

# Mechatronische Netzwerke

Simulation mit LTSpice

Tutorial mit Aufgaben und Lösungen zum Umgang mit  
*Mechatronischen Netzwerken* unter Zuhilfenahme des  
Simulationssystems LTSpice.

Version 1.0

Autor: Jörg Grabow



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0  
International Lizenz

Email: [grabow@amesys.de](mailto:grabow@amesys.de)  
Homepage: [www.amesys.de](http://www.amesys.de)

12. April 2018

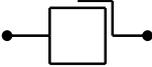
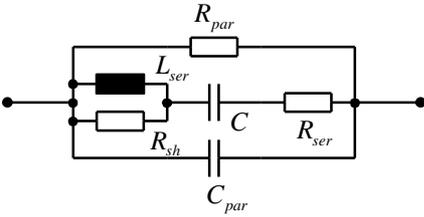
2

**Mechatronik.lib**

### 3

## 3.1 Träge Masse – Mechatronische Kapazität

Tab. 1: träge Masse (Primärgröße Impuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	träge Masse	1	kg
Flussgröße	Kraft	1	N
Differenzgröße	Geschwindigkeit	1	m/s
Symbol			
Ersatzschaltbild			

Tab. 2: Component Attribute Editor

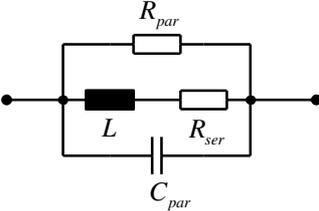
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	C_m_p
Value2	
SpiceLine	m=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der trägen Masse erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*.

**Bsp.:** träge Masse von 1000 kg  
 $m=1E3$

### 3.2 Steifigkeit – Mechatronische Induktivität

Tab. 3: Steifigkeit (Primärgröße Impuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Steifigkeit	1	N/m
Flussgröße	Kraft	1	N
Differenzgröße	Geschwindigkeit	1	m/s
Symbol			
Ersatzschaltbild			

Tab. 4: Component Attribute Editor

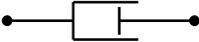
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	L_m_p
Value2	
SpiceLine	c= Rser=0
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der Steifigkeit erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der zur Berechnung genutzte Induktivitätswert berechnet sich aus der inversen Steifigkeit. Der Parallelwiderstand ist ohne eine Werteangabe automatisch unendlich groß. Der Wert des seriellen Widerstandes muss explizit angegeben werden.

**Bsp.:** Steifigkeit von 100 N/m ohne Reibungsverluste  
 $c=100$   $R_{ser}=0$

### 3.3 Dämpfung – Mechatronischer Widerstand

Tab. 5: Dämpfung (Primärgröße Impuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Dämpfungskonstante	1	$\text{N} \times \text{s} / \text{m}$
Flussgröße	Kraft	1	N
Differenzgröße	Geschwindigkeit	1	m/s
Symbol			
Ersatzschaltbild	$R_m = \frac{1}{k_s}$ 		

Tab. 6: Component Attribute Editor

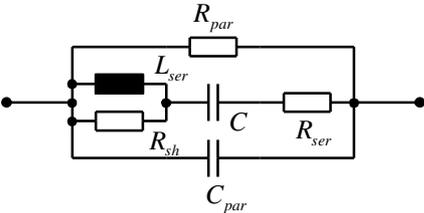
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	k
SpiceModel	
Value	R_m_p
Value2	
SpiceLine	k=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der Dämpfungskonstante erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der zur Berechnung genutzte Widerstandswert berechnet sich aus der inversen Dämpfungskonstante. Weitere Ersatzgrößen existieren für die (lineare) Dämpfungskonstante nicht.

**Bsp.:** Dämpfungskonstante von 0.01 Ns/m  
k=0.01

### 3.4 Massenträgheitsmoment – Mechatronische Kapazität

Tab. 7: Massenträgheitsmoment (Primärgröße Drehimpuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Massenträgheitsmoment	1	$\text{N} \times \text{m} \times \text{s}^2$
Flussgröße	Moment	1	$\text{N} \times \text{m}$
Differenzgröße	Winkelgeschwindigkeit	1	rad/s
Symbol			
Ersatzschaltbild			

Tab. 8: Component Attribute Editor

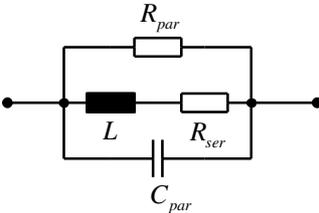
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	C_m_d
Value2	
SpiceLine	Js=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes des Massenträgheitsmomentes erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*.

**Bsp.:** Massenträgheitsmoment von  $5.2 \text{ N} \times \text{m} \times \text{s}^2$   
Js=5.2

### 3.5 Torsionssteifigkeit – Mechatronische Induktivität

Tab. 9: Torsionssteifigkeit (Primärgröße Drehimpuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Torsionssteifigkeit	1	$\text{N}\times\text{m}$
Flussgröße	Moment	1	$\text{N}\times\text{m}$
Differenzgröße	Winkelgeschwindigkeit	1	$\text{rad}/\text{s}$
Symbol			
Ersatzschaltbild			

Tab. 10: Component Attribute Editor

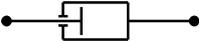
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	L_m_d
Value2	
SpiceLine	ct= Rser=0
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der Steifigkeit erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der zur Berechnung genutzte Induktivitätswert berechnet sich aus der inversen Steifigkeit. Der Parallelwiderstand ist ohne eine Werteangabe automatisch unendlich groß. Der Wert des seriellen Widerstandes muss explizit angegeben werden.

**Bsp.:** Torsionssteifigkeit von  $100 \cdot \text{N}\times\text{m}$  ohne Reibungsverluste  
 $c=100$   $R_{ser}=0$

### 3.6 Torsionsdämpfung – Mechatronischer Widerstand

Tab. 11: Torsionsdämpfung (Primärgröße Drehimpuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Dämpfungskonstante	1	$N \times m \times s / rad$
Flussgröße	Moment	1	$N \times m$
Differenzgröße	Winkelgeschwindigkeit	1	rad/s
Symbol			
Ersatzschaltbild	$R_m = \frac{1}{k_t}$ 		

Tab. 12: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	kt
SpiceModel	
Value	R_m_d
Value2	
SpiceLine	kt=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der Dämpfungskonstante erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der zur Berechnung genutzte Widerstandswert berechnet sich aus der inversen Dämpfungskonstante. Weitere Ersatzgrößen existieren für die (lineare) Dämpfungskonstante nicht.

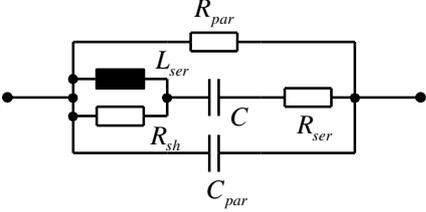
**Bsp.:** Dämpfungskonstante von  $0.01 \text{ Nm} \times \text{s} / \text{rad}$   
 $kt=0.01$

### 3.7 Schwere Masse – Mechatronische Kapazität

Tab. 13: Kapazität (Primärgröße schwere Masse)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Kapazität	1	$\text{kg} \times \text{s}^2 / \text{m}^2$
Flussgröße	Massestrom	1	$\text{kg} / \text{s}$
Differenzgröße	Druckdifferenz/Dichte	1	$\text{m}^2 / \text{s}^2$

Symbol 

Ersatzschaltbild 

Tab. 14: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	C_m_h
Value2	
SpiceLine	C=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der schweren Masse erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*.

**Bsp.:** Kapazität von  $10 \frac{\text{kg} \times \text{s}^2}{\text{m}^2}$   
C=10

### 3.8 Rohrleitung – Mechatronische Induktivität

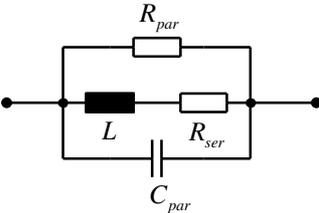
Tab. 15: Rohrleitung (Primärgröße schwere Masse)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Induktivität	1	$\text{m}^2/\text{kg}$
Flussgröße	Massestrom	1	$\text{kg}/\text{s}$
Differenzgröße	Druckdifferenz/Dichte	1	$\text{m}^2/\text{s}^2$

Symbol



Ersatzschaltbild



Tab. 16: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	C
SpiceModel	
Value	L_m_h
Value2	
SpiceLine	L= Rser=0
SpiceLine2	

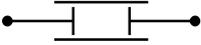
Die Eingabe des Größenwertes der Steifigkeit erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der Parallelwiderstand ist ohne eine Werteangabe automatisch unendlich groß. Der Wert des seriellen Widerstandes muss explizit angegeben werden.

**Bsp.:** Induktivität von  $100 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$  ohne Reibungsverluste

$$L=100 \text{ Rser}=0$$

### 3.9 Rohrreibung – Mechatronischer Widerstand

Tab. 17: Rohrreibung (Primärgröße Drehimpuls)

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Rohrreibung (linear)	1	$\text{m}^2/\text{kg}\times\text{s}$
Flussgröße	Massestrom	1	$\text{kg}/\text{s}$
Differenzgröße	Druckdifferenz/Dichte	1	$\text{m}^2/\text{s}^2$
Symbol			
Ersatzschaltbild	$R_m = \frac{1}{k_{St}}$ 		

Tab. 18: Component Attribute Editor

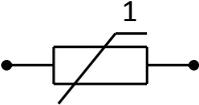
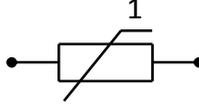
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	ks
SpiceModel	
Value	R_m_h
Value2	
SpiceLine	ks=
SpiceLine2	

Die Eingabe des Größenwertes der linearen Dämpfungskonstante erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der zur Berechnung genutzte Widerstandswert berechnet sich aus der inversen Stokes'schen Dämpfungskonstante. Weitere Ersatzgrößen existieren für die (lineare) Dämpfungskonstante nicht.

**Bsp.:** Dämpfungskonstante von  $0.01 \text{ m}^2/\text{kg}\times\text{s}$   
ks=0.01

### 3.10 Nichtlinearitäten – nichtlinearer Widerstand Type 1

Tab. 19: nichtlinearer Widerstand Type 1

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Widerstand (nichtlinear)	1	[X]
Flussgröße	beliebig	1	[X]
Differenzgröße	beliebig	1	[X]
Symbol			
Ersatzschaltbild	$R_{L1}(Y) = \sqrt[n]{R_1} \cdot Y^{\frac{n-1}{n}}$  $Y = R_1 \cdot I_X^n$		

Tab. 20: Component Attribute Editor

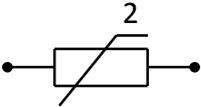
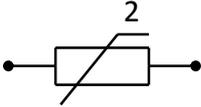
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	U1
SpiceModel	
Value	RL1
Value2	
SpiceLine	RL1=
SpiceLine2	n=

Die Eingabe des Größenwertes des Widerstandes  $R_1$  erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der Exponent der Flussgröße  $I_X$  wird in der *SpiceLine2* Variable n festgelegt. Der zur Simulation genutzte Widerstandswert  $R_{L1}(Y)$  wird aus  $R_1$  und n berechnet. Weitere Ersatzgrößen existieren für den nichtlinearen Widerstand nicht.

**Bsp.:** RL1=100  
n=2

### 3.11 Nichtlinearitäten – nichtlinearer Widerstand Type 2

Tab. 21: nichtlinearer Widerstand Type 2

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Widerstand (nichtlinear)	1	[X]
Flussgröße	beliebig	1	[X]
Differenzgröße	beliebig	1	[X]
Symbol			
Ersatzschaltbild	$R_{L2}(Y) = R_2 \cdot \frac{1}{Y^{n-1}}$  $I_X = \frac{1}{R_2} \cdot Y^n$		

Tab. 22: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	U1
SpiceModel	
Value	RL2
Value2	
SpiceLine	RL2=
SpiceLine2	n=

Die Eingabe des Größenwertes des Widerstandes  $R_2$  erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*. Der Exponent der Potentialgröße  $Y$  wird in der *SpiceLine2* Variable  $n$  festgelegt. Der zur Simulation genutzte Widerstandswert  $R_{L2}(Y)$  wird aus  $R_2$  und  $n$  berechnet. Weitere Ersatzgrößen existieren für den nichtlinearen Widerstand nicht.

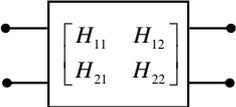
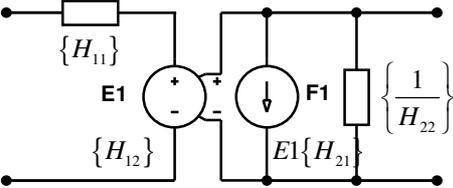
**Bsp.:** RL2=100

n=2

## 3 Wandler.lib

### 3.1 Transformator (Zweitor)

Tab. 23: Transformator

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Transformator	1	[X]
Flussgröße	beliebig	1	[X]
Differenzgröße	beliebig	1	[X]
Symbol			
Ersatzschaltbild			

Tab. 24: Component Attribute Editor

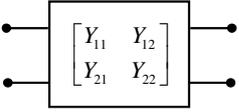
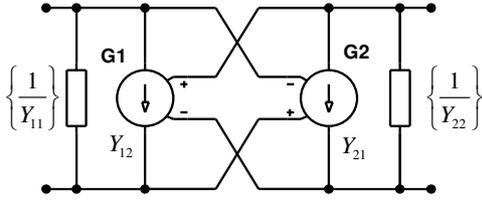
Attribute	Value
Prefix	X
InstName	U1
SpiceModel	Transformator
Value	H11=
Value2	H12=
SpiceLine	H21=
SpiceLine2	H22=

Die Eingabe des Größenwertes der Hybridmatrix erfolgt im Component Attribut Editor unter den Punkten *Value*, *Value2*, *SpiceLine* und *SpiceLine2*.

**Bsp.:** H11=1, H12=10, H21=-H12, H22=100

### 3.2 Gyrator (Zweitor)

Tab. 25: Gyrator

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	Gyrator	1	[X]
Flussgröße	beliebig	1	[X]
Differenzgröße	beliebig	1	[X]
Symbol	 $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$		
Ersatzschaltbild			

Tab. 26: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	U1
SpiceModel	Gyrator
Value	Y11=
Value2	Y12=
SpiceLine	Y21=
SpiceLine2	Y22=

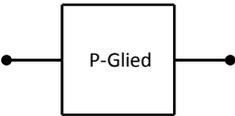
Die Eingabe des Größenwertes der Leitwertmatrix erfolgt im Component Attribut Editor unter den Punkten *Value*, *Value2*, *SpiceLine* und *SpiceLine2*.

**Bsp.:** Y11=1, Y12=10, Y21=Y12, Y22=100

## 3 Control.lib

### 3.1 P-Glied (Proportionalglied)

Tab. 27: P-Glied

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	P-Glied	1	[x]
Flussgröße	-	-	-
Differenzgröße	Potentialdifferenz	1	[x]
Symbol			
Funktion	$y(t) = K_p \cdot u(t)$		

Tab. 28: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	P-Glied
SpiceModel	
Value	P-Glied
Value2	
SpiceLine	Kp=
SpiceLine2	

Das P-Glied führt eine einfache Verstärkung des Eingangssignals (Differenzgröße) um den Faktor  $K_p$  durch. Dabei ist es unerheblich, um welches physikalische System es sich handelt.

**Bsp.:** Verstärkung des Eingangssignals um den Faktor  $K_p=2$

$$u(t) = \hat{x} \cdot \sin(\Omega t) \rightarrow y(t) = 2 \cdot \hat{x} \cdot \sin(\Omega t)$$

### 3.2 I-Glied (Integrator)

Tab. 29: I-Glied

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	I-Glied	1	[x]
Flussgröße	-	-	-
Differenzgröße	Potentialdifferenz	1	[x]
Symbol			
Funktion	$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau + C$		

Tab. 30: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	Integrator
SpiceModel	
Value	I-Glied
Value2	
SpiceLine	ic=
SpiceLine2	

Das I-Glied führt eine einfache Integration des Eingangssignals (Differenzgröße) durch. Dabei ist es unerheblich, um welches physikalische System es sich handelt. Die Eingabe der Anfangsbedingungen für die Integration erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*.

**Bsp.:** Integration der Funktion  $u(t) = \hat{x} \cdot \sin(\Omega t) \rightarrow y(t) = -\frac{\hat{x}}{\Omega} \cdot \cos(\Omega t)$

$$ic = -\frac{1}{\Omega}$$

### 3.3 D-Glied (Differenzierer)

Tab. 31: D-Glied

Beschreibung	Größe	Größenwert	Maßeinheit
Bauelement	D-Glied	1	[x]
Flussgröße	-	-	-
Differenzgröße	Potentialdifferenz	1	[x]
Symbol			
Funktion	$y(t) = K \cdot \dot{u}(t)$		

Tab. 32: Component Attribute Editor

Attribute	Value
Prefix	X
InstName	Differenzierer
SpiceModel	
Value	D-Glied
Value2	
SpiceLine	ic=
SpiceLine2	

Das D-Glied führt eine einfache Differentiation des Eingangssignals (Differenzgröße) durch. Dabei ist es unerheblich, um welches physikalische System es sich handelt. Die Eingabe der Anfangsbedingungen für die Integration erfolgt im Component Attribut Editor unter *SpiceLine*.

**Bsp.:** Differentiation der Funktion  $u(t) = \hat{x} \cdot \sin(\Omega t) \rightarrow y(t) = \hat{x} \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t)$

