dynardo | präsentiert zu den 14. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktagen 2017
Quelle: www.dynardo.de/library

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG

STRUKTUR- UND HERSTELLKOSTENANALYSE

zur ganzheitlichen Optimierung von komplexen Blechbaugruppen

Christoph Blömker
Vorentwicklung Vernetzte Systeme

Weimar, 02.06.2017

AGENDA

- TRUMPF
- optiSlang in der Entwicklung vom Laservollautomat TruLaser Center 7030
  - parametrische Strukturoptimierung
  - kombinierte Struktur- und HK-Analyse
- Zusammenfassung

TRUMPF ist…

… ein Familienunternehmen

seit 1923

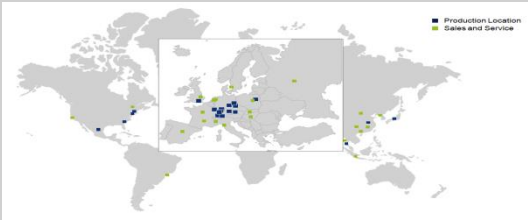
Hauptsitz in Ditzingen nahe Stuttgart

…Technologieführer

in zwei Geschäfts-Bereichen

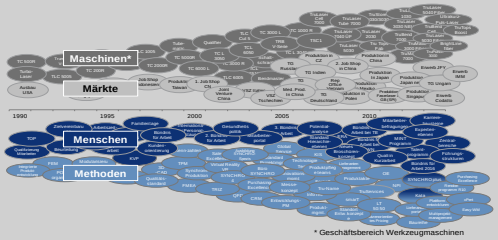
Lasertechnik und Werkzeugmaschinen

… international aufgestellt



71 Tochtergesellschaften

…Innovationsführer



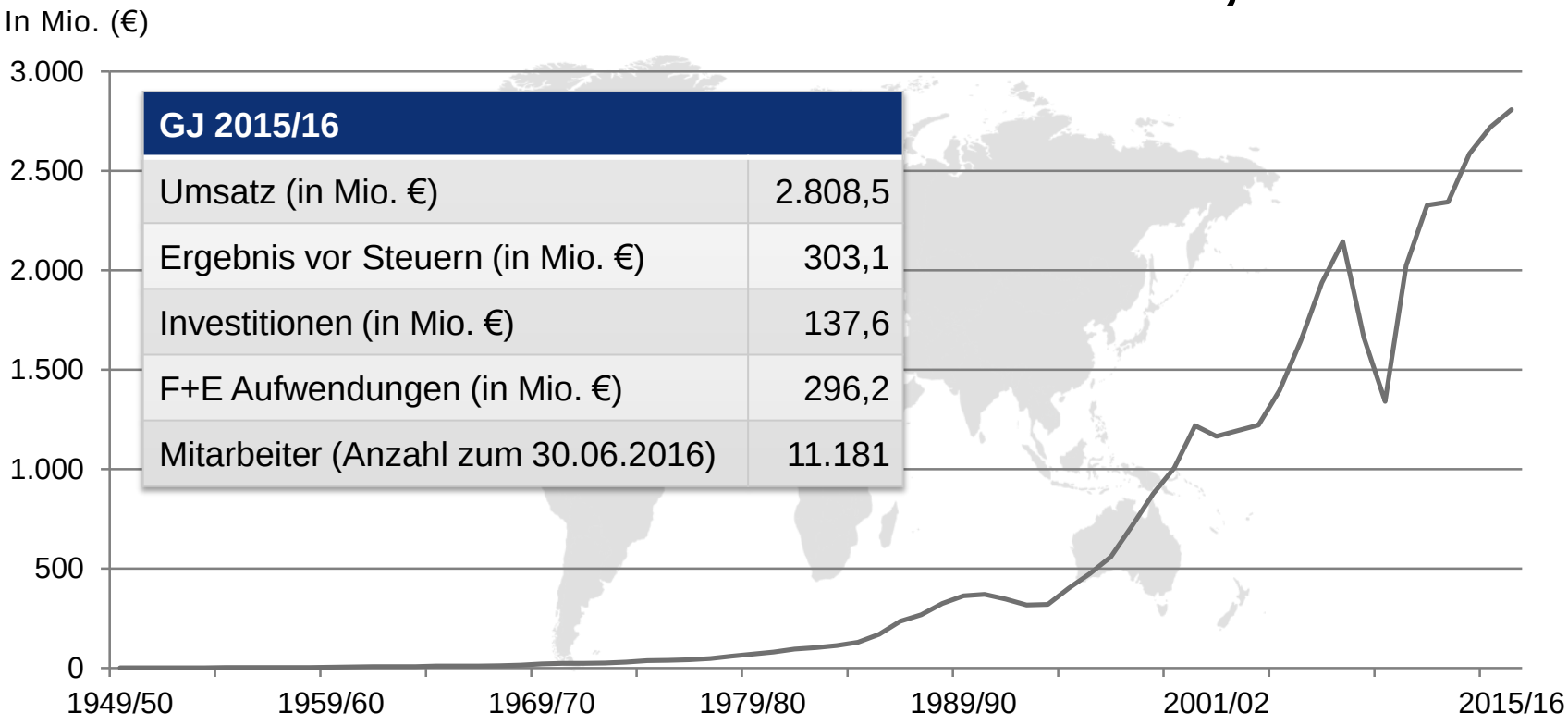
ständige Veränderung

Auf einen Blick

Unternehmenskennzahlen und Umsatzentwicklung

Umsatz Geschäftsjahr 2015/16

2,808 Mrd. €



GJ 2015/16	
Umsatz (in Mio. €)	2.808,5
Ergebnis vor Steuern (in Mio. €)	303,1
Investitionen (in Mio. €)	137,6
F+E Aufwendungen (in Mio. €)	296,2
Mitarbeiter (Anzahl zum 30.06.2016)	11.181

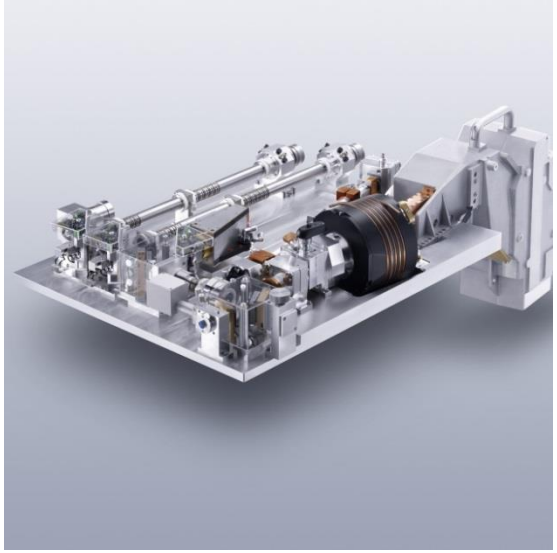
GJ: 1.7.-30.6.

Unsere Geschäftsbereiche

Weltmarkt- und Technologieführer in der Fertigungstechnik

Werkzeugmaschinen	Lasertechnik / Elektronik
2,52 Mrd. € Umsatz 7.355 Mitarbeiter	1,01 Mrd. € Umsatz 2.957 Mitarbeiter

Werkzeugmaschinen
für die flexible Blech- und
Rohrbearbeitung



Laser für die
Fertigungstechnik

Stromversorgungen für
Hochtechnologieprozesse

Zahlen Geschäftsjahr 2016/17

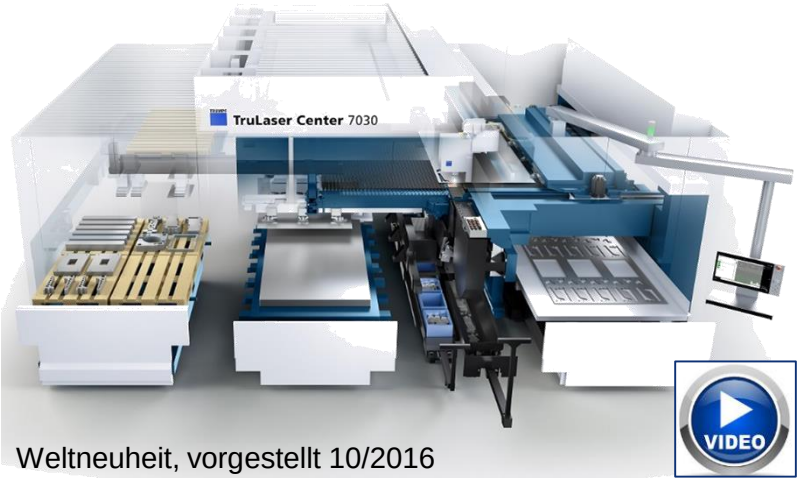
Anwendung von optiSlang in der Maschinenentwicklung

Beispiel: Laservollautomat TruLaser Center 7030

TruLaser Center 7030

„Laserschneiden so einfach wie drucken“

- Selbstständig
  → Programmierung auf Knopfdruck
  → Automatisiertes Beladen/Entladen
- Schnell und flexibel
  → Höchste Produktivität
  → Bearbeitung großer sowie filigranster Teile
- Zuverlässigkeit
  → Prozesssicherheit durch Intelligenz

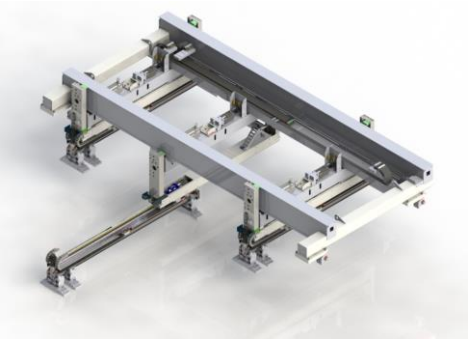


Weltneuheit, vorgestellt 10/2016

Baugruppen mit optiSlang analysiert

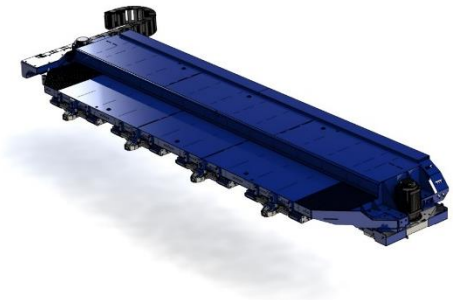
„Entwicklung innovativer Systeme Bedarf den Einsatz intelligenter Methoden“

- SortMaster Speed



→ Parametrische Strukturoptimierung

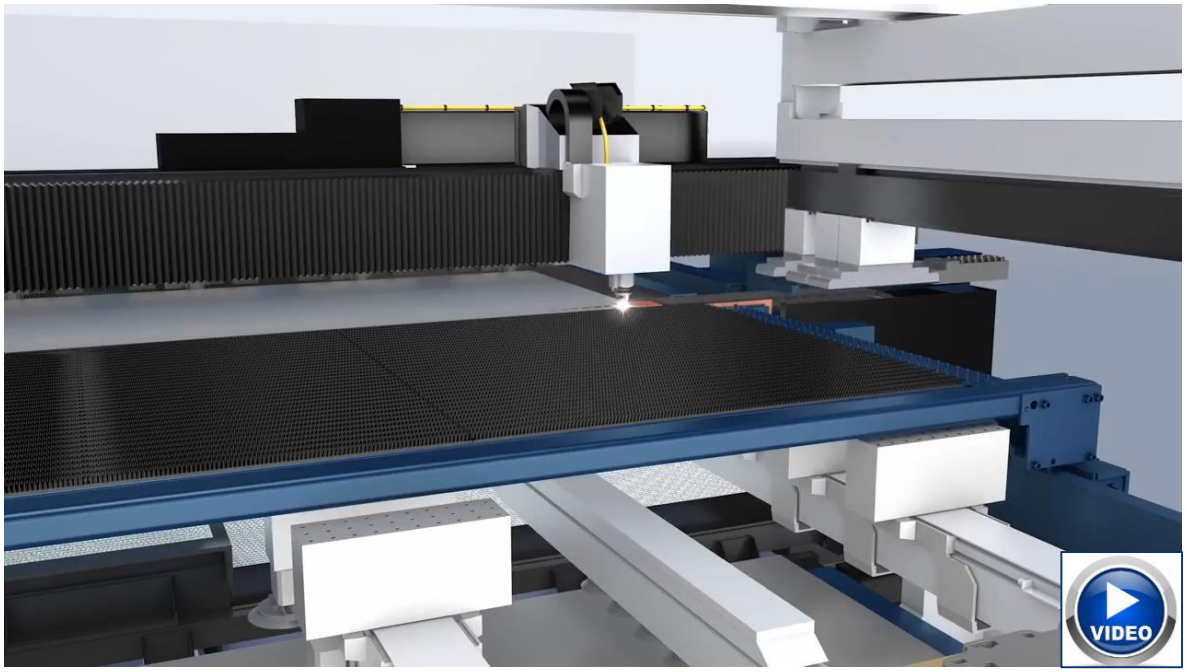
- Klemmeinheit (Blech-Vorschubachse)



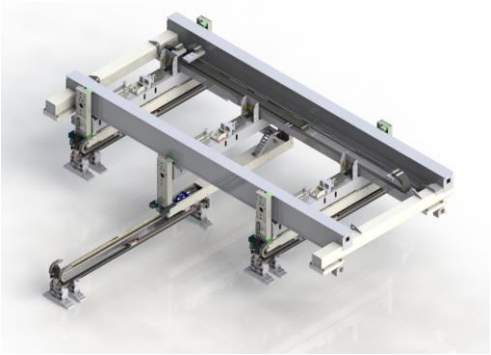
→ Kombinierte Struktur- und HK-Analyse

Parametrische Strukturoptimierung

Am Beispiel der Automatisierungseinheit der TruLaser Center 7030



SortMaster Speed



Der SortMaster Speed entnimmt und stapelt hauptzeitparallel große und kleine Teile in Rekordzeit

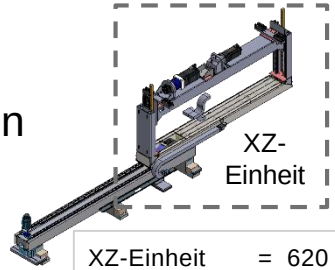
Anforderungen

- Prozesssichere Teileentnahme → Steifigkeit bei hohen Prozesskräften (insg.10.000N Pin-Kraft)
- Keine Rückwirkung auf Schneidprozess → „sanftes“ Aufsetzen während des Schneidens
- Großer Arbeitsbereich von 5,0 m x 4,8 m (x 0,6 m) → auskragende Mechanik
- Produktivität bei hauptzeitparalleler Teileentnahme → höchste Dynamik

Aufgabe: Gewichtsreduktion der Automatisierungseinheit…

… ohne Einbußen bei Steifigkeit und Dynamik

→ Wandstärkenanalyse zur Optimierung der Blech-Schweißkonstruktion

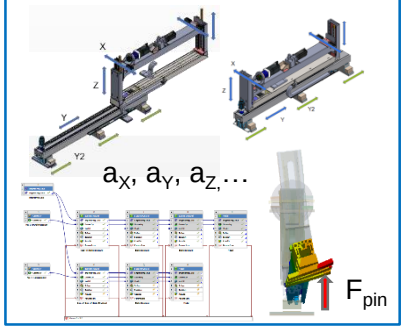


XZ-Einheit	=	620 kg
davon Blech	=	325 kg

- Setup:

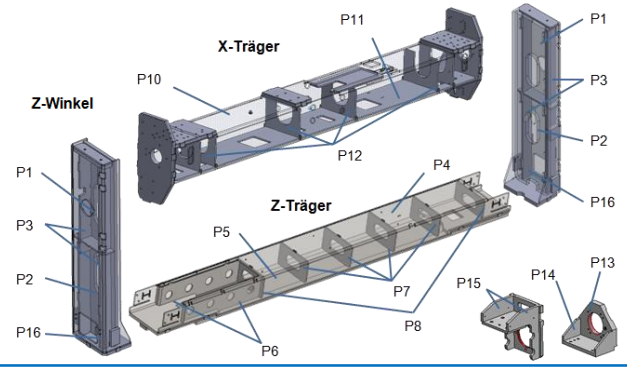
7 Lastfälle

7 FE-Rechnungen
≙ $\sum$ **52 Min** Rechenzeit



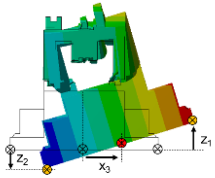
18 Variations-Parameter

Variation Wandstärken (0 bis 20mm)



15 Ergebnisgrößen

Verschiebungen, Eigenfreq., Verkippungen, Masse, …



x_1, x_2, z_1,…
phi_x, phi_Y,…
$f_{o,1}$, $f_{o,2}$,…

- Aufwand konventioneller DoE*-Methoden:

  2-Werte pro Parameter, z.B. 1 mm & 10 mm (ohne nichtlineare Zusammenhänge)

  → Full-Factorial Analysis**:** 2^{18} * 52 min = **26 Jahre Rechenzeit**

* DoE = Design of Experiments

→ Klassische Parametervariation für Wandstärkenoptimierung nicht möglich!

Vorgehensweise

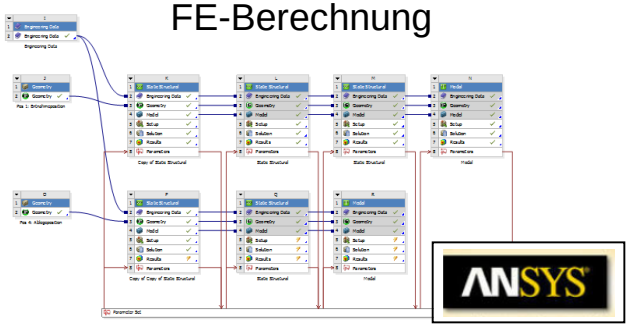
Meta-Modellbildung und Sensitivitätsanalyse mit optiSlang Inside ANSYS Workbench

Vorgabe Wertebereiche,
„Abrastern“ des Parameterraums

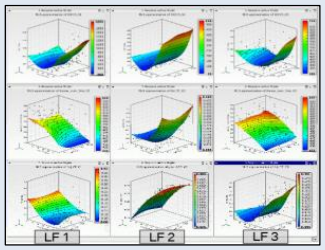
Übergabe der Parametersätze
(**80 Design-Points**)

Ergebnisgrößen
für jeden Design-Point

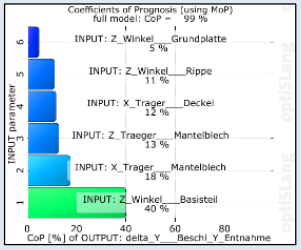
FE-Berechnung



Korrelationsanalyse
und Modellbildung



Meta-Modell
mit Prognose-
Fähigkeit CoP **> 93 %**



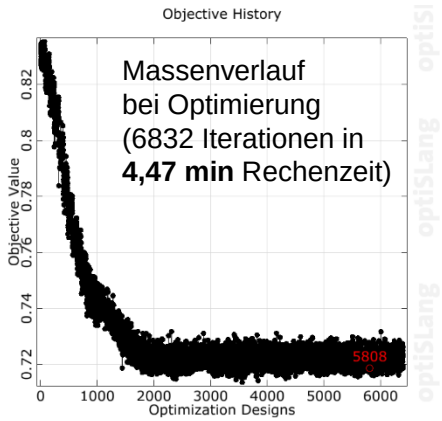
- Aufwand Meta-Modellbildung (**stetige** Wertebereiche von 0,1 mm – 20 mm)
  → Latin Hypercube Sampling: 80 * 52 min = **69 Stunden** Rechenzeit

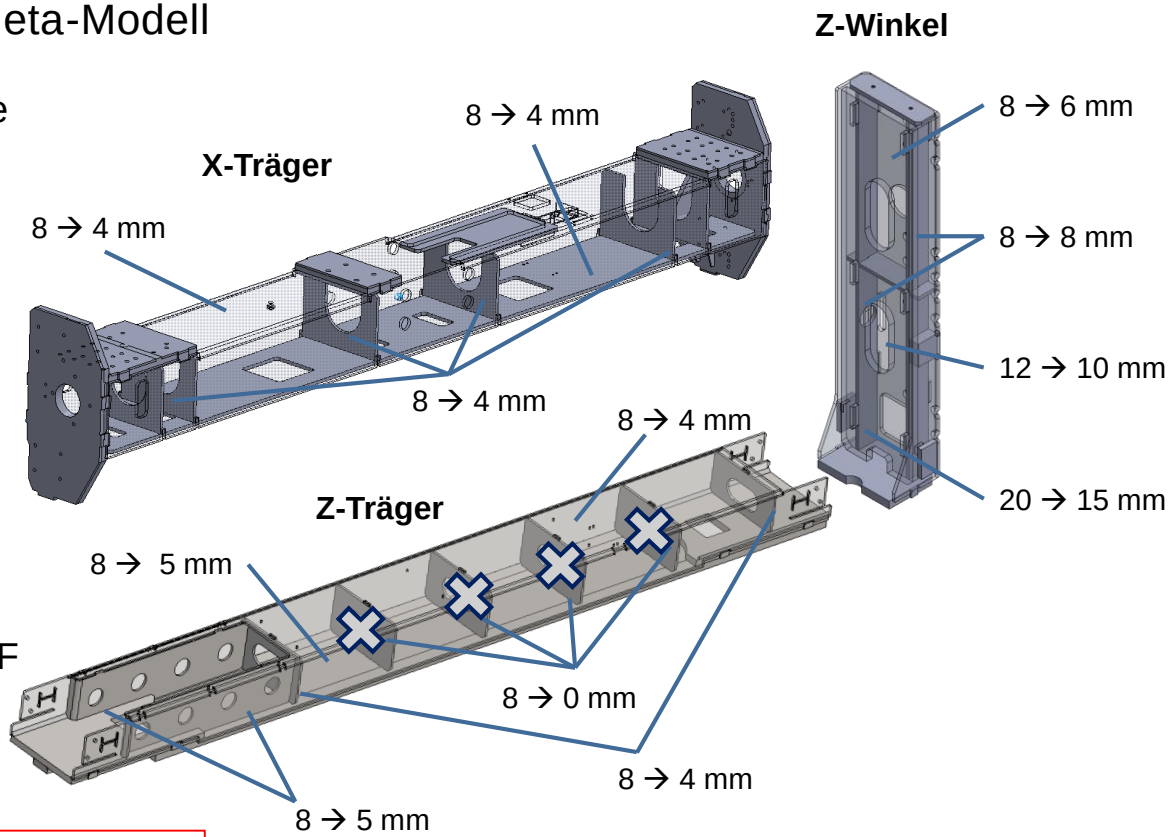
→ Parameteranalyse mit vertretbarem Aufwand automatisiert durchführbar!

Ergebnis

Wandstärkenoptimierung auf Meta-Modell

- Optimierungsziel: Minimiere Masse





- Randbedingung:
  Steifigkeitsverlust < 5 % bei allen LF

- Massen:

→ XZ-Einheit = 620 kg
→ davon Blech* = 325 kg

→ nach Optimierung = 223 kg

- 102 kg
(= - 31%)

* Bleche, die bei Parameter-variation berücksichtigt wurden

→ Reduktion der Masse um 102 kg je Master bei nahezu gleicher Steifigkeit!

Parametrische Strukturoptimierung …

… muss **alle** Anforderungen der Baugruppe berücksichtigen!

Pflichten-heft

Anforderungen

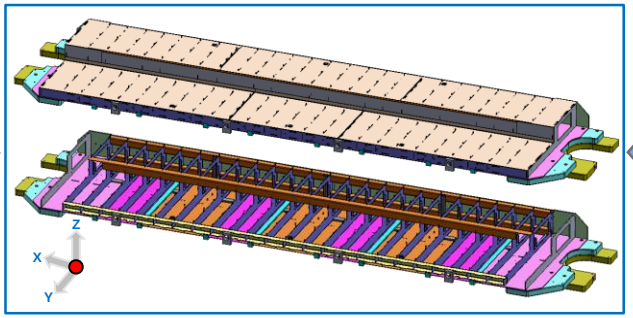
- Technische Zielgrößen:

$\Delta u_i(\vec{x})$ $f_{0,i}(\vec{x})$ $k_{stiff}(\vec{x})$ $\sigma_{mises}(\vec{x})$

- Wirtschaftliche Zielgröße:

$€_{HK}(\vec{x})$?

Blech-Baugruppe: Klemmeinheit



Parameter

- Abmessungen
- Blechdicken
- Biegeschenkel
- Rippenanzahl
- …

$\vec{x}$

Berechnung der Zielgrößen

- Technische und wirtschaftliche Zielgrößen werden nicht gemeinsam analysiert / optimiert

→ keine Transparenz über Zusammenhänge zwischen **Geometrie, Kosten** und **Strukturverhalten**

Wie konstruiere ich kosteneffizient?

Was kostet mich zusätzliche Steifigkeit?

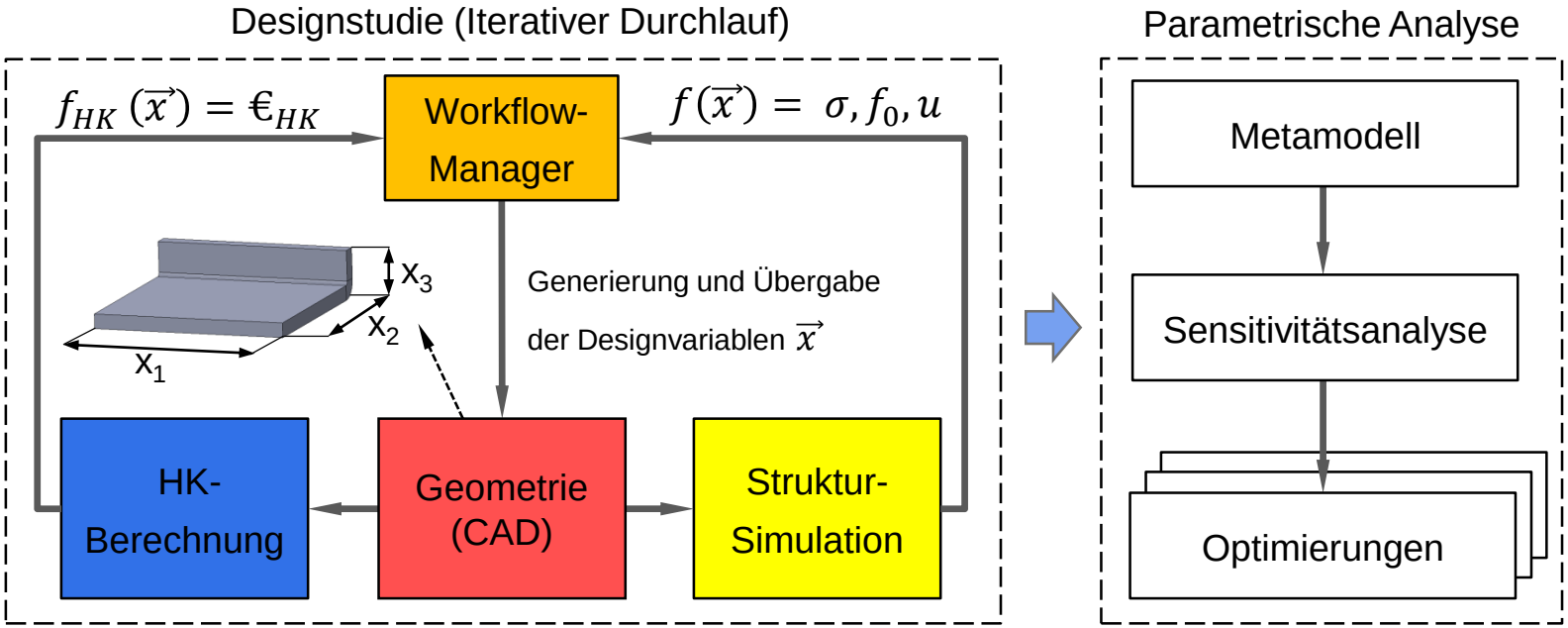
HK-Workshop: wo kann / darf ich einsparen?

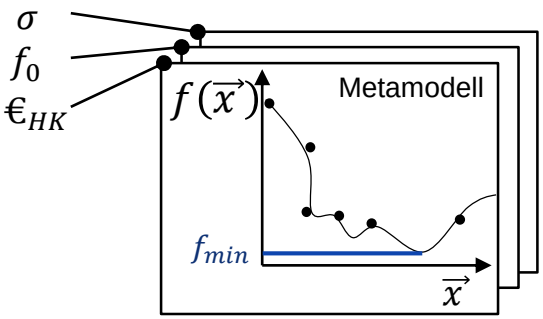
Schweißnaht oder doch Biegung?

→ Ziel: frühzeitige, kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse zur ganzheitlichen Optimierung von komplexen Blech-Baugruppen

Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse

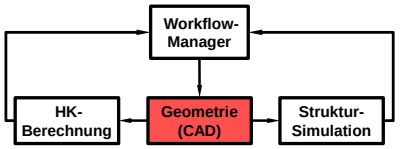
Idee einer parametrischen, multidisziplinären CAE-Analyse





- Zusammenhänge zwischen Geometrie, Kosten und Strukturverhalten werden transparent
- Optimierungsberechnungen mit verschiedenen Zielgrößen, Gewichtungen und Randbedingungen möglich

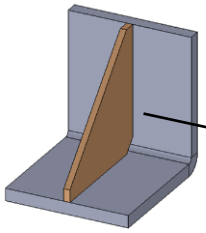
Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse



TRUMPF

Parametrischer Aufbau der Geometrie

x_1	x_2	x_3	...
2	1,5	20	..



SolidWorks

Mulitbody Part
Volumenmodell

Design Table

Geometrie

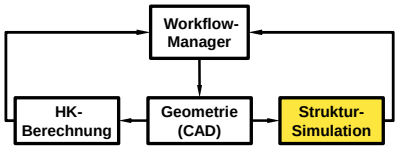
Zuschnitts- und Schweißnahtlisten

Parameter $\vec{x}$

- Abmessungen
- Blechdicken
- Biegeschenkel
- Rippenanzahl
- …

	Schnitt-länge	Anzahl Schnitte	Anzahl Biegungen	Schweiß-länge	…
Teil 1	…	…	…	…	…
Teil 2	…	…	…	..	…

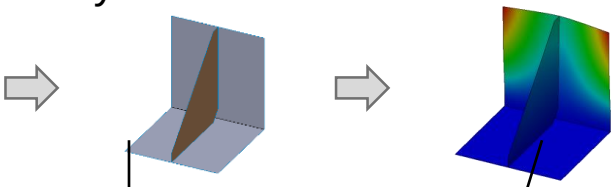
Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse



TRUMPF

Kopplung Geometrie mit Strukturanalyse

x_1	x_2	x_3	...
2	1,5	20	..



SolidWorks

Mulitbody Part
Volumenmodell

Design Table

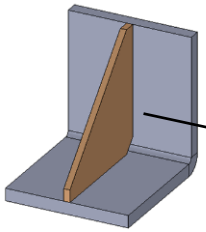
Geometrie

Zuschnitts- und Schweißnahtlisten

ANSYS Workbench

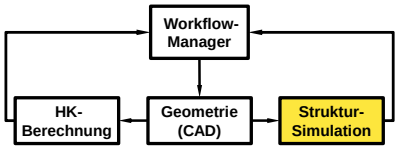
DesignModeler
Oberflächenmodell

Parameter Set



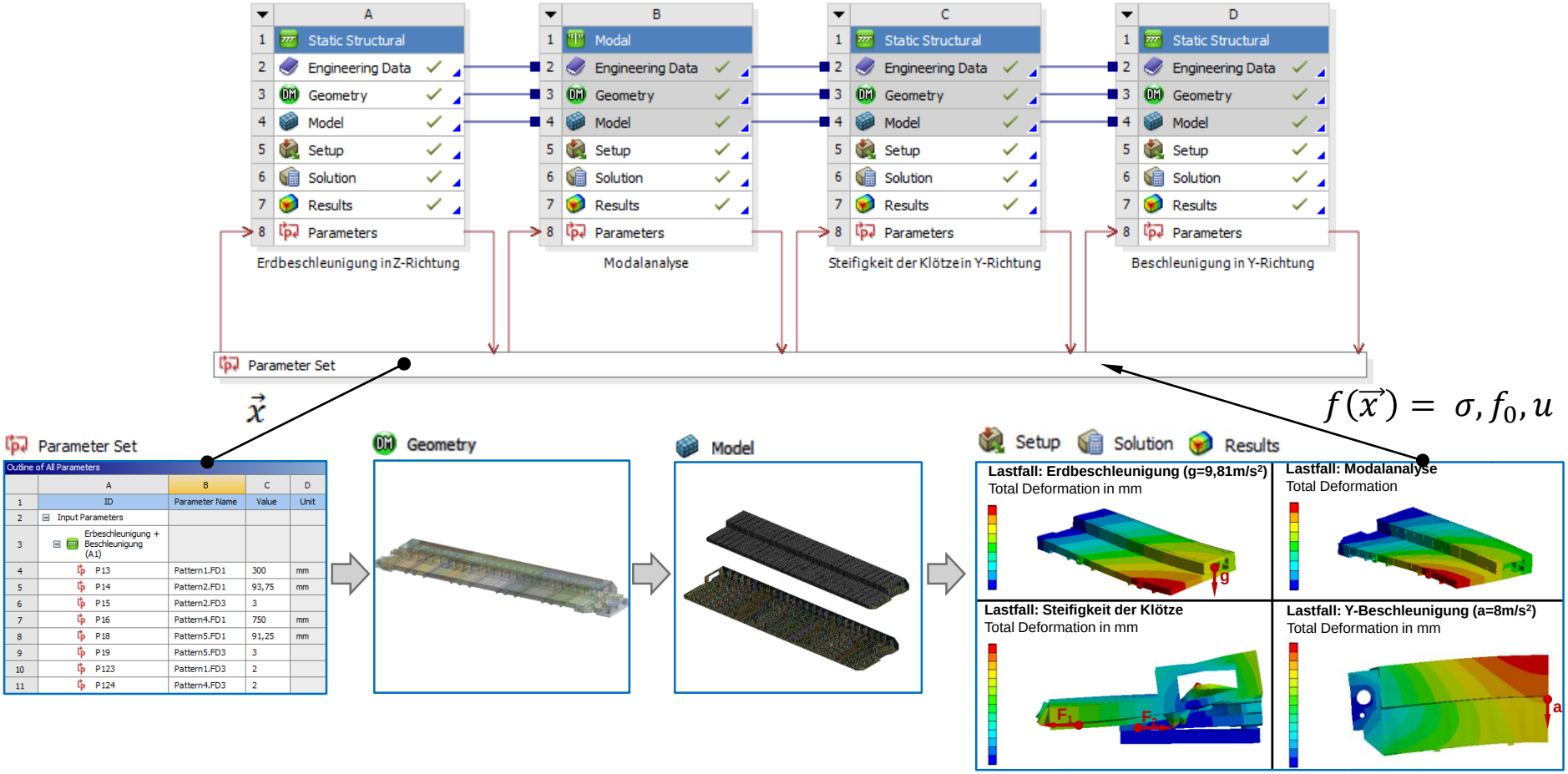
	Schnitt-länge	Anzahl Schnitte	Anzahl Biegungen	Schweiß-länge	…
Teil 1	…	…	…	…	…
Teil 2	…	…	…	..	…

Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse

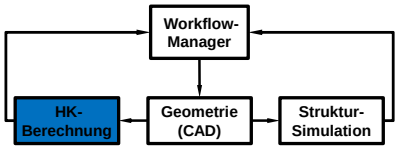


TRUMPF

Kopplung Geometrie mit Strukturanalyse



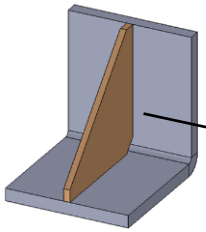
Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse



TRUMPF

Parametrische Herstellkostenberechnung

x_1	x_2	x_3	...
2	1,5	20	..



SolidWorks

Mulitbody Part
Volumenmodell

Design Table

Geometrie

Zuschnitts- und Schweißnahtlisten

Anwendung

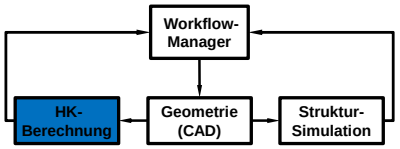
API-Zugriff

Herstellkosten-berechnung

€HK

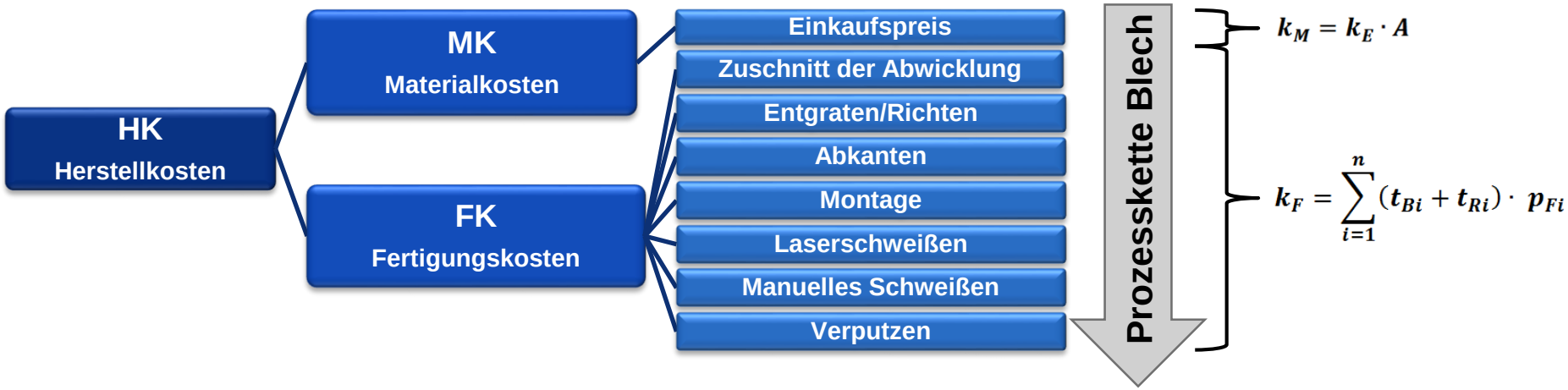
	Schnitt-länge	Anzahl Schnitte	Anzahl Biegungen	Schweiß-länge	…
Teil 1	…	…	…	…	…
Teil 2	…	…	…	..	…

Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse



TRUMPF

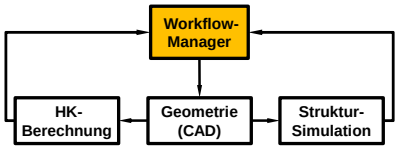
Herstellkostenmodell → (Maschinen-) Stundensatzrechnung



Datenbasis $f_{HK}(\vec{x}) = €_{HK}$

- Geometrieparameter → SolidWorks (Zuschnitts-, Schweißlisten)
- Verfahrensspezifische Parameter → TruTops Regelwerke (Laserschneiden, Laserschweißen)
- Kalkulatorische Parameter → SAP & Zeitstudien (Stundensätze, Rüst-/Montagezeiten)
- Werkstoffspezifische Parameter → SAP (Einkaufspreise, Verschrottungsgutschriften)

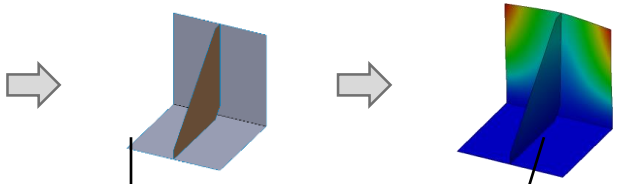
Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse

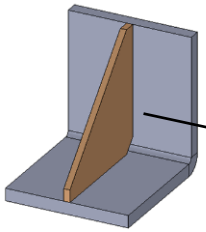


TRUMPF

Automatischer CAE-Workflow

x_1	x_2	x_3	...
2	1,5	20	..





SolidWorks

Mulitbody Part
Volumenmodell

Design Table

Geometrie

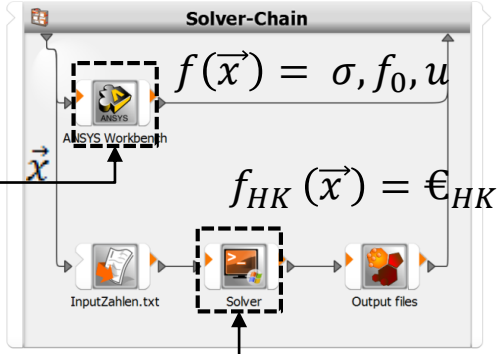
Zuschnitts- und Schweißnahtlisten

ANSYS Workbench

DesignModeler
Oberflächenmodell

Parameter Set

OptiSlang



Anwendung

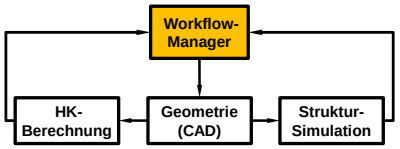
API-Zugriff

Herstellkosten-berechnung

	Schnitt-länge	Anzahl Schnitte	Anzahl Biegungen	Schweiß-länge	...
Teil 1	…	…	…	…	…
Teil 2	…	…	…	..	…

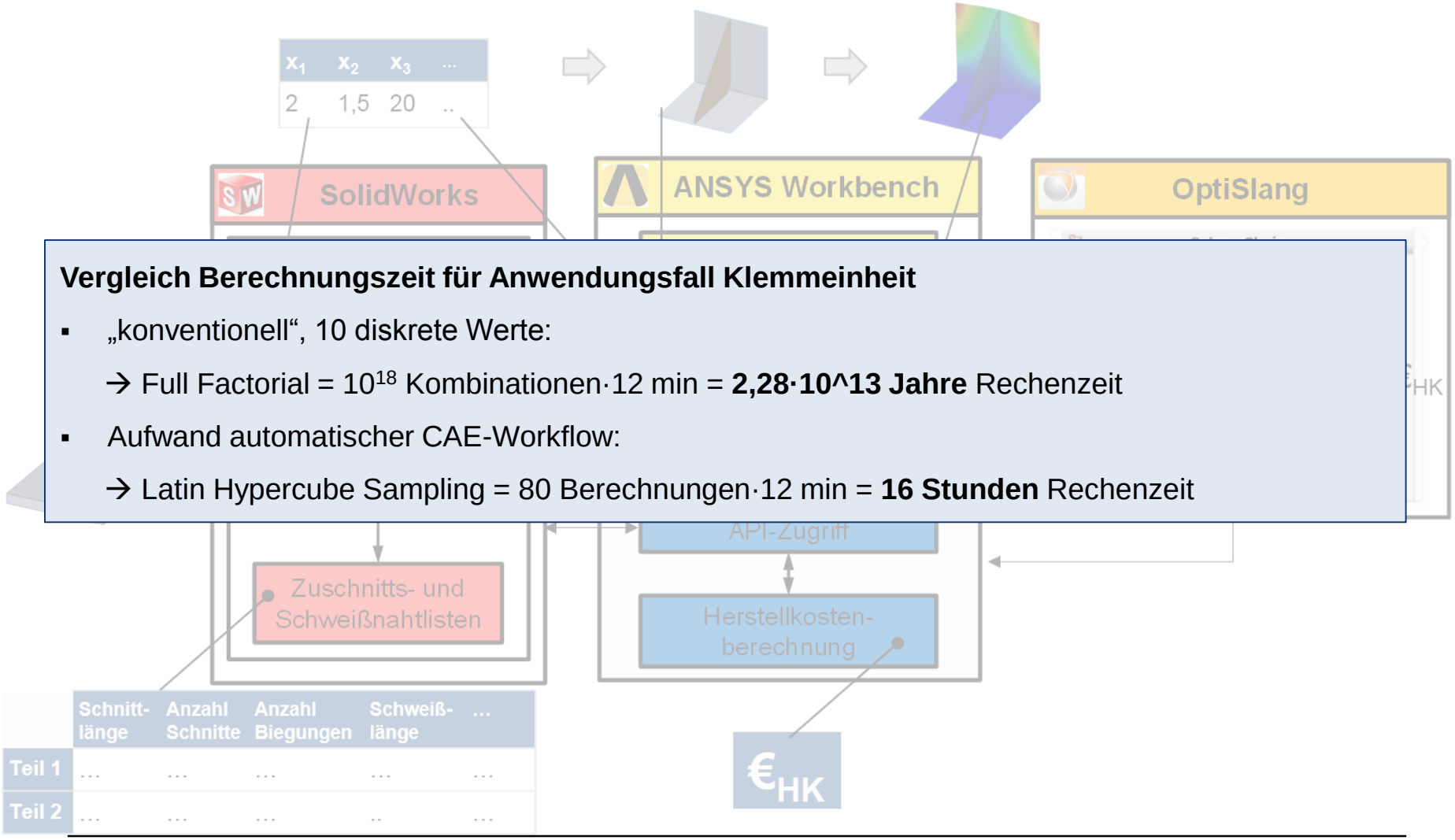
$€_{HK}$

Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse



TRUMPF

Automatischer CAE-Workflow



Vergleich Berechnungszeit für Anwendungsfall Klemmeinheit

- „konventionell“, 10 diskrete Werte:

  → Full Factorial = 10^{18} Kombinationen·12 min = **2,28·10^13 Jahre** Rechenzeit

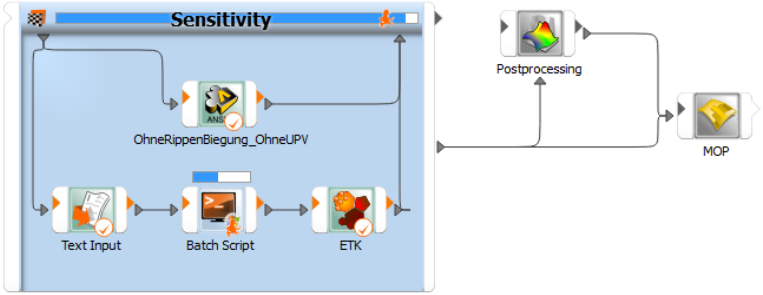
- Aufwand automatischer CAE-Workflow:

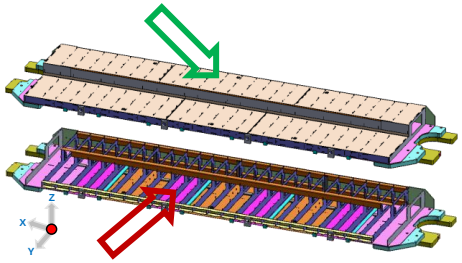
  → Latin Hypercube Sampling = 80 Berechnungen·12 min = **16 Stunden** Rechenzeit

Ergebnisse

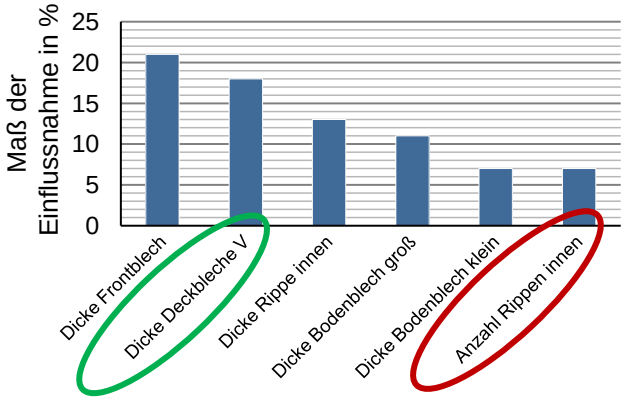
Sensitivitäts-Analysen

Durchführung von Sensitivitätsstudien

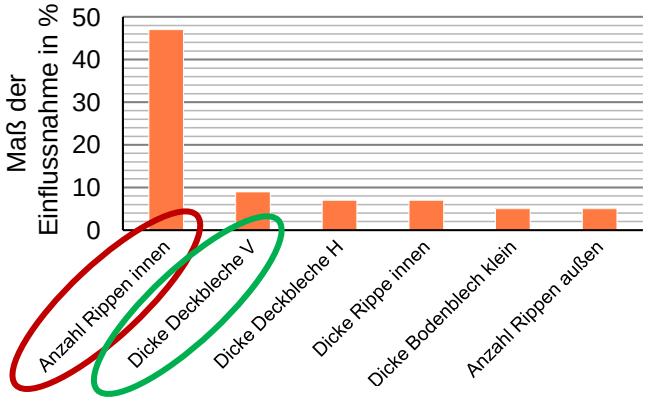




Nachgiebigkeit bei
Y-Beschleunigung (CoP = 89%)



Herstellkosten gesamt
(CoP = 98%)



→ Anzahl Rippen ist Kostentreiber

→ aber nicht maßgebend für Steifigkeit in Y

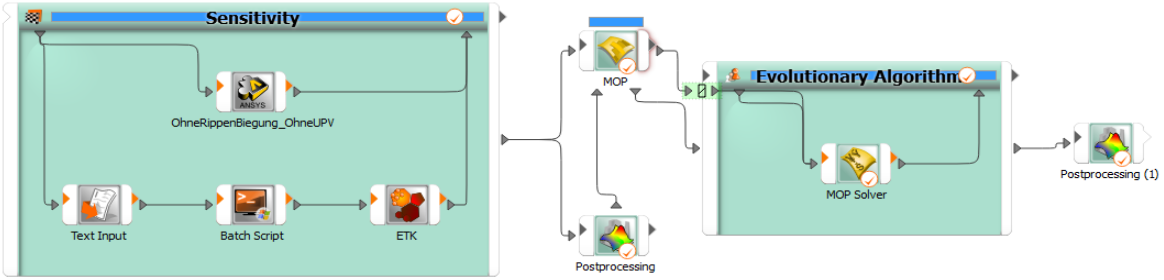
→ Gleiche Funktion kann „günstiger“ gelöst werden

→ Zusammenhänge zwischen Kosten, Strukturmechanik und Geometrie werden transparent

Ergebnisse

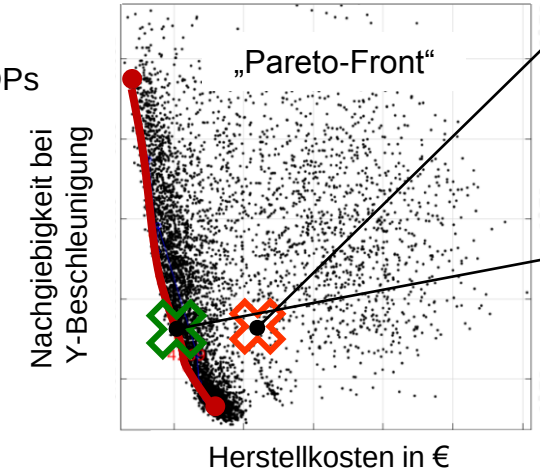
Kombinierte Struktur- und Herstellkostenoptimierung

Einbindung eines Optimierungsalgorithmus

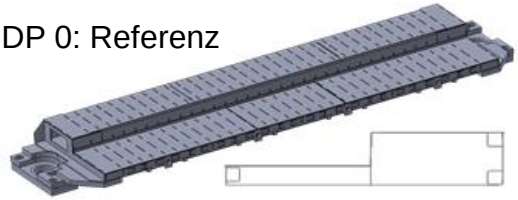


- Mehrziel-Optimierung auf MOP

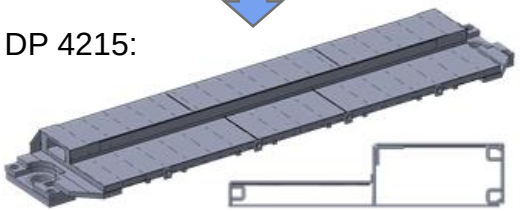
Berechnung
von 10`000 DPs
in ca. 5 min



DP 0: Referenz



DP 4215:



- Technische Zielgrößen:
  Δu_i $f_{0,i}$ k_{stiff} σ_{mises} ✓
- Wirtschaftliche Zielgröße:
  $€_{HK}$ → **MIN**

→ Herstellkostenreduktion um 27 % bei geforderter / gleicher Steifigkeit

Zusammenfassung

Parametrische Strukturoptimierung

- Meta-Modellbildung über Sampling-Methoden erlaubt wirtschaftliche Berechnungs- und Analysezeiten auch bei vielen Parametern und Lastfällen
- bereits „einfach aufgebaute“ Workflows erzielen sehr gute Ergebnisse

Kombinierte Struktur- und Herstellkostenanalyse

- erlaubt erstmalig ganzheitliche Analyse/Optimierung komplexer Blechbaugruppen
- multidisziplinäre Analyse ermöglicht
  - Identifizierung von Kostentreibern
  - kosteneffizientes Konstruieren
- wird zukünftig in verschiedensten Maschinenprojekten bei TRUMPF eingesetzt

UND JETZT FREUE ICH MICH AUF IHRE FRAGEN!

Christoph Blömker, Vorentwicklung Vernetzte Systeme

Weimar, 02.06.2017