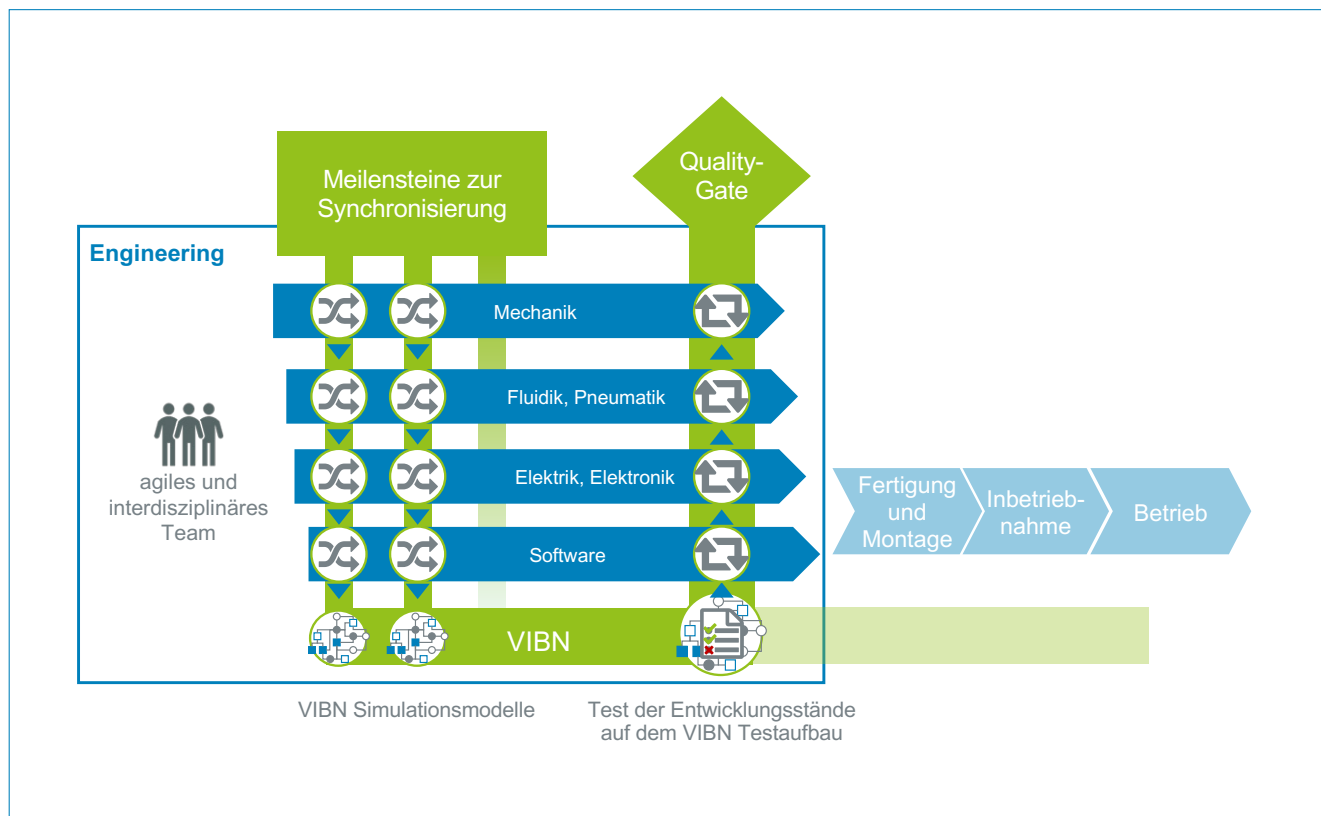


Abbildung 18: VIBN als Meilensteine zur Synchronisierung und Quality-Gate im Engineering verankert

erarbeitet werden muss. Weiterhin ist es wenig sinnvoll eine Modellbibliothek zu nutzen, wenn im Engineering fast ausschließlich neue Komponenten entwickelt werden.

Automatisierung der Modellgenerierung

Wenn in den VIBN-Projekten trotz einer umfangreichen Modellbibliothek viele Modellierungsschritte wiederholt und in ähnlicher Form ausgeführt werden müssen, ist es effizienter, Methoden zur automatischen Modellgenerierung in die VIBN zu integrieren. Modellgenerierung eignet sich grundsätzlich für Modelle, die aus einer hohen Anzahl von Teilmodellen aufgebaut sind und außerdem parametrisiert und miteinander verknüpft werden müssen.

Bei der automatischen Modellgenerierung muss ein Regelwerk entwickelt werden, das beschreibt, wie die einzelnen Komponenten zu kombinieren sind. In vielen Bereichen sind kreative und nicht automatisierbare Prozesse erforderlich. Daher sollte stets kritisch betrachtet werden, welche Modellierungsschritte mit sinnvollem Aufwand automatisiert werden. Wenn nicht alle Modellierungsschritte automatisierbar sind, wird eine Modellgenerierung als hybride Lösung eingesetzt. Hierbei werden Teile manuell erstellt (z. B. das Auswählen der Teilmodelle passend zur geforderten Funktionalität) und geeignete Aufgaben am Modell

automatisch generiert (z. B. die Verlinkung von Teilmodellen unter Nutzung einer Namenskonvention). Eine übergreifende Umsetzung findet sich im Best Practice¹⁹ „Steigerung der VIBN-Effizienz: Automatisierte Bereitstellung von Verhaltensmodellen“.

Ähnlich wie bei der Modellbibliothek sollten die eigenen Prozesse als Entscheidungshilfe für die automatische Modellgenerierung betrachtet werden.

Die Modellgenerierung ist **sinnvoll**, wenn...

- ... in weiteren Disziplinen des Engineerings Lösungen (z. B. Bauteile der Mechanik in CAD-Modellen oder Elektrik in Stromlaufplänen) automatisch generiert werden.
- ... eine Modellbibliothek mit virtuellen Komponenten im Einsatz ist.
- ... die eigenen Produkte meist aus konfigurierbaren Varianten entstehen.

Eine praktische Umsetzung der Integration von CAD-Daten in der VIBN findet sich im Best Practice¹⁹ „Steigerung der VIBN-Effizienz: Integration von CAD-Daten über ein Produktdatenmanagement System“.

¹⁹ Siehe separates Dokument „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“.

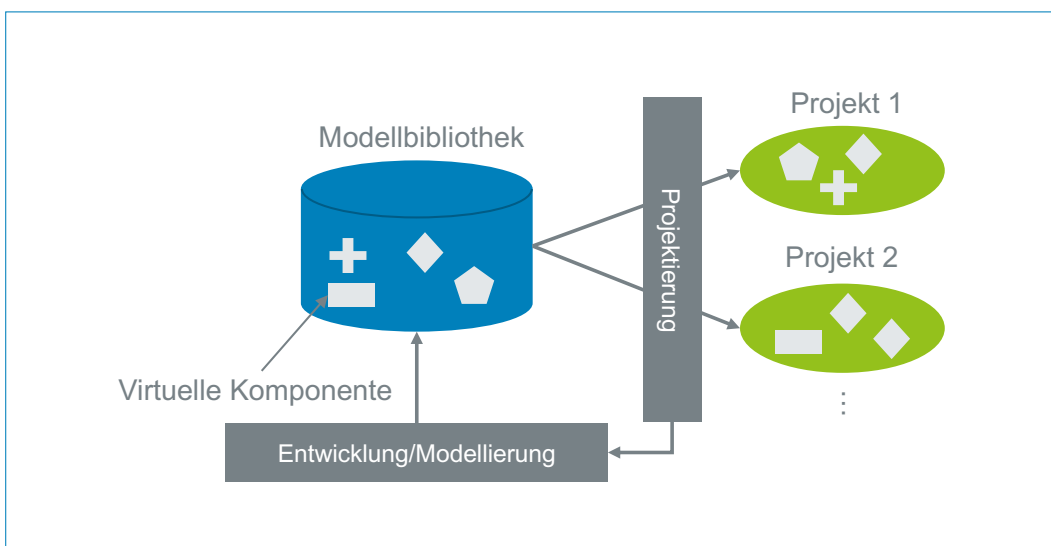


Abbildung 19: Vorgehen bei der Nutzung einer Modellbibliothek mit virtuellen Komponenten [14]

Automatisierung der Testausführung

Die Testautomatisierung ist eine Methode aus dem Bereich der Softwareentwicklung für Hochsprachen und wird eingesetzt, um die Testaktivitäten zu optimieren und Testaufwände zu minimieren. Der virtuelle Testaufbau der VIBN ermöglicht es, die Methode der Testautomatisierung auch für die Softwareentwicklung im Maschinen- und Anlagenbau einzusetzen.

Das Durchführen der Tests nach dem Prinzip „Bedienen-Beobachten-Protokollieren“ ist ein zeitaufwändiger, manueller Prozess, mit sich wiederholenden Schritten. Mithilfe von virtuellen Steuertafeln und der Möglichkeit, Signale aufzuzeichnen, wird die Testausführung und Testauswertung automatisierbar. Die Testautomatisierung umfasst die Testkonfiguration und das Testmanagement (siehe Abbildung 20). Für die Aufgaben wird jedoch ein weiteres Softwarewerkzeug benötigt [15].

Durch die Automatisierung von Tests wird eine Steigerung der Testabdeckung bei gleichzeitiger Reduktion des manuellen Testaufwands erreicht. Nacht- und Wochenendzeiten können somit zusätzlich zur Ausführung von Tests genutzt werden, wodurch sich die Gesamtzeit für das Testen steigern lässt. Nach einer erfolgreichen Etablierung der VIBN können sich Tester, Inbetriebnehmer und Entwickler anhand folgender Regeln für den Einsatz einer Testautomatisierung entscheiden:

Testautomatisierung ist **sinnvoll**, wenn...

- ... ein hoher manueller Aufwand beim Testen und Dokumentieren besteht.
- ... häufig Regressionstests durchgeführt werden.
- ... bisher bei Projekten aus zeitlichen Gründen nicht alle Tests am Ende durchführbar waren.
- ... sich die Testfälle über verschiedene Projekte hinweg wiederholen.
- ... eine höhere Testabdeckung helfen kann, die Softwarequalität/Systemqualität zu erhöhen.

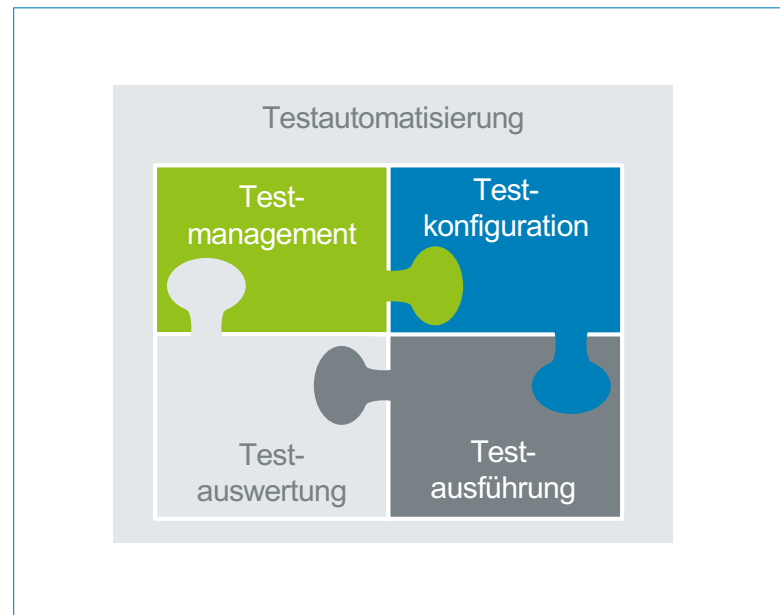


Abbildung 20: Teilbereiche von Testautomatisierung

Für die Methoden Modellbibliothek, automatische Modellgenerierung und Testautomatisierung der Produktivphase ist es gleichermaßen entscheidend, dass das Simulationswerkzeug diese unterstützt. Wichtig für die Testautomatisierung ist eine Schnittstelle für den Remotezugriff, sodass die Bedien- und Beobachtungstätigkeiten des Inbetriebnehmers automatisiert werden können.

Ausblick

Dieses Kapitel bietet eine Sammlung weiterer Lösungsideen zu den Fragen:

- Welche weiteren Einsatzmöglichkeiten bieten die aufgebauten XiL-Systeme?
- Wie können Daten aus dem realen Prozess und Simulationsmodelle miteinander verknüpft werden?
- Wie werden Änderungen nach dem Engineering einer Komponente oder Anlage weiterhin in den Simulationsmodellen gepflegt und damit in einer neuen Entwicklung berücksichtigt?

Allen aufgezeigten Fragen kann mit neuen digitalen Methoden, Werkzeugen und Modellen begegnet werden. Die VIBN ist als erster Schritt auf dem Weg in ein Digitales Engineering zu verstehen. Sinnbildlich stellt Abbildung 21 diesen Sachverhalt dar. Im Folgenden wird auf die in der Abbildung 21 dargestellten Themen, rund um das Digitale Engineering, eingegangen.

Ein **Data Backbone**²⁰ ist zur Unterstützung des Lebenszyklus einer Komponente oder Anlage erstrebenswert. Der Umfang eines Data Backbones kann unterschiedlich definiert werden. Einen Anhaltspunkt bietet das Konzept des Digitalen Zwillings. Hierin wird berücksichtigt, welche Datensätze, hinsichtlich ihrer Informationen, geeignet sind, um eine Komponente selbst zu beschreiben. Davon ausgehend ist das Ziel, die Produkt-, Anlagen-, und Prozessdaten griffbereit und digital vorzuhalten. Insbesondere bei Änderungen an Komponenten müssen diese nachvollziehbar und für weitere, abhängige Komponenten, sichtbar aufgeführt werden. Einen definierten Blick auf die gesammelten Daten kann über die Ausprägung eines Simulationsmodells erfolgen.

²⁰ Ein Data Backbone beschreibt allgemein die Ansammlung unterschiedlicher Daten und Informationen an einer Stelle bzw. Knoten im Netzwerk.

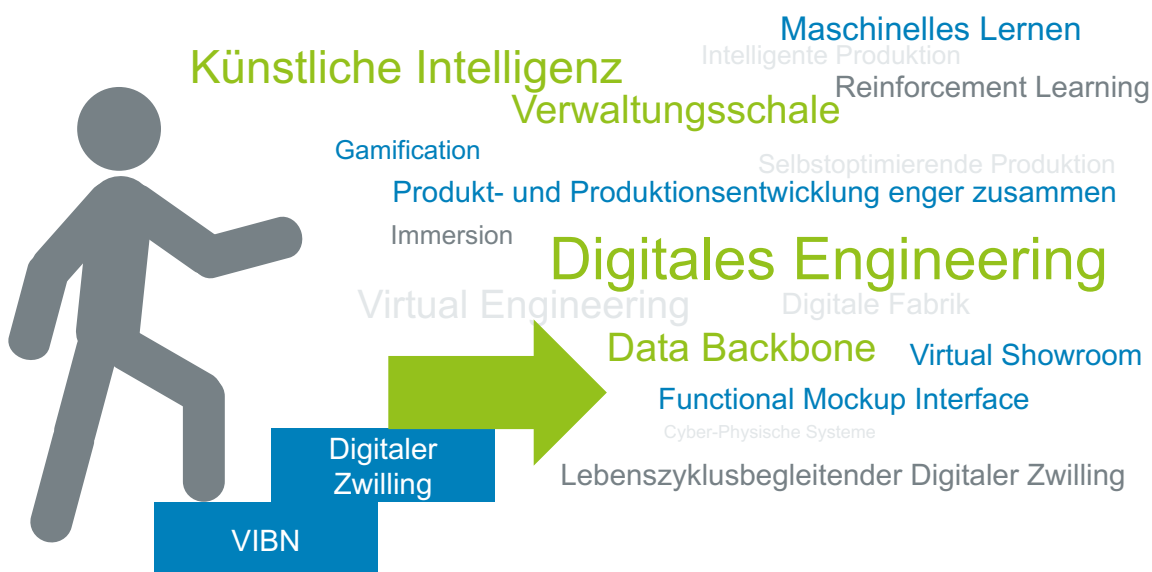


Abbildung 21: Ausblick auf die Entwicklungsmöglichkeiten, welche nach der VIBN bestehen: Der Weg führt über einen Digitalen Zwilling in ein digitales Engineering.

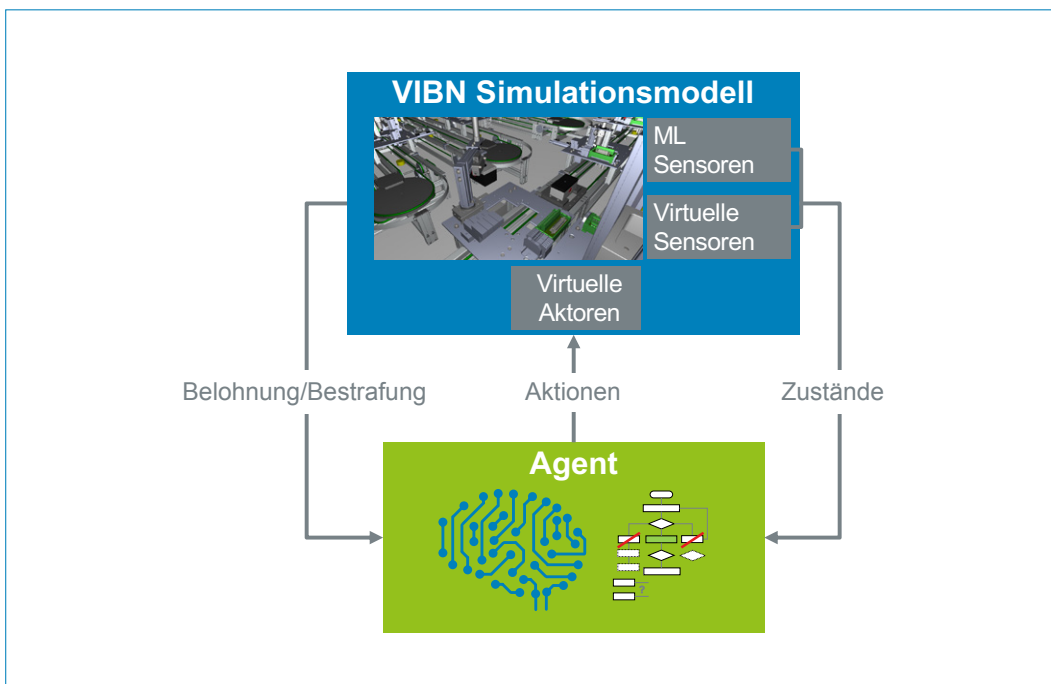


Abbildung 22: Reinforcement Learning Ansatz mit den Testkonfigurationen als Lernumgebung [16]

Die Verwendung der Simulationsmodelle beschränkt sich in vielen Fällen auf die VIBN. Aktuelle Bestrebungen wollen die Nutzung und Entstehung der Simulationsmodelle auf den gesamten Lebenszyklus der Komponente, Maschine oder Anlage ausweiten. Die Simulation kann im Vertrieb Einsatz finden, indem die Produkte in einem **Virtual Showroom** präsentiert werden. Nach dem Engineering kann durch ein umfassendes **virtuelles Schulungskonzept** der Nutzen der Modelle verlängert werden. Dabei können die späteren Bediener an der virtuellen Anlage geschult oder Servicetechniker im eigenen Haus auf Einsätze vorbereitet werden.

Ein weiteres Einsatzgebiet der Simulationsmodelle ergibt sich durch die Kopplung mit Methoden der **Künstlichen Intelligenz**. Steuerungen können sich durch Ansätze des **Maschinellen Lernens (ML)** selbst programmieren und optimieren. In diesem Bereich stellt die VIBN eine interessante Plattform für das Maschinelle Lernen dar.

In vielen zumeist noch nicht kommerziellen Bereichen hat z. B. das **Reinforcement Learning** positive Ergebnisse erzielt. Dabei agiert ein lernfähiger Agent in einer Umgebung,

deren Zustand er wahrnimmt, indem er definierte Aktionen durchführen kann. Eine vordefinierte Belohnungsfunktion gibt Rückmeldung über die Qualität der Aktion. Der Agent lernt, indem er versucht, die Belohnungsfunktion zu maximieren und damit möglichst optimal innerhalb der Umgebung agiert. Die Modelle der VIBN sind eine dafür geeignete Grundlage für die Lernumgebung. Der in Abbildung 22 dargestellte Aufbau eines Reinforcement Learning Ansatzes ist vom Prinzip sehr ähnlich zu den im Abschnitt „Aufbau und Nutzung des virtuellen Testaufbaus“ vorgestellten XiL-Systeme der VIBN. Der Agent ersetzt oder programmiert dabei das Steuerungssystem und erweitert so die Testumgebung in eine Umgebung, in der die Steuerung automatisiert entwickelt werden kann [16].

Weitere Methoden, neben der Künstlichen Intelligenz, sind die Mensch-Technik-Interaktion und **Immersion**. Das als Eintauchen in eine virtuelle Welt bezeichnete Konzept wird immer interessanter, je detailtreuer und realitätsnaher die Simulationsmodelle werden. Neue AR/VR-Technologien ermöglichen diese neue Art des Eintauchens durch neue Ansätze zur Wahrnehmung und Interaktion. Gekoppelt mit der Immersion könnten in Zukunft Ansätze der

Gamification eingesetzt werden. Dabei wird der Benutzer bei seiner Tätigkeit am virtuellen Modell zusätzlich motiviert und ausgehend von seinem Wissensstand unterstützt.

Das Engineering wird in den Bereichen Produkt, Prozess und Betriebsmittel durch virtuelle Methoden unterstützt. Der Produktentwicklungsprozess mit den virtuellen Werkzeugen und Methoden (CAx) ist aktuell jedoch noch nicht durchgängig in den virtuellen Produktionsentwicklungsprozess (VIBN) integriert. In der Zusammenführung der beiden Prozesse erwächst durch gekoppelte, digitale Engineeringprozesse ein großes Synergiepotenzial. Wenn auf den virtuellen Betriebsmitteln über virtuelle Prozesse ein virtuelles Produkt entsteht, bei dem man Rückschlüsse über z. B. die Qualität ziehen kann, wachsen **Produkt- und Produktionsentwicklung** enger zusammen.

Wichtige Grundvoraussetzung für die digitale und gekoppelte Produkt- und Produktionsentwicklung ist die lückenlose virtuelle Abbildung aller Komponenten, Prozesse und Daten. Anbieter von Komponenten, Systemen und Dienstleistungen werden neben dem realen Asset ihre Produkte, auch digital Modelle zur Verfügung stellen müssen. Die Verantwortung, ein genaues und brauchbares Modell zu liefern, um beispielsweise eine VIBN-Simulation durchzuführen, wird vom Nutzer zunehmend in Richtung Anbieter wandern. Zum jetzigen Zeitpunkt fehlen hauptsächlich standardisierte Datenaustauschformate für die Teilmodelle. Der **Functional Mockup Interface** Standard ist ein erster Ansatzpunkt für ein Zusammenwachsen von Simulationswerkzeugen. Aktuell sind diese jedoch auf die Verwendung in der Simulation beschränkt.

Checkliste für die Einführung von VIBN im eigenen Unternehmen

Kurzfristige Planung

- Strategische Ziele für das Unternehmen definieren und messbare Zielgrößen anhand der Nutzenpotenziale festlegen
- Auswahlkriterien für ein Simulationswerkzeug definieren
- Sondieren des Marktes für Simulationswerkzeuge
- Auswählen des Simulationswerkzeugs und absolvieren von Schulungen
- Pilotprojekt im Unternehmen identifizieren
- Simulationswerkzeug in die Prozesse des Engineerings integrieren
- Pilotprojekt planen
- Projektteam zusammenstellen
- Arbeitsplätze einrichten
- Pilotprojekte durchführen
- Erfolg/Reifegrad der Pilotphase bewerten – Weitere Ziele ableiten
- Begleitdokument zur Beschreibung des unternehmensspezifischen VIBN-Prozesses erstellen:
 - Motivation und Ziele
 - Benötigte Daten und Dokumente
 - Ablageorte für Dokumente und Ergebnisse

Zusammenstellung des Projektteams

- Teamleitung sowie deren Verantwortlichkeiten und Befugnisse festlegen
- Experte aus dem Bereich Inbetriebnahme auswählen
- Experte aus dem Bereich Softwareentwicklung (Testen, Strukturieren, Entwickeln, Versionieren) auswählen
- Experte aus dem Bereich Entwicklung und Konstruktion (mechatronische Disziplinen) auswählen
- Expertise in der technischen Modellierung und dem Umgang mit dem Simulationswerkzeug aufbauen

Strukturen und Arbeitsplätze

- Lizenzen für Simulationswerkzeug besorgen
- Benötigte Hardware für virtuelle Testaufbauten identifizieren und beschaffen
- Labor- und Arbeitsplätze bereitstellen und in die IT-Struktur des Unternehmens eingliedern
- Verantwortlichen für die Laborplätze benennen
- Ggfs. mobile Labore zur Unterstützung der Inbetriebnahme beim Kunden anschaffen

Strategische Planung

- Ziele rekapitulieren und erweitern
- Verankern der VIBN im Unternehmen: Projektteam und Strukturen als festen Bestandteil etablieren
- Erweiterung des VIBN-Prozesses inklusive Dokumentation im Begleitdokument
 - Methoden zur Verankerung des VIBN-Prozesses analysieren und einsetzen (z. B. Projektphasen, Meilensteine, Quality-Gates)
 - Methoden zur Effizienzsteigerung analysieren und einsetzen (z. B. Modellbibliothek, Automatische Modellgenerierung, Testautomatisierung)
- Schulungskonzept mit Beispielprojekt für die interne Weiterbildung erstellen

Vision Digitales Engineering

- Identifikation von weiteren Anwendungsszenarien (virtuelle Schulungskonzepte, Kopplung Produkt-Produktionsentwicklung, Digitaler Datenbackbone)

Quellenverzeichnis

- [1] H. Brüggemann und P. Bremer, Grundlagen Qualitätsmanagement – Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- [2] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov, Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Springer, 2014.
- [3] S. Röck, Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen, Stuttgart: Jost-Jetter Verlag, 2007.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), VDI 4499 Digitale Fabrik Blatt 2 – Digitaler Fabrikbetrieb, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [5] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI); Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE), VDI/VDE 3693 Blatt 1 Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar, Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [6] M. Shafto, M. Conroy, R. Doyle, E. Glaessgen, C. Kemp, J. LeMoigne und L. Wang, „DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap – Technology Area 11,“ NASA, Washington, USA, 2010.
- [7] VDI/VDE, 3693 Blatt 2 Virtuelle Inbetriebnahme – Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen, Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [8] R. Drath, S. Malakuti, S. Grüner, J. A. Grothoff, C. A. Wagner, U. Epple, M. Hoffmeister und P. Zimmermann, „Die Rolle der Industrie 4.0 „Verwaltungsschale“ und des „digitalen Zwillings“ im Lebenszyklus einer Anlage – Navigationshilfe, Begriffsbestimmung und Abgrenzung,“ in VDI-Kongress Automation 2017, Baden-Baden, 2017.
- [9] M. Klein, B. Maschler, A. Zeller, B. Ashtari Talkhestani, N. Jazdi, R. Rosen und M. Weyrich, „Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings,“ in VDI-Kongress Automation 2019, Baden-Baden, 2019.
- [10] D. Labisch, C. Leingang, O. Lorenz, M. Oppelt, B.-M. Pfeiffer und F. Pohmer, „ Evolution eines Digital Twin am Beispiel einer Ethylen-Anlage – Konzept und Umsetzung,“ atp magazin, Nr. 06-07, pp. 70-84, 2019.
- [11] J. Schumacher und J. Kletti, Die perfekte Produktion – Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT), Berlin: Springer Verlag, 2014.
- [12] VDMA Software und Digitalisierung, „Simulation und Visualisierung – Erste Ergebnisse der Trendumfrage,“ [Online]. Available: https://sud.vdma.org/documents/15012668/20460216/Trend-Analyse-Simulation_Internet_1505303416307.pdf/9021347b-0670-4d6b-aaed-e1409d9e2d13. [Zugriff am 3 Juli 2020].
- [13] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), 3633 Blatt 4 Auswahl von Simulationswerkzeugen – Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien, Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [14] G. Wünsch, Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme, München: Herbert Utz Verlag, 2008.
- [15] K. Kübler und A. Verl, „Testautomatisierung im Kontext der virtuellen Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen,“ in Industrie 4.0 – Visionen der Steuerungstechnik/ im MES-Umfeld, Düsseldorf, VDI Verlag, 2016, pp. 16-27.
- [16] F. Jaensch, A. Csiszar, A. Kienzlen und A. Verl, „Reinforcement Learning of Material Flow Control Logic using,“ in Artificial Intelligence for Industries, Laguna Hills, CA, USA, 2018. <http://www.industrialdigitaltwin.org>

Projektpartner / Impressum

VDMA

Forum Industrie 4.0

Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
Telefon +49 69 6603-1939
E-Mail industrie40@vdma.org
Internet industrie40.vdma.org

Verantwortlich

Dr. Christian Mosch, VDMA-Forum Industrie 4.0
Etienne Axmann, VDMA Robotik + Automation

Inhaltliche Beiträge

Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
(ISW) der Universität Stuttgart
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Dipl.-Ing. Karl Kübler
Florian Jaensch, M.Sc.

RIF Institut für Forschung und Transfer e.V.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Dr. Ralph Richter
Fabian Nöhning, M.Sc.,
Thorbjörn Borggräfe, M.Sc.

Industriebeirat VIBN

Audi; Mross, Björn
BMW; Dr. Tekouo, William
Centigrate GmbH; Lutsch, Clemens
Eckelmann AG; Simon, Roland
Festo; Kuhlbusch, Walter
Gebhardt; Berner, Rafael
Hahn Automation; Lesniak, Ingo
HEITEC; Pieloth, Roman
HTWK Leipzig; Prof. Dr. Jäkel, Jens
ISG Stuttgart; Dr. Daniel, Christian
Jetter; Schwips, Steffen
KUKA; Kirner, Thomas
machineering; Wünsch, Georg
MAG; Dr. Berger, Manfred
Magic Software Enterprises; Bleichner, Markus
Rex AT; Rex, Matthias
SMC; Prang, Oliver
TH Ingolstadt; Müller, Ralph
TH Nürnberg; Prof. Dr. Schmidt-Vollus, Ronald
Trumpf; Dr. Renz, Bernd
Wächter Packautomatik; Förster, Robert
Zimmer Group; Jänchen, Peter

Design und Layout

VDMA Verlag GmbH

Erscheinungsjahr

2020

Copyright

VDMA,
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeug-
maschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
RIF Institut für Forschung und Transfer e.V.

Bildnachweise

Titelbild: Shutterstock
Seite 1: VDMA
Seite 3: Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und Fertigungs-
einrichtungen (ISW),
RIF Institut für Forschung und
Transfer e.V.
Seite 6: HEITEC AG + Institut für Steuerungs-
technik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW)
Seite 8: HEITEC AG + stockphoto
Seite 11: Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und Fertigungs-
einrichtungen (ISW)
Seite 35: Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und Fertigungs-
einrichtungen (ISW)

Hinweis

Die Verbreitung, Vervielfältigung und öffentliche
Wiedergabe dieser Publikation bedarf der Zustim-
mung des VDMA und seiner Partner. Auszüge der
Publikation können im Rahmen des Zitatrechts
(§ 51 Urheberrechtsgesetz) unter Beachtung des
Quellenhinweises verwendet werden.

VDMA**Forum Industrie 4.0**

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1810

E-Mail industrie40@vdma.org

Internet industrie40.vdma.org

**Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW)****Universität Stuttgart**

Seidenstraße 36

70174 Stuttgart

Internet www.isw.uni-stuttgart.de

RIF**Institut für Forschung und Transfer e.V.**

Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20

44227 Dortmund

Internet www.rif-ev.de