

Verfahren der Bewegungsplanung zur Energieminimierung bei Maschinen und Robotern

- **Motivation**
 - **Produktion in der Automobilindustrie: ca. 49% der elektrischen Energie wird von Industrierobotern benötigt**
 - **davon ca. 68% in Bewegungsphasen**
 - **ca. ein Drittel der gesamten benötigten elektrischen Energie in Bewegungsphasen**
 - **andere servo- oder kurvenscheibengetriebene Maschinenbewegungen noch gar nicht berücksichtigt**
- **Proof of Concept bei AUDI**
 - **Energiereduzierung bei PTP-Bewegungen um ca. 10 bis 20%**
- **AREUS-Projekt: Automation and Robotics for EUropean Sustainable manufacturing**
 - **Robotics and Automation Laboratory at Chalmers University of Technology Göteborg: Reduzierung der Energie in Bewegungsphasen um ca. 10 bis 35%**
 - **für Multi-Roboter-Systeme zeigen Tests Energieeinsparungen bis zu 40%**



Proof of Concept bei AUDI

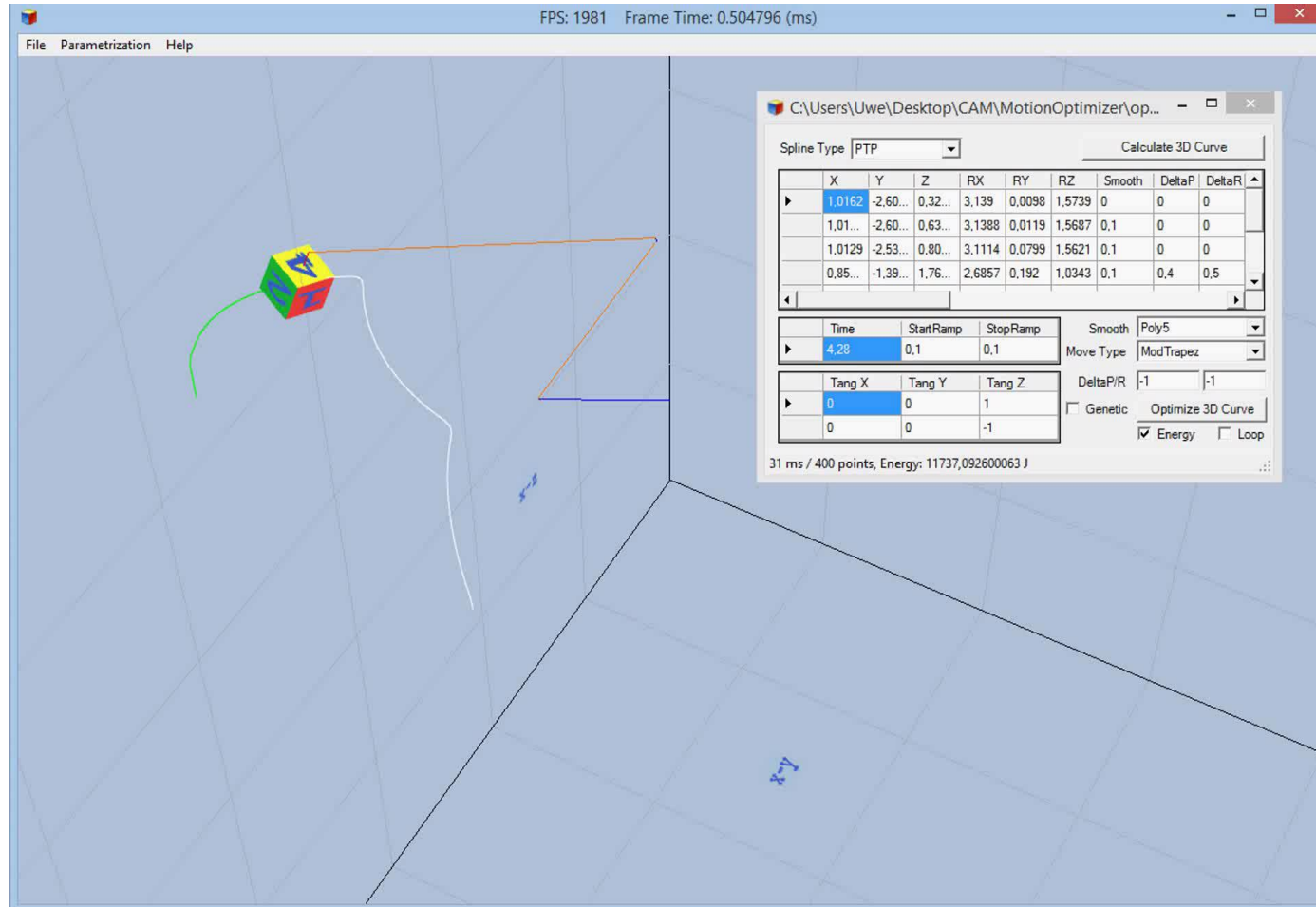
Roboter vorher

Roboter nachher

Energieeinsparung

prognostiziert: 25%

gemessen: 15%



Lineare Splines zur Energieoptimierung

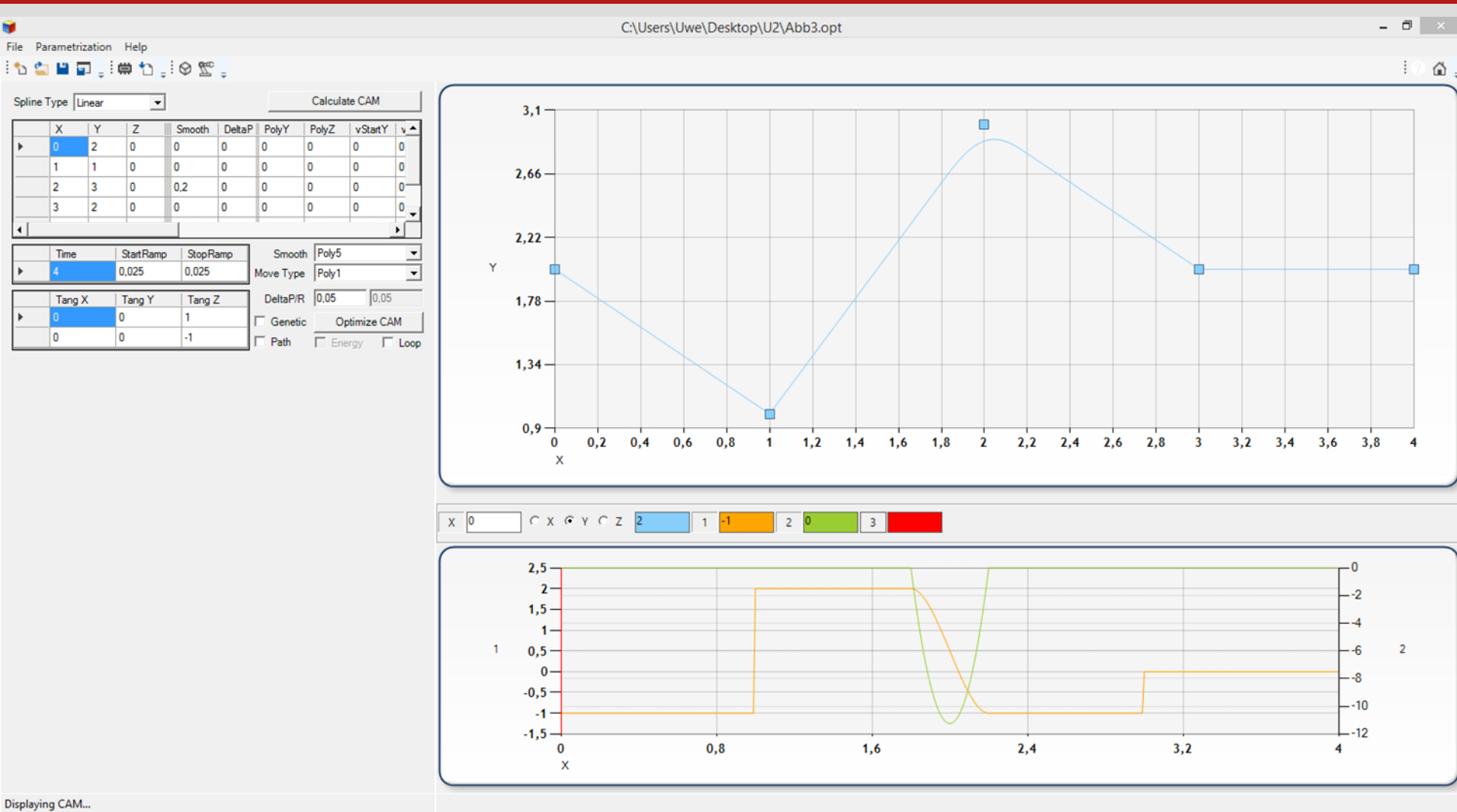
- **Status Quo**
 - **Bewegungen in der Robotik: Punkt-zu-Punkt-, Linear- oder Kreisbahnen mit Überschleifen und Bahnsplines mit unterschiedlichen Rampenprofilen**
 - **Bewegungen bei Kurvenscheibenmaschinen: Sinoidale oder polynomiale Segmente in Abhängigkeit einer Leitachse, welche über ein Rampenprofil gesteuert wird**
 - **Mathematischer Zusammenhang: „Wann ist eine Achse wo bzw. wann hat eine Bahnkoordinate einen bestimmten Wert“**
 - **Funktionaler Zusammenhang zweistufig: die Achsposition bzw. Bahnkoordinate ist abhängig von einer Leitachsposition bzw. vom Bahnparameter/Bahnlänge, dynamisch verfahren wird die Leitachse bzw. der Werkzeugmittelpunkt (TCP) auf der Bahn**
- **Warum 1D und 3D/6D Lineare Splines mit Glättung?**
 - **Tests zeigen gegenüber anderen polynomialen Funktionen (Splinearten) zusätzliches Energieeinsparpotenzial von ca. 10%**
 - **Sehr einfach handhabbar für Anwender**

Lineare Splines zur Energieoptimierung

- Idee
 - **Energieminimierung bei Maschinen mit zusammenspielenden Achsen durch rein geometrische Beschreibung mit mehrmalig stetig ableitbaren Funktionen**
- Was bedeutet energieminimal?
 - **Kürzeste Wege: Bewegungen so gestalten, dass die beteiligten Achsen möglichst kurze Wege fahren**
 - **Minimale Maximalgeschwindigkeiten bzw. geometrische Steigungen: $E_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$ und $F_R \propto v_{\max}$**
- Umsetzung
 - **1D Lineare Splines mit weicher Glättung für synchrone und/oder asynchrone Achsbewegungen bei Kurvenscheibensteuerung**
 - **3D/6D Lineare Splines mit weicher Glättung für synchrone und/oder asynchrone TCP-Bewegungen bei Bahnsteuerung**
 - **Gemeinsamer Bahnparameter erlaubt dynamische Umschaltung zwischen Kurvenscheiben- und Bahnsteuerung**

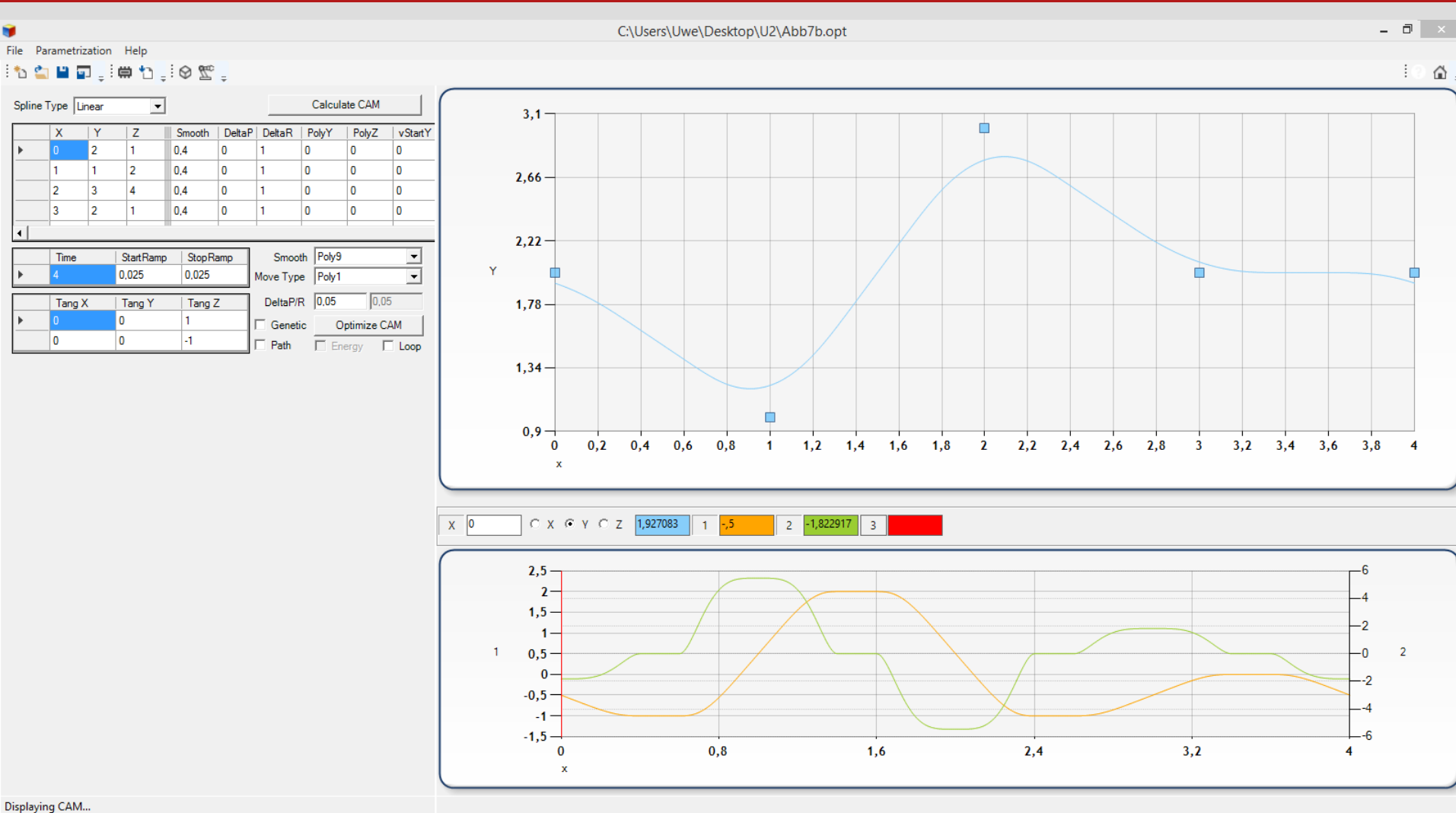


Was sind Lineare Splines mit Glättung?



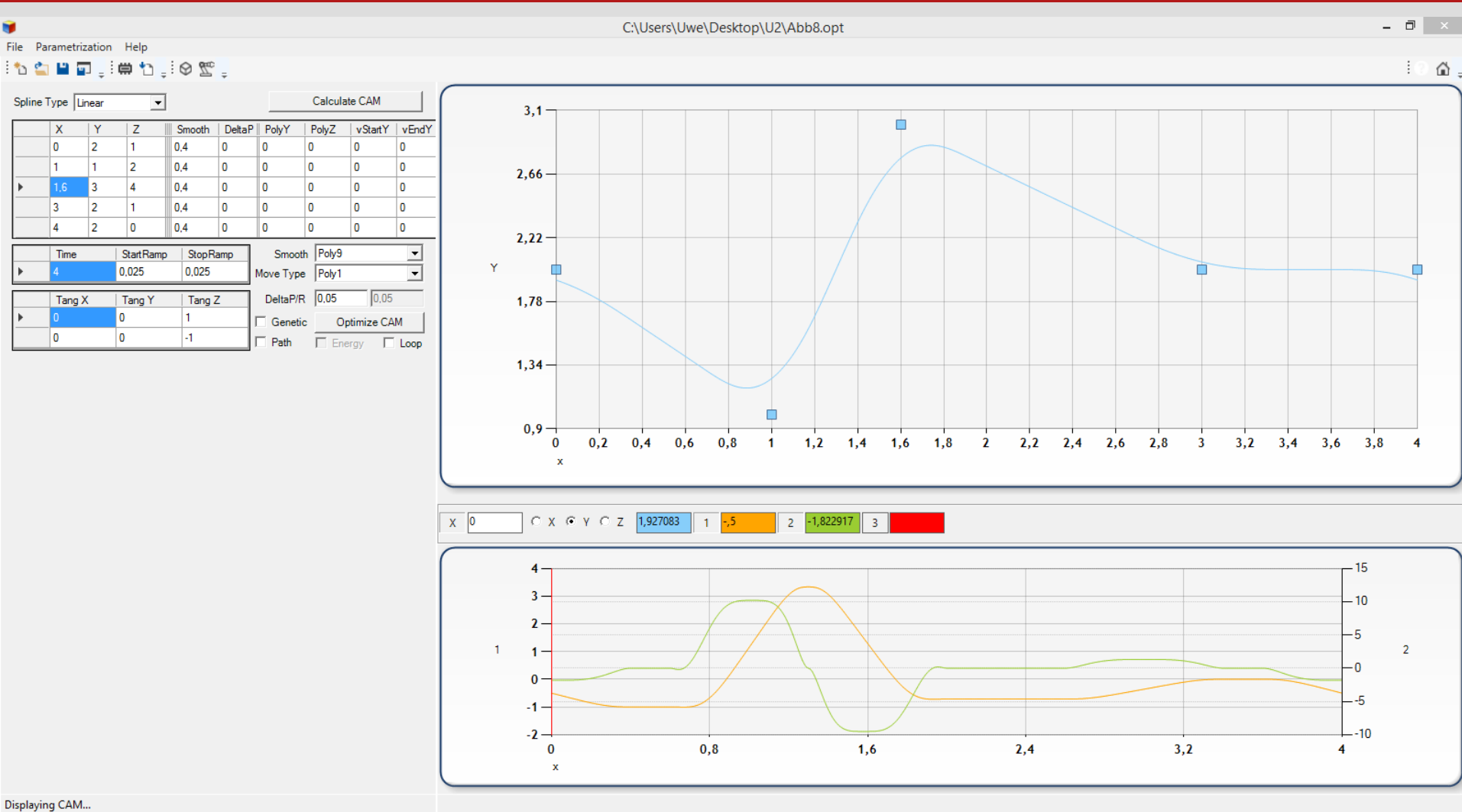
Displaying CAM...

Weiche Lineare Splines



Displaying CAM...

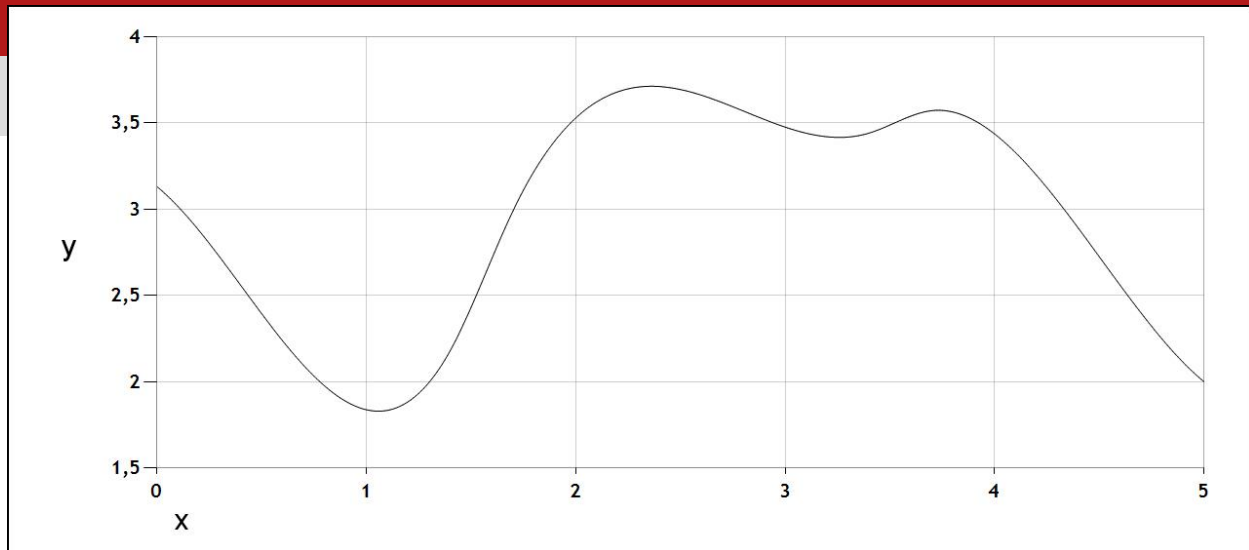
Splinesstützpunkte



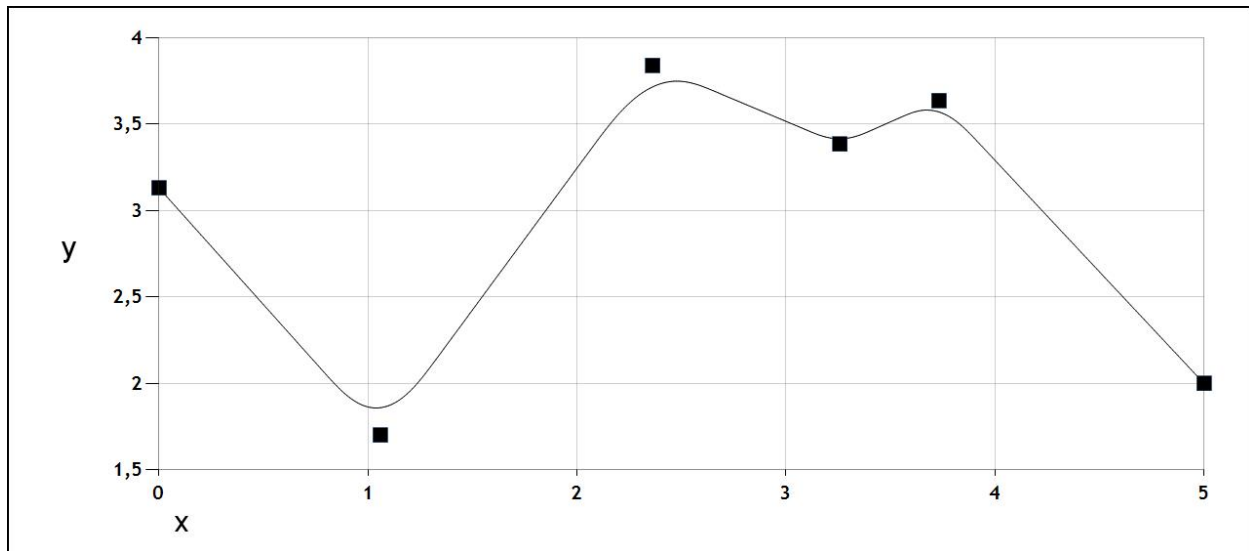
Displaying CAM...

Approximation mit Linearen Splines

Kubischer Spline

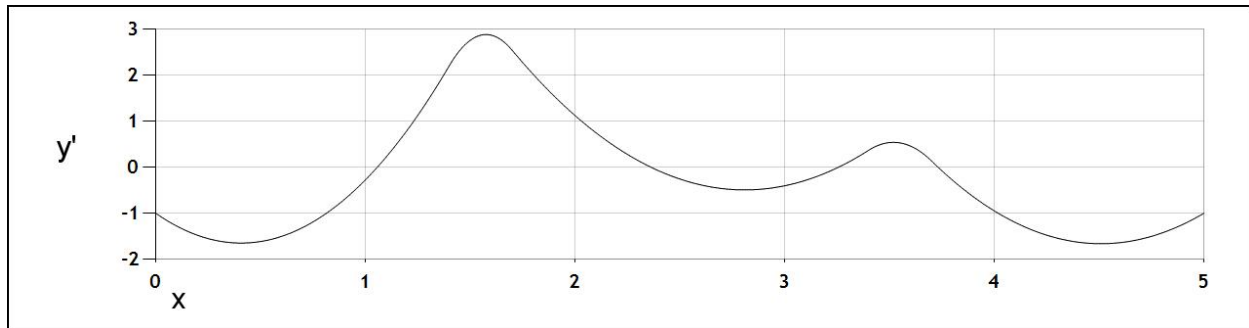


Geglätteter Linearer Spline approximiert Kubischen Spline

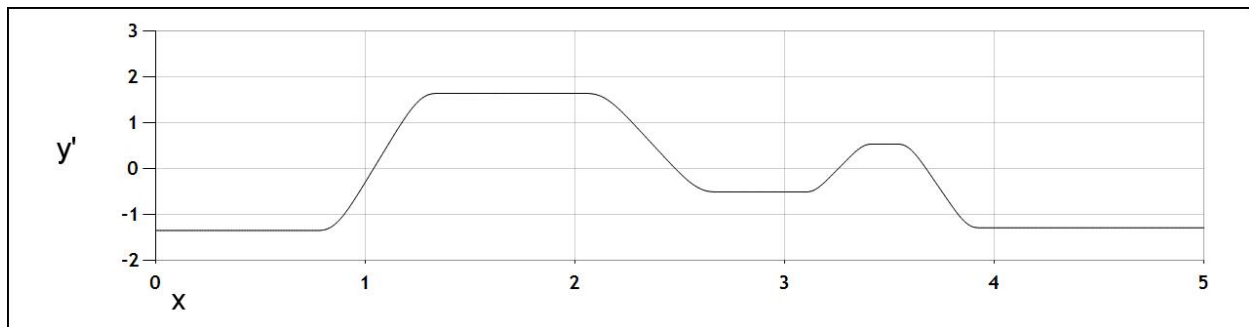


Lineare Splines mit Glättung sind v-minimal

Kubischer Spline
1. Ableitung

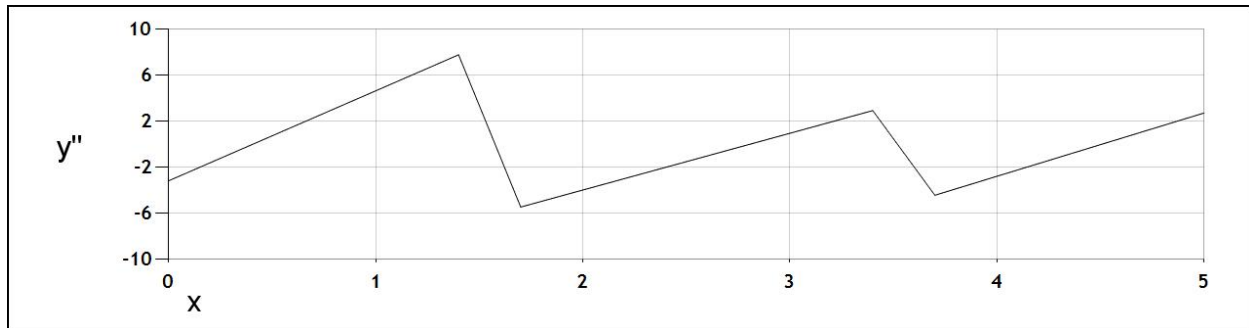


Geglätteter Linearer Spline
1. Ableitung

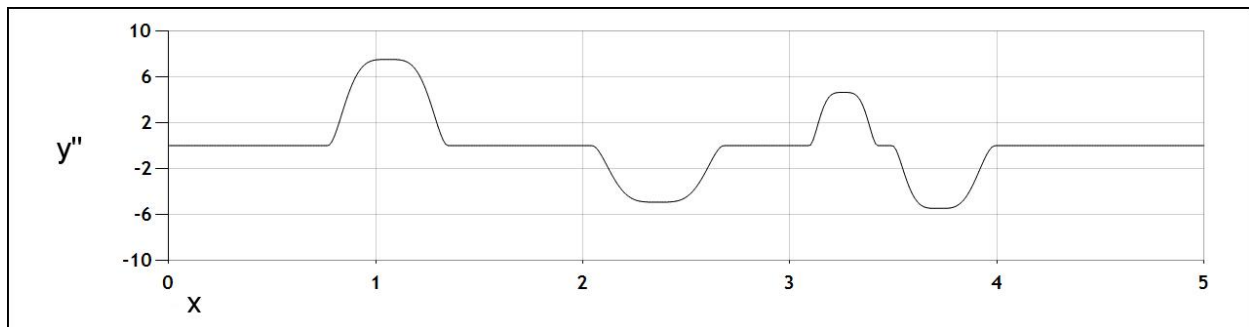


Lineare Splines Beschleunigungsmaxima gedeckelt

Kubischer Spline
2. Ableitung



Geglätteter Linearer Spline
2. Ableitung



Energieminimierung durch Parameteroptimierung

- **Freie Parameter**
 - **Geometrische Stützpunkte Kurvenscheiben oder Bahn -> synchrone Bewegung wenn jeweilige Stützpunkte gleich für alle Achsen/Koordinaten**
 - **Glättungsbereiche symmetrisch/asymmetrisch -> synchrone Bewegung wenn jeweilige Glättungsbereiche gleich für alle Achsen/Koordinaten**
- **Randbedingungen**
 - **Achsgrenzen/Bahngrenzen**
 - **Achs-/Bahndynamik in Abhängigkeit der Leitachs-/Bahnparameterdynamik**
 - **Kollisionsmonitoring**
- **Zielfunktion**
 - **Energieaufnahme „an der Steckdose“ unter Verwendung des mechatronischen Maschinenmodells**
- **Anwendungen**
 - **Generell bei Maschinen mit zusammenspielenden synchronen und/oder asynchronen Bewegungen**
 - **In der Robotik: Bahnsteuerung und Kurvenscheibensteuerung verschmelzbar durch Verwendung eines gemeinsamen Bahnparameters**
 - **Exakte Übergänge $X, X', X'' \Leftrightarrow q, q', q''$**



Mechatronisches Modell von der Bahn bis zur Steckdose

Optimized_up3_1_SiMo.ssp3 - SERVOSOFT - Last saved by v3.3.307 ACT PRO

File Edit Axis View Tools Languages Help

Max-Stop v2 Mode

Power

- Axis1
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor
- Axis2
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor
- Axis3
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor
- Axis4
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor
- Axis5
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor
- Axis6
- Rotary
- T1: Gearbox
- Drive & Motor

System Power

Cycle time: 5.63 s Auto

Shoter sequences: Maintain last state

Sample time: 2.815 ms Quick

Number of samples: 2.000

Supply: 400 Vac 3

Nominal bus voltage: 750 Vdc

Threshold bus voltage: 750 Vdc Auto

Total bus capacitance: 2.178 mF

Max bus stored energy: 0 J

System Supply Power

Overview

Power Flow	Value
RMS power	3.289 W
Total cont power	2.340 W
Net cont power	1.986 W
Peak power	9.928 W
Supply cont power	2.163 W
Supply peak power	9.928 W
Regen cont power	176.9 W
Regen peak power	1.935 W
Bleeder cont power	0 W

Energy cost

Energy cost: \$ 0.10 /kWh

Runtime: 8 hours/day 7 days/week

52 weeks/year 10 years

System energy cost: \$ 578.24 /year \$ 5.782 lifetime

Analysis

Additional capacitance for no bleeder power: 0 mF

Potential cost savings: \$ 0.00 /year \$ 0.00 lifetime

By adding 0 mF capacitance or switching to a regen module, \$ 0.00 /year in energy costs could be saved for the investment in capacitor/regen modules.

OK Apply Cancel

Beispiel Roboter Punkt-zu-Punkt vorher

The screenshot displays a 3D workspace with a robot arm model and a path. The path is a white line with a red and blue robot arm at the end. The workspace has a grid and axes labeled X-Y and X-Z. The software interface includes a menu bar (File, Parametrization, Help) and a status bar (FPS: 208, Frame Time: 4.80769 (ms)).

The 'Calculate 3D Curve' dialog box is open, showing the following data:

Spline Type: PTP

	X	Y	Z	RX	RY	RZ	Smooth	DeltaP	DeltaR	dq1
▶	2,40...	0,24...	1,67...	-3,01...	-0,66...	0,363	0	0	0	0
	2,40...	0,24...	1,67...	-3,01...	-0,66...	0,363	0	0	0	0
	1,90...	-0,10...	1,84...	2,7079	-0,40...	0,8507	0,1	0	0	0
	1,46...	-0,47...	1,56...	2,7529	-0,03...	1,2474	0,1	0,4	0,3	0
	0,87...	-1,63...	1,6076	2,9157	0,2161	1,4694	0,1	0,4	0,3	0

Time	StartRamp	StopRamp	
▶	5,63	0,2	0,2

Tang X	Tang Y	Tang Z	
▶	0	0	0
	0	0	0

Smooth: Poly5
Move Type: ModTrapez
DeltaP/R: -1 -1
 Genetic Optimize 3D Curve
 Path Energy Loop

94 ms / 400 points, Energy: 13174,2828009019 J

Beispiel Roboter 1D Linear Spline pro Achse nachher

FPS: 264 Frame Time: 3.78788 (ms)

File Parametrization Help

C:\Users\Uwe\Desktop\CAM\MotionOptimizer\op570r6_up3_1_BB_Fixed_Robot_opt.opt

Spline Type: PTP Calculate 3D Curve

	X	Y	Z	RX	RY	RZ	Smooth	DeltaP	DeltaR	dq1	dq2	dq3	dq4	dq5	dq6	sq2	sq3	sq4	sq5	sq6
▶	2.40...	0.24...	1.67...	-3.01...	-0.66...	0.363	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.40...	0.24...	1.67...	-3.01...	-0.66...	0.363	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.90...	-0.10...	1.84...	2.7079	-0.40...	0.8507	0.58	0	0	-0.16	-0.08	0	-0.16	-0.24	0.24	0.42	0.42	0.34	0.42	0.14
	1.85...	-0.85...	1.83...	3.0409	-0.06...	0.9494	0.42	0.4	0.3	0	-0.24	-0.2	-0.24	-0.24	0.24	0.18	0.34	0.3	0.54	0.22
	1.22...	-2.03...	1.3516	3.1677	-0.07...	1.1714	0.42	0.4	0.3	0.08	0.16	0	0.16	0	0	0.42	0.1	0.14	0.1	0.1

Time	StartRamp	StopRamp
▶ 5.63	0,32	0,24

Smooth: Poly5
Move Type: ModTrapez

Tang X	Tang Y	Tang Z
▶ 0	0	0
0	0	0

DeltaP/R: -1 | -3

Genetic Optimize 3D Curve
 Path Energy Loop

78 ms / 400 points, Energy: 5988,88294219609 J

Beispiel Roboter lineare Bahn vorher

The screenshot displays a 3D workspace with a robot arm model and a control panel. The control panel includes a table of spline data and various configuration options.

Control Panel Data:

Time	StartRamp	StopRamp	Smooth
5.63	0,2	0,2	Poly5

Configuration Options:

- Move Type: ModTrapez
- DeltaP/R: -4, -1
- Genetic:
- Path:
- Energy:
- Loop:

Table Data:

X	Y	Z	RX	RY	RZ	Smooth	DeltaP	DeltaR	dq1
1,90...	-0,10...	1,4	2,7079	-0,40...	0,8507	0	0	0	0
1,90...	-0,10...	1,84...	2,7079	-0,40...	0,8507	0,1	0	0	0
1,46...	-0,47...	1,56...	2,7529	-0,03...	1,2474	0,1	0,4	0,3	0
0,87...	-1,63...	1,6076	2,9157	0,2161	1,4694	0,1	0,4	0,3	0
0,97...	-2,50...	1,39...	3,0185	0,3074	1,5493	0,1	0,15	0,5	0

Additional Parameters:

Tang X	Tang Y	Tang Z
0	0	0
0	0	0

Summary: 94 ms / 400 points, Energy: 14706,2888965435 J

Beispiel Roboter 3D/6D Linear Spline nachher

FPS: 235 Frame Time: 4.25532 (ms)

File Parametrization Help

C:\Users\Uwe\Desktop\U2\Patente\P4298\op570r6_up3_1_Linear_opt.opt

Spline Type: Linear Calculate 3D Curve

X	Y	Z	RX	RY	RZ	Smooth	DeltaP	DeltaR	dX	dY	dZ	dRX	dRY	dRZ	sY	sZ	sRX	sRY	sRZ
1,90...	-0,10...	1,24...	2,7079	-0,40...	0,8507	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,90...	-0,10...	1,44...	2,7079	-0,40...	0,8507	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,58	0,42	0,14	0,1
1,84...	-0,86...	1,38...	3,0409	-0,06...	0,9594	0,54	0,4	0,3	0,24	0,08	0,24	-0,24	0,2	0,24	0,42	0,58	0,18	0,58	0,1
1,15...	-1,94...	1,2396	3,1877	0,0721	1,1814	0,1	0,4	0,3	0,16	0,16	0,16	0	-0,08	0,04	0,1	0,58	0,5	0,26	0,34
1,11...	-2,35...	1,28...	2,9865	-0,09...	1,0533	0,42	0,15	0,5	0,2	0	-0,16	-0,16	-0,16	0,16	0,1	0,42	0,18	0,26	0,1

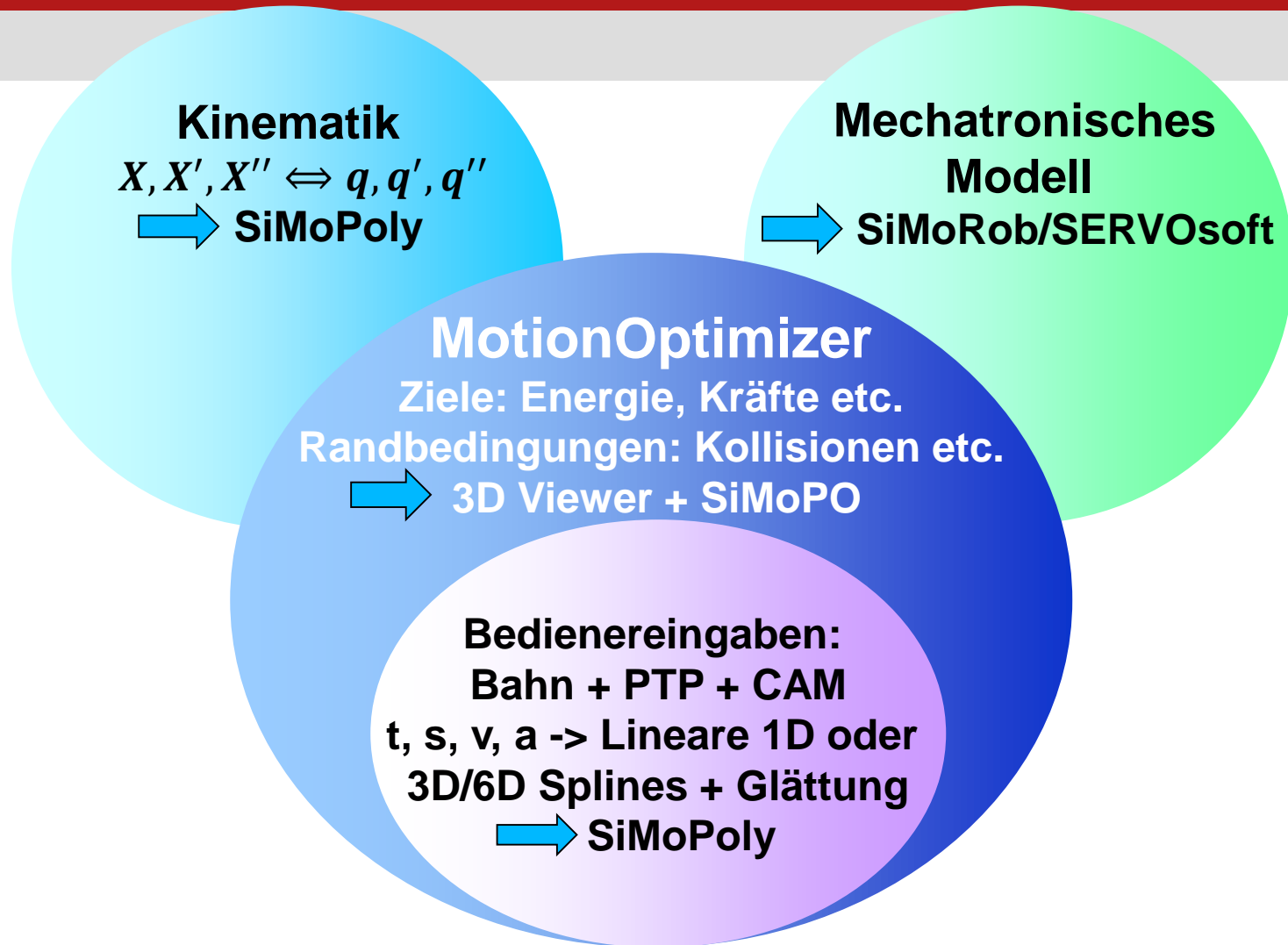
Time	StartRamp	StopRamp
5,63	0,16	0,24

Tang X	Tang Y	Tang Z
0	0	0
0	0	0

Smooth: Poly5
 Move Type: ModTrapez
 DeltaP/R: 4 5
 Genetic Optimize 3D Curve
 Path Energy Loop

94 ms / 400 points, Energy: 5765,57646442121 J

Green Automation in Motion



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Uwe Simon
Geschäftsführer

Telefon: 0049 6281 509111

uwe@simon-modellierungen.de

www.simon-modellierungen.de

SIMON Modellierungen
Zittauer Weg 2
74722 Buchen im Odenwald

signo

Unternehmen

Schutz von Ideen für die
gewerbliche Nutzung

Dieses Projekt wird gefördert von der
Förderinitiative des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Energie