

# Best Practices in der Produktentwicklung: Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen

## Einführung

In diesem White Paper wird der Einsatz von Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen als Best Practice zur Optimierung von Konstruktionsentscheidungen zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungszyklus untersucht.

Sie erhalten einen Überblick über die Vorteile von Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen für bestimmte Herausforderungen in der Elektro- und Mechanik-Konstruktion sowie im Bauingenieurwesen. Für jeden dieser Bereiche wird ein anderes Szenario vorgestellt, in dem die Stärken von Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen mithilfe der von Mathcad® bereitgestellten Funktionen optimiert werden.

Durch die Einhaltung dieser optimalen Vorgehensweise können Konstruktionsentscheidungen schneller und in dem Wissen getroffen werden, dass alle geeigneten Optionen ausgewertet wurden. Bessere Konstruktionsentscheidungen zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungszyklus sorgen für folgende Vorteile:

- Kürzere Time-to-Market, weniger Risiken
- Mehr Kreativität in der technischen Entwicklung durch Ausloten von mehr Produktentwürfen in kürzerer Zeit
- Erreichen des angestrebten Verhaltens in der Praxis durch optimierte Produktentwürfe
- Niedrigere Produkt-, Garantie- und Entwicklungskosten

## Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen: Best Practice zur Verbesserung früher Konstruktionsentscheidungen

Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen sind eine optimale Vorgehensweise, die frühe Konstruktionsentscheidungen verbessert und damit dazu beiträgt, die Kosten im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses zu senken. Ingenieure legen mithilfe von mathematischen Modellen Leistungsprofile und Tradeoff-Kurven fest, um auf Anhieb die Konstruktionslösung erkennen zu können, die die Produkthanforderungen am besten erfüllt. Eine sorgfältig dokumentierte Studie oder Analyse sollte deutlich machen, warum der Konstruktionsvorschlag den besten Kompromiss zwischen Leistung und Kosten darstellt, und den Prüfern die Sicherheit geben, dass keine bessere Lösung übersehen wurde.

Es gilt allerdings, große Herausforderungen zu bewältigen, bis diese Best Practice ihre gesamte Wirkung entfaltet.

Viele neue Produkte sind eigentlich lediglich Varianten vorhandener Konstruktionen. Weil aber die ursprüngliche Analyse für diese Produkte entweder nicht erfasst wurde oder für andere nicht auffindbar ist, ist oft ein hohes Maß an redundanten Tätigkeiten erforderlich. Dadurch verlängern sich die Vorlaufzeiten für die Entwicklung, wertvolle Ressourcen werden belegt, und die Zahl der Konzeptentwürfe, die

effektiv evaluiert werden können, schrumpft. Ohne nutzbare Bestandsinformationen ist dieser Prozess insbesondere für neue Mitarbeiter oder Teammitglieder äußerst zeitaufwändig.

Wenn eine Analyse nicht dokumentiert und mit der entsprechenden Konstruktion verknüpft wurde, können die Ingenieure in der Entwicklungsgruppe nur raten, warum bestimmte Konstruktionsentscheidungen getroffen wurden. Wären die Annahmen und Vorgaben direkt in der Analyse festgehalten worden, könnten die Ingenieure schneller und mit größerer Sicherheit in die Lösungsphase übergehen. Eine sorgfältige Kommentierung und Organisationen von Konstruktionen ermöglicht auch eine effizientere Kommunikation mit der Geschäftsleitung, sodass frühzeitig die erforderlichen Genehmigungen eingeholt und die Arbeitsergebnisse für mehrere Bereiche oder sogar das ganze Unternehmen freigegeben werden können.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen und sämtliche Vorteile von Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen zu realisieren, sind folgende zentrale Fähigkeiten erforderlich:

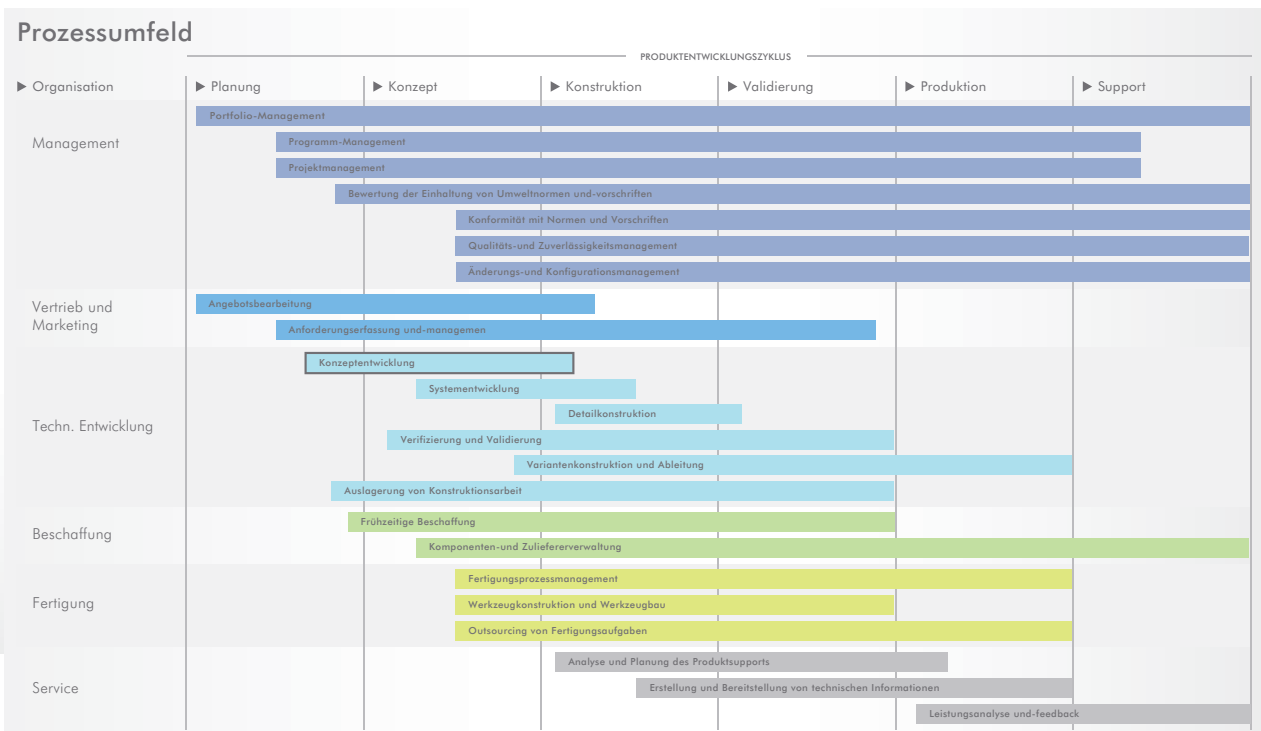


Abbildung A: Mathcad stellt Best Practices für die technischen Entwicklungsphasen der Produktentwicklung bereit (Diagramm)

- Schnelles Erzeugen, Analysieren und Dokumentieren von Konstruktionsstudien, die mehrere Funktionsbereiche abdecken
- Umfassende Berücksichtigung aller Konstruktionsanforderungen, um optimale Konstruktionsentscheidungen treffen zu können
- Effiziente und sichere Beurteilung der Sensitivität verschiedener Modelle, um die Auswirkungen von Änderungen auf die Konstruktionsziele verstehen und quantifizieren zu können (schnelle Iteration durch Alternativen)
- Integration der Ergebnisse mit externen Anwendungen und klare Kommunikation über sämtliche Organisationsebenen und -gruppen hinweg

### Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen in den verschiedenen Disziplinen der technischen Entwicklung

Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen sind sowohl für die Elektro- und Mechanik-Konstruktion als auch für das Bauingenieurwesen von Vorteil. Allerdings muss jeder Bereich seine spezifischen Herausforderungen bewältigen, die in den folgenden drei Szenarien dargestellt sind.

Im ersten Szenario soll eine Elektroingenieurin einen mangelhaften Schaltkreis in einem Videospiele-Controller umkonstruieren und dabei bestimmte Anforderungen an mehr Zuverlässigkeit, geringeren Stromverbrauch und bessere Interoperabilität mit vorhandenen Geräten umsetzen. Als Nächstes versucht ein Mechanik-Konstruktionsteam, zu ermitteln, welches Material für eine Roboterarm-Komponente die maximale Greifkraft bietet und dabei die Konstruktionsparameter wie Dicke und Gewicht sowie das Budget einhält. Und schließlich wird ein erfahrenes Bauunternehmen beauftragt, unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorgaben des Verkehrsministeriums das Kosten/Nutzen-Verhältnis für drei verschiedene Brückentwürfe auszuarbeiten.

In all diesen Szenarien werden die Funktionen zur schnellen Auswahl des optimalen Konzeptentwurfs von Mathcad von PTC bereitgestellt. Mathcad unterstützt die spezifischen Anforderungen von Elektro- und Mechanik-Konstruktion sowie Bauwesen mit folgenden Funktionen:

- Einfaches und intuitives Erstellen von mathematischen Modellen für Konstruktionsoptionen
- Effiziente Iteration der Konstruktionsoptionen anhand dieses Modells
- Klare Weitergabe und Prüfung von Konstruktionsoptionen durch das Management und Mitglieder des globalen Teams

### Szenario 1: Schaltkreis-Umkonstruktion für verbessertes Spielverhalten

Ein Unternehmen beauftragt eine Ingenieurin damit, einen Schaltkreis im Videospiele-Controller eines Kunden umzukonstruieren. Der neue Entwurf muss bestimmte Anforderungen an mehr Zuverlässigkeit, geringeren Stromverbrauch und bessere Interoperabilität mit vorhandenen Geräten erfüllen. Aufgrund budgetärer Einschränkungen sollten wo möglich kostengünstigere Standardkomponenten verwendet werden.

Mithilfe von Mathcad erstellt die Ingenieurin im Handumdrehen Mathcad Arbeitsblätter mit Konstruktionskomponentenmodellen. Bei einem der Komponentenmodelle geht es um die Tradeoff-Analyse der Impedanz bei verschiedenen Standardwiderständen und -kondensatoren. Mit der intuitiven Whiteboard-Benutzeroberfläche und dem integrierten Gleichungseditor kann die Ingenieurin Komponentenlösungen und -bedingungen in der vertrauten, natürlichen mathematischen Schreibweise ausdrücken (Abbildung B). Sie kann sich auf die Versuchsanordnungen und die Analyse selbst konzentrieren, anstatt mit großem Aufwand kryptische Formeln einzuprogrammieren.

Sie hat Zugriff auf mehr als 600 mathematische Funktionen und Standardbibliotheken mit elektrischen Gleichungen, sodass sie die Komponentenmodelle schnell und einfach erstellen kann, ohne sie auf eine Konstruktion festzulegen.

<b>Frequency</b>	$f := 3000 \text{ Hz}$
<b>Resistance</b>	$R := 8 \ \Omega$
<b>Capacitance</b>	$C := 6.63 \ \mu\text{F}$
<b>Inductance</b>	$L := 0.424 \text{ mH}$
<b>Angular frequency</b>	$\omega := 2 \pi \cdot f$
<b>Reactance XL</b>	$X_L := \omega \cdot L = 7.992 \ \Omega$
<b>Reactance XC</b>	$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} = 8.002 \ \Omega$
<b>LF Impedance</b>	$Z_{LF} := R + 1i \cdot X_L = (8 + 7.992i) \ \Omega$
<b>HF Impedance</b>	$Z_{HF} := R - 1i \cdot X_C = (8 - 8.002i) \ \Omega$
<b>Total Impedance</b>	$Z_T := \frac{Z_{LF} \cdot Z_{HF}}{Z_{LF} + Z_{HF}} = (7.997 - 1.8i \cdot 10^{-6}) \ \Omega$

Abbildung B: Mathcad Arbeitsblatt mit sämtlichen Impedanzberechnungen für den Schwingkreis erster Ordnung

Um die Auswirkungen von Komponentenänderungen zu evaluieren, kann sie beispielsweise den Widerstandswert von 8 in 30 ändern. Diese Komponentenwerte sind mit großer Wahrscheinlichkeit bereits in der Bibliothek mit Standardkomponenten vorhanden. Da die natürliche mathematische Schreibweise von Mathcad „live“, also in Echtzeit, aktualisiert wird, werden Änderungen an den nieder- und hochfrequenten sowie an den Gesamtimpedanzwerten sofort überall im Modell nachvollzogen. Die dynamische Einheitenüberprüfung in Mathcad korrigiert während der Arbeit automatisch Fehler und erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse. Die natürliche mathematische Notation, die Genauigkeit der Einheitenüberprüfung und die Live-Gleichungen fördern eine präzise Kommunikation zwischen den Ingenieuren und sorgen damit für eine bessere Prozesseffizienz und eine geringere Anfälligkeit für teure Fehler.

Mathcad ruft automatisch vorab definierte Impedanzberechnungen und eine Frequenztabelle ab, um einen Übergangs-Plot der Impedanz-Tradeoffs erster Ordnung zu erzeugen (Abbildung D). Bei jeder Änderung auf dem Whiteboard oder in den zugrunde liegenden Tabellen wird die Plot-Darstellung dynamisch aktualisiert. Wie schon bei Änderungen an der Widerstandskomponente werden auch bei der Überarbeitung des Kondensators die Plotlinien für hochfrequente und Gesamtimpedanz automatisch aktualisiert. Auf diese Weise kann die Ingenieurin mithilfe von Mathcad die möglichen Komponentenooptionen in kürzester Zeit evaluieren und kommunizieren.

Jeder, der die Ergebnisse dieser Tradeoff-Analyse betrachtet – sei es bei der Besprechung der Konstruktionsstudie mit dem Management, beim Audit mit einer Aufsichtsbehörde oder bei der Kommunikation mit Teammitgliedern weltweit –, kann die Formeln nachvollziehen, denn sämtliche Annahmen und Berechnungen sind klar dargestellt.

## Szenario 2: Evaluierung der Streckfestigkeit möglicher Materialien für ein Roboter gelenk

Das Entwicklungsteam eines Maschinen- und Anlagenbauers soll das Verhältnis von Streckfestigkeit und Kosten für verschiedene Roboterfinger-Materialien bei unterschiedlichen Greifkräften ermitteln. Zu den evaluierten Materialien gehören Stähle wie ASTM A36, ASTM 514, ANSI 302-Edelstahl sowie Polyethylen-HDPE. Das Material muss die Vorgaben bezüglich Streck- und Zugfestigkeit erfüllen, um die maximale Greifkraft sicher zu erreichen. Außerdem müssen die Konstruktionsvorgaben wie Dicke und Gewicht sowie der Kostenrahmen eingehalten werden.

Mithilfe der intuitiven Whiteboard-Benutzeroberfläche von Mathcad formulieren die Ingenieure visuelle Tradeoff-Gleichungen und Plots, um das Trägheitsmoment der Flächen beim Biegen um die X-Achse des Gelenkmodells zu berechnen. Der integrierte Gleichungseditor ermöglicht es dem Team, Komponentenlösungen mit der vertrauten, natürlichen mathematischen Schreibweise auszudrücken und dank der automatischen Einheitenüberprüfung maximale Genauigkeit zu erreichen. Das Team kann sich auf die Konstruktionsversuche und die Analyse selbst konzentrieren, anstatt sich mit der Programmierung von schwer verständlichen Formeln zu beschäftigen.

Die Evaluierung der maximalen Spannung in Abhängigkeit von der Materialdicke wird durch die offene Architektur von Mathcad unterstützt. Die bei einem früheren Projekt gesammelten Werte für Streckfestigkeit, Zugfestigkeit und Dichte der evaluierten Materialien wurden aus einer Excel®-Kalkulationstabelle in eine Bibliothek mit Mathcad Arbeitsblättern importiert.

```

ImpedanceVals:=
a←0
for i ∈ 0..12
  ωi←2 π·freqi
  XLi←ωi·L
  XCi←1/ωi·C
  ZLFi←R+1i·XLi
  ZHFi←R-1i·XCi
  ZTi←(ZLFi·ZHFi)/(ZLFi+ZHFi)
return [ZLF ZHF ZT]

ZLow:=ImpedanceVals0,0
ZHigh:=ImpedanceVals0,1
ZTotal:=ImpedanceVals0,2

```

Abbildung C: Mathcad Schleife durch Impedanzen

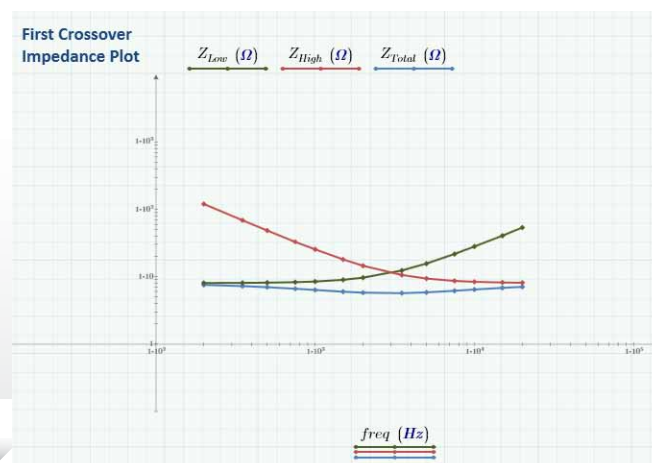


Abbildung D: Mathcad Übergangs-Plot der Impedanz-Tradeoffs erster Ordnung

Das Entwicklungsteam kann diese Informationen jetzt problemlos in das Mathcad Arbeitsblatt für das Gelenkmodell einbinden, mit dem es die Tradeoff-Analyse durchführt (Abbildung E).

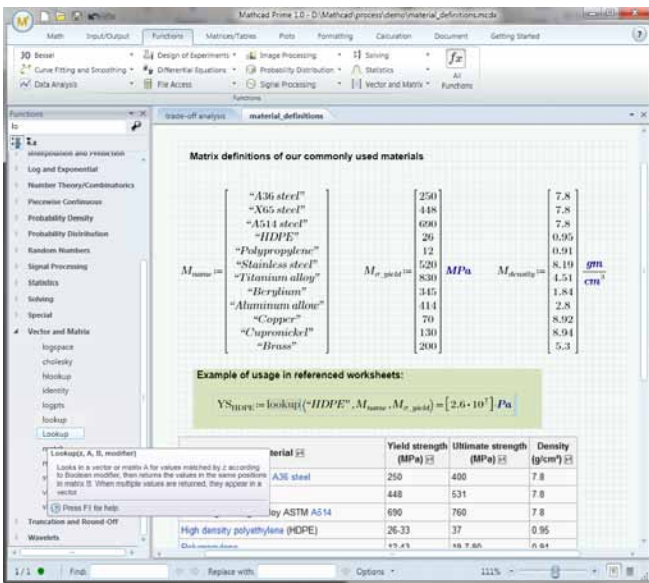


Abbildung E: Mathcad Tabelle mit Streckfestigkeit, Zugfestigkeit und Dichte unterschiedlicher Materialien

Das Team verringert die Dicke für jedes Material innerhalb eines Sicherheitsfaktors für die Streckfestigkeit. Anschließend generiert Mathcad ein Diagramm, in dem der Tradeoff zwischen Polyethylen-HDPE und ASTM A36-Stahl grafisch dargestellt wird (Abbildung F).

Das Team kam zu dem Schluss, dass unter Berücksichtigung aller Bedingungen und Ziele Polyethylen-HDPE am besten geeignet sei. In der Konstruktion ist ausreichend Raum für das dickere Gelenk, und die Anforderungen an Streck- und Zugfestigkeit werden ebenfalls erfüllt. Die resultierende Masse beträgt nur 37,5 Prozent der entsprechenden A36-Stahlstruktur, und dabei kostet HDPE auch weniger. Der Analyseprozess, der schließlich zur Wahl von Polyethylen-HDPE führt, wird automatisch Schritt für Schritt im Mathcad Arbeitsblatt dokumentiert und kann nun von anderen Teams für andere Projekte problemlos nachvollzogen oder weiterverwendet werden.

Das Team könnte die Bemessungen und die Greifgeometrie des Robotergelenks auch direkt aus einem CAD-Modell (beispielsweise aus Creo™ Parametric) in die Mathcad Arbeitsblätter importieren, zusammen mit einem „Schnappschuss“ des CAD-Modells (Abbildung G). Änderungen am Mathcad Modell könnten dann dynamisch in das CAD-Modell übernommen werden.

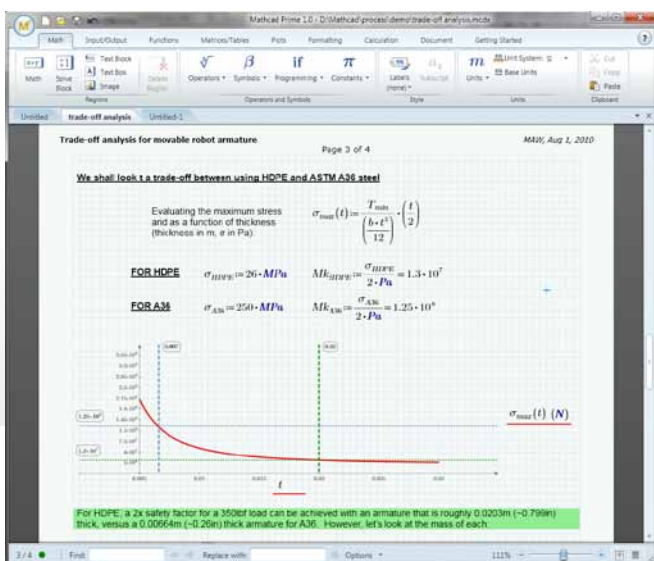


Abbildung F: Diagramm der Tradeoff-Analyse zwischen Polyethylen-HDPE und ASTM A36-Stahl

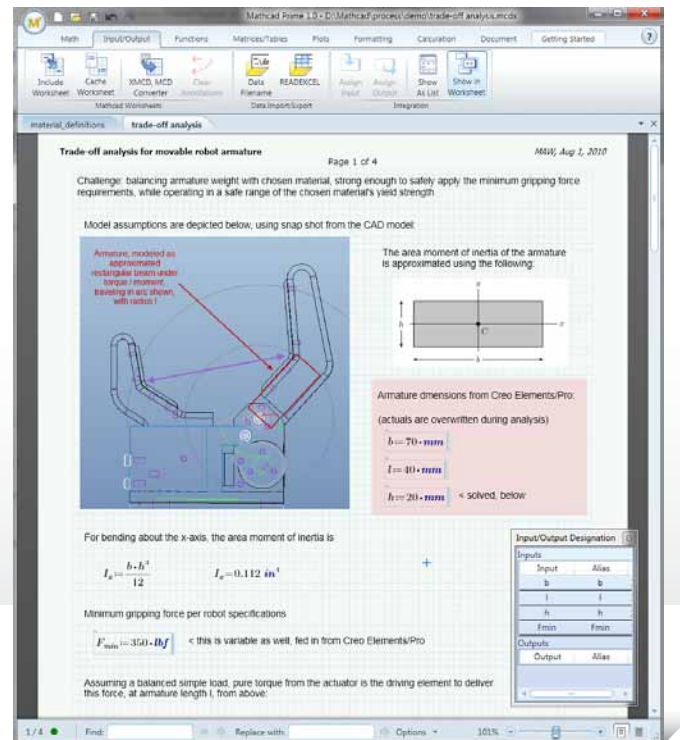


Abbildung G: Schnappschuss eines CAD-Modells für ein bewegliches Robotergelenk

### Szenario 3: Kosten/Nutzen-Vergleich im Brückenbau

Eine Baufirma mit jahrzehntelanger Erfahrung im Brückenbau wurde gebeten, festzustellen, welcher von drei Entwürfen das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis aufweist: Ausleger-, Hänge- oder Pontonbrücke.

Bei dieser Konstruktionsstudie spielen sehr viele Variablen eine Rolle, beispielsweise das Verkehrsvolumen, die Spannweite, die Wartungskosten usw. Erfahrungsgemäß müssen die mit diesem Projekt beauftragten Ingenieure die Sicherheitsanforderungen mit großer Sorgfalt einhalten, um die Genehmigung durch das Verkehrsministerium zu erhalten.

Glücklicherweise müssen die Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen für den Brückenbau nicht völlig neu aufgesetzt werden. Die Ingenieure können ihre Bibliothek mit archivierten Mathcad Arbeitsblättern aus früheren Projekten nutzen. Mathcad hilft den Ingenieuren nicht nur, besonders schnell das beste Entwurfskonzept zu finden, sondern ermöglicht es ihnen auch, ein Konzept viel früher im Entwicklungsprozess der Unternehmensleitung zur Genehmigung oder Kurskorrektur vorzulegen.

Das Team beginnt mit der Auswahl einer früheren Konstruktionsstudie, die mit der aktuellen Aufgabenstellung die meisten Gemeinsamkeiten aufweist. Die Wahl des richtigen Arbeitsblatts wird dadurch erleichtert, dass die Berechnungen in natürlicher mathematischer Echtzeit-Notation dargestellt werden. Grundsätzliche Annahmen in der früheren Studie sind ebenfalls im Arbeitsblatt dokumentiert, ebenso wie Diagramme und andere visuelle Darstellungen der Parameter.

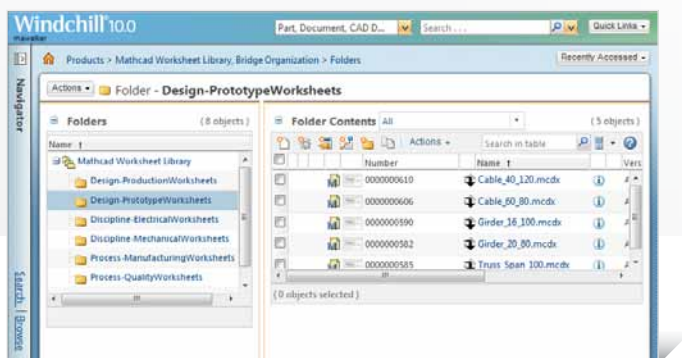


Abbildung H: Verzeichnis mit archivierten Mathcad Arbeitsblättern für Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen

Dank der intuitiven Whiteboard-Oberfläche und des integrierten Gleichungseditors von Mathcad kann das Team das Arbeitsblatt im Handumdrehen an das aktuelle Projekt anpassen. Mithilfe der Bibliothek mit mehr als 600 mathematischen Funktionen und Standardgleichungen können die Komponentenooptionen mit allen Details iteriert werden. Die Ergebnisse der Änderungen auf dem Arbeitsblatt werden in Echtzeit aktualisiert und auch visuell dargestellt. Darüber hinaus werden alle Änderungen von der dynamischen Einheitenüberprüfung in Mathcad überprüft, um Fehler zu reduzieren. Zur Dokumentation wichtiger Fakten und Annahmen können die Berechnungen ganz einfach direkt mit Anmerkungen versehen werden, sodass deutlich wird, mit welchen Parametern und welcher Logik die Ergebnisse erreicht wurden.

Da jeder Schritt in Mathcad selbstständig dokumentiert wird, muss kein eigener Bericht für die Geschäftsleitung angefertigt werden, in dem Einzelheiten des Originalarbeitsblattes mit allen Änderungen wiederholt werden. Das Management kann sich darauf verlassen, dass mit der nötigen Sorgfaltspflicht vorgegangen wurde.

### Zusammenfassung

Wenn Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen frühzeitig im Produktentwicklungsprozess als Best Practice eingesetzt werden, ermöglichen sie eine engere Ausrichtung der Produktentscheidungen an den festgelegten Anforderungen. Mathcad stellt die zentralen Fähigkeiten bereit, die für eine effiziente und zuverlässige Realisierung sämtlicher Vorteile dieser Best Practice benötigt werden.

Best Practice für Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen	Mathcad Funktionen für Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen
Schnelle Implementierung eines mathematischen Modells der Konstruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intuitive, aufgabenbasierte Whiteboard-Benutzeroberfläche verbessert die Benutzerfreundlichkeit und ermöglicht es, unbekannte Funktionen und Features schnell und einfach zu erlernen.</li> <li>• WYSIWYG-Gleichungseditor (What You See Is What You Get) ermöglicht es, Bedingungen und Lösungen für Aufgaben in natürlicher mathematischer Schreibweise ohne Programmierkenntnisse auszudrücken.</li> <li>• Werkzeugpalette mit mehr als 600 fertigen Funktionen für jedes noch so schwierige Berechnungsproblem.</li> <li>• Vollständige Unterstützung für Einheiten in allen Berechnungen, dadurch weniger Fehler, genauere Ergebnisse und exaktere Kommunikation zwischen Ingenieuren und ihren Teams.</li> </ul>
Schnelles und effizientes Ausprobieren mehrerer Optionen anhand dieses Modells	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Live-Berechnungsumgebung für schnelles und einfaches Erstellen von Testberechnungen vor der Festlegung auf eine Konstruktion.</li> <li>• Funktionen für die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) verdeutlichen die Variableninteraktionen, die einen Versuch mit mehreren Variablen und Ebenen beeinflussen, und stellen Vorlagen für eine geringere Zahl von besser optimierten Versuchen bereit.</li> <li>• Die Integration mit anderen Produkten wie CAD-Anwendungen sorgt für höhere Produktivität, verbesserte Prozesseffizienz und bessere Zusammenarbeit zwischen Individuen und Gruppen.</li> </ul>
Prüfen und Evaluieren mehrerer Was-wäre-wenn-Szenarien mit dem globalen Team und Übergabe der Ergebnisse an das Management zur Genehmigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dank der standardmäßigen mathematischen Schreibweise sowie der integrierten Text- und Grafikanzeige entstehen automatisch leicht lesbare Dokumente, die auf jeder Ebene und überall im multikulturellen Team verständlich sind.</li> <li>• Live-Berechnungen erleichtern teamübergreifende Was-wäre-wenn-Szenarien mit Textanmerkungen und grafischer Anzeige.</li> <li>• Archivierte, gemeinsam genutzte Arbeitsblätter erleichtern die teamübergreifende Erfassung und Nutzung von Wissen und sorgen damit für mehr Kontrolle über Fehler und eine bessere Einhaltung von Best Practices für Konstruktionsberechnungen.</li> </ul>

Durch diese Unterstützung von Konstruktionsstudien und Tradeoff-Analysen mit Mathcad kann die technische Entwicklung einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der übergeordneten Unternehmensziele leisten:

- Kürzere Time-to-Market, weniger Risiken
- Mehr Kreativität in der technischen Entwicklung durch Ausloten von mehr Produktentwürfen in kürzerer Zeit
- Erreichen des angestrebten Verhaltens in der Praxis durch optimierte Produktentwürfe
- Niedrigere Produkt-, Garantie- und Entwicklungskosten

Weitere Informationen zu Mathcad:

[PTC.com/products/mathcad](https://www.ptc.com/products/mathcad)

© 2011, Parametric Technology Corporation (PTC). Alle Rechte vorbehalten. Die Inhalte dieser Seiten werden ausschließlich zu Informationszwecken bereitgestellt. Sie können ohne Vorankündigung geändert werden. Die Gewährleistungen für PTC Produkte und Dienstleistungen sind in den ausdrücklichen Gewährleistungsangaben der jeweiligen Produkte und Dienstleistungen festgelegt, und die hierin enthaltenen Informationen enthalten keinerlei zusätzliche Gewährleistung. Verweise auf die Erfolge von Kunden basieren auf den Erfahrungen eines Einzelbenutzers und auf Nachweisen von Kunden. Analytische oder zukunftsorientierte Aussagen über PTC Produkte und Services oder die Märkte, auf denen PTC agiert, sind Aussagen von Analysten, und PTC macht keine Zusicherungen hinsichtlich deren Genauigkeit. PTC, das PTC Logo, Mathcad, Creo, Elements/Pro und alle PTC Produktnamen und Logos sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen von PTC und/oder Tochterunternehmen in den USA und anderen Ländern. Alle anderen Produkt- oder Firmennamen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. **Releasetermine** sowie Funktions- oder Leistungsumfang können nach Ermessen von PTC geändert werden.

6510-Mathcad: Best Practices-WP-0411-de