

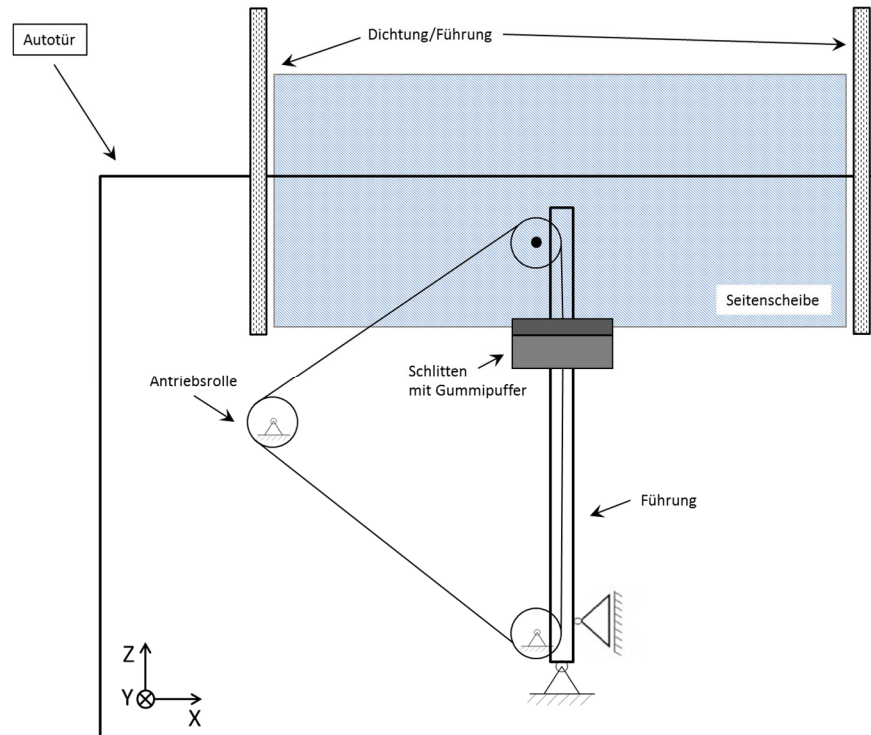
# **1. Mechanik eines elektrischen Fensterhebers in einem Mittelklassepersonenkraftwagen**

## **1.1 Ableitung eines Ersatzmodells**

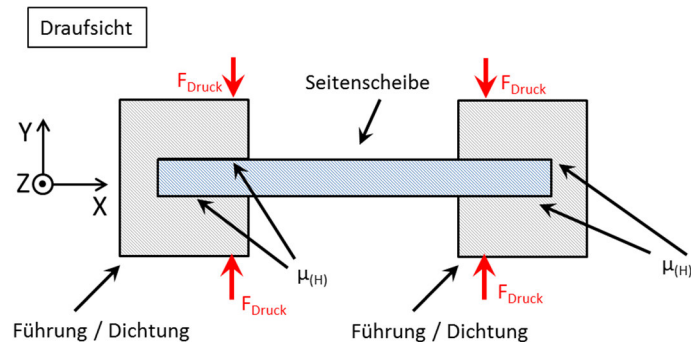
Durch die Berücksichtigung der wesentlichen Komponenten eines realen Systems, sowie Vereinfachungen und Systemabgrenzungen, besteht die Möglichkeit ein mathematisch beschreibbares Ersatzmodell zu entwickeln. Mittels solcher Modelle lässt sich das Systemverhalten analysieren.

Im vorliegenden Fall handelt es sich um den mechanischen Aufbau eines elektrischen Fensterhebers der Golf-Klasse. In Abbildung 1.1 sind die wesentlichen Komponenten des mechanischen Systems anhand einer Prinzip Skizze aufgeführt.

Die Bauteile die auf das Systemverhalten Einfluss nehmen sind im ersten Schritt zu identifizieren und die Verbindung zu angrenzenden Teilen ist zu beschreiben.

**Bild. 1.1. Mechanischer Aufbau eines Fensterhebers**

Im vorliegenden Fall wird die Seitenscheibe eines PKWs mittels eines Schlittens verfahren. Die Seitenscheibe ist mit dem Schlitten über ein Feder-Dämpfer-Element verbunden. Der Schlitten läuft reibungsfrei auf einer senkrecht angeordneten Gleitschiene. Zwischen Seitenscheibe und Schlitten ist ein Gummipuffer angeordnet, dieser ist als Feder-Dämpfer-Element zu betrachten und soll eventuelle Stöße, z.B. beim Anfahren einer Endlage absorbieren. Am Ende der Gleitschiene sind Umlenkrollen montiert die von einem Bowdenzug umschlungen werden. Der Bowdenzug überträgt die rotatorische Bewegung eines Antriebsmotors in die translatorische Bewegung des Schlittens. Die Rollen sind reibungsfrei gelagert und haben die Massenträgheit  $J = 0$ .



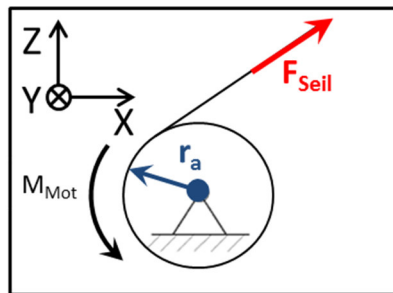
**Bild. 1.2. Mechanischer Aufbau einer Seitenscheibenführung**

Links- und rechtsseitig der Seitenscheibe, auf Vorder- und Rückseite sind Dichtungen bzw. Gleitschienen angeordnet. Diese Elemente, mit einer filzartigen Oberfläche, stehen im direkten Kontakt mit der Seitenscheibe und üben eine Druckkraft auf diese aus. Zwischen der Seitenscheibe und der Führungs- bzw. Dichtungsschiene herrscht Reibung. Übt der Antriebsmotor keine Seilkräfte auf den am Schlitten fixierten Bowdenzug aus und es existiert keine äußere Anregung, so ist die Seitenscheibe in Ruhe. D.h. das Produkt aus Haftreibungskoeffizient und Anpresskraft ist größer als das Produkt aus Erdbeschleunigung und Summe der Massen von Seitenscheibe in Verbindung mit dem Schlitten. Zum Beschleunigen der Seitenscheibe aus der Ruhelage muss also zunächst der Haftreibungskoeffizient überwunden werden, anschließend kann die Scheibe unter Berücksichtigung des Gleitreibungskoeffizienten verfahren werden.

## 1.2. Bestimmung aller wirkenden Kräfte am Ersatzmodell

Der mechanische Aufbau des Fensterhebers verfügt über mehrere Teilkomponenten. Um die Eigenschaften der Bauteile zu identifizieren wird ein sogenannter Freischnitt erstellt. Das System wird dabei in mehrere Teilsysteme aufgespalten. Die Systemgrenzen werden so gelegt, dass alle physikalischen Größen die man zum analysieren des Systemverhaltens benötigt sichtbar werden.

Das hier vorliegende System wird zunächst in 3 Teilsysteme aufgeteilt. Das erste Teilsystem zeigt die Antriebsrolle mit allen relevanten Größen.



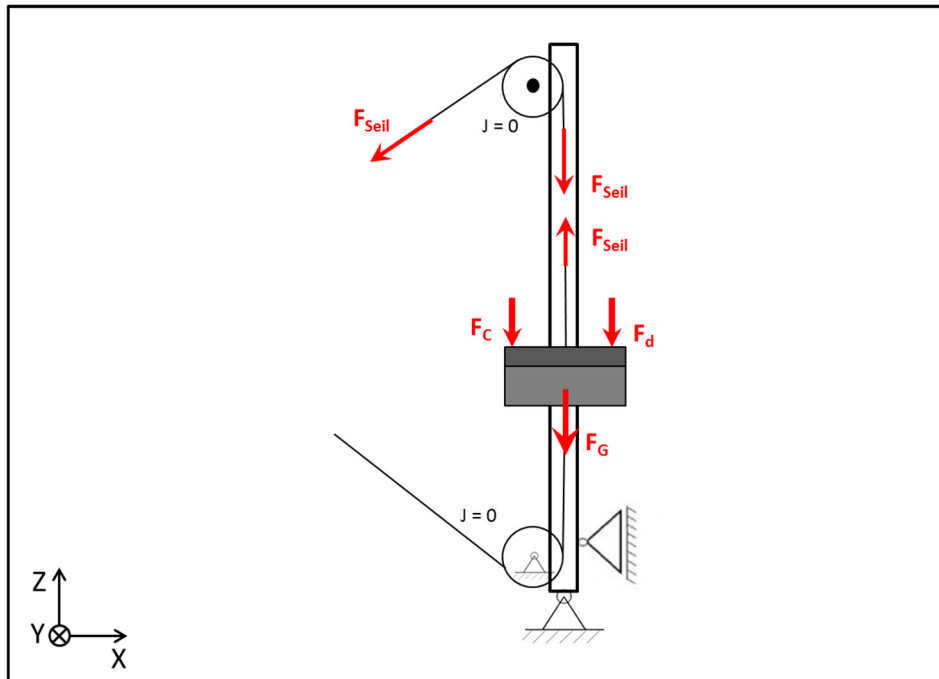
**Bild. 1.3. Mechanisches Teilsystem der Antriebsrolle**

In Bild. 1.3. ist das physikalische Wirkprinzip der Antriebsrolle sehr gut zu erkennen. Das Antriebsmoment  $M_{Mot}$  wirkt am Außendurchmesser der Seilrolle. Unter der Annahme optimaler Seilreibungseigenschaften liegt der Bowdenzug am Außendurchmesser der Seilrolle auf und die Rotationsbewegung wird in ein translatorische Kraft  $F_{Seil}$  gelenkt.

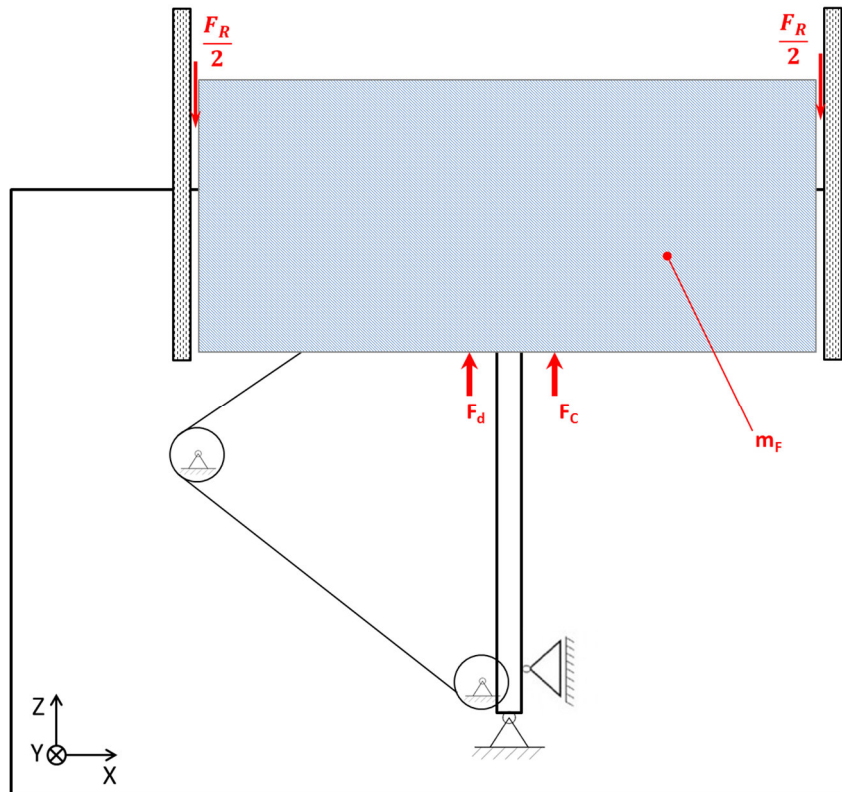
$$M_{Mot} = F_{Seil} \cdot r_a$$

Das zweite Teilsystem beschäftigt sich mit dem Schlitten und dem integrierten Puffer. Die Schnittstelle zum ersten Teilsystem bilden die Feder- und Dämpferkraft. Des Weiteren muss die Masse des Schlittens betrachtet werden und geht als Gewichtskraft  $F_G$  in das System ein.

Im Ruhezustand, zur Bestimmung der statischen Last und des Motors und Losbrechmoments sind die Feder- und Dämpferkräfte zu vernachlässigen.

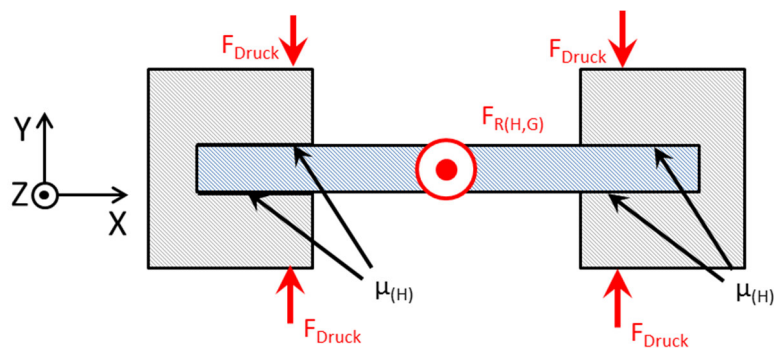
**Bild. 1.4. Mechanisches Teilsystem der Führungsschiene**

In Bild. 1.5. ist das dritte Teilsystem zu sehen, es zeigt die Seitenscheibe des PKWs. Die Gesamtkraft die über die Feder- und Dämpferkraft auf das zweite Teilsystem übertragen wird ist in diesem System zu ermitteln. Dabei muss zunächst die Gewichtskraft der Scheibe betrachtet werden. Des Weiteren sind die Reibungsverhältnisse an der Seitenscheibenführung zu berücksichtigen. Ebenfalls ist zu ermitteln mit welcher Anpresskraft die Seitenscheibenführungsschiene an die Scheibe gedrückt werden muss, um im eingeschwungenen Zustand eine Selbsthemmung der Seitenscheibe zu erreichen. Dabei ist auf einen vorgegebenen Haftreibungskoeffizienten  $\mu_H$  zurück zu greifen.



**Bild. 1.5. Mechanisches Teilsystem der Seitenscheibe**

Zunächst muss eine Fallunterscheidung zwischen Losbrechen der Scheibe und Fahren der Scheibe getroffen werden.



**Bild. 1.6. Mechanisches Teilsystem der Seitenscheibe**

Bild. 1.6. zeigt das Ersatzmodell zur Bestimmung der Reibung an der Seitenscheibe. Da die Scheibe von beiden Seiten mit einer Dichtfläche beaufschlagt ist muss das Coloumb'sche Gesetz entsprechend erweitert werden.

Die Gleichung berücksichtigt eine beidseitige Druckkraft in Verbindung mit einem Reibungskoeffizienten.

$$\mu = \frac{F_R}{4 \cdot F_{Druck}}$$

Mit den bisher beschriebenen Zusammenhängen lassen sich die wirkenden Kräfte Berechnen. Die folgenden Werte sollen für die Berechnung der Seilkraft berücksichtigt werden:

- Masse der Seitenscheibe  $m_F = 2,3 \text{ kg}$
- Masse des Schlittens  $m_S = 0,9 \text{ kg}$
- Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Haftreibungskoeffizient  $\mu_H = 0,4;$
- Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G = 0,35;$
- Dämpfung  $k = 50 \text{ Ns/m}$
- Federsteifigkeit  $c = 10000 \text{ N/m}$

Die Seilkraft  $F_{Seil}$  setzt sich aus der Gewichtskraft der Scheibe  $F_{G(Scheibe)}$ , der Gewichtskraft des Schlittens  $F_{G(Schlitten)}$  und den Reibungswiderstand  $F_R$  in der Führung der Seitenscheibe zusammen. Selbsthemmung herrscht dann vor, wenn die Seitenscheibe ohne Haltekraft in Ruhe bleibt. Dazu muss die Gewichtskraft der Seitenscheibe zzgl. der Gewichtskraft des Schlittens kleiner oder gleich groß der Reibkräfte in den Führungen sein:

$$F_{R(Haft)} \geq F_{G(Scheibe)} + F_{G(Schlitten)}$$

$$F_{R(Haft)} \geq (0,9 \text{ kg} + 2,3 \text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 31,392 \text{ N}$$

Mittels der berechneten Kraft lässt sich die Druckkraft bestimmen, die in den Führungen vorherrschen muss, damit die Seitenscheibe ohne Fremdeinwirkung im Beharrungszustand verbleibt. Dazu wird der Haftreibungskoeffizient  $\mu_H$  eingesetzt.

$$\frac{F_{R(Haft)}}{4 \cdot \mu_H} = F_{\text{Druck}}$$

$$F_{\text{Druck}} = \frac{31,392 \text{ N}}{4 \cdot 0,4} = 19,62 \text{ N}$$

Fallunterscheidung zur Bestimmung der Reibungskräfte in der Führung der Seitenscheibe:

- Fall 1: Scheibe ist in Ruheposition, der Haftreibungskoeffizient muss überwunden werden:

$$F_{R(Haft)} = 4 \cdot F_{\text{Druck}} \cdot \mu_H = 4 \cdot 19,62 \text{ N} \cdot 0,4 = 31,392 \text{ N}$$

- Fall 2: Der Haftreibungskoeffizient ist überwunden, es herrscht Gleitreibung  $\mu_G$

$$F_{R(Gleit)} = 4 \cdot F_{\text{Druck}} \cdot \mu_G = 4 \cdot 19,62 \text{ N} \cdot 0,35 = 27,468 \text{ N}$$

Die Seilkräfte zu den jeweiligen Zuständen können bestimmt werden durch die Bildung der Summe aus Gewichtskraft der Scheibe, des Schlittens sowie der Reibkraft beim Losbrechen der Scheibe.

Um die Seitenscheibe aus der Ruheposition zu Verfahren wird folgende Seilkraft  $F_{\text{Seil(Haft)}}$  benötigt:



$$F_{Seil(Haft)} = F_{G(Scheibe)} + F_{G(Schlitten)} + F_{R(Haft)}$$

$$F_{Seil(Haft)} = 22,563 \text{ N} + 8,829 \text{ N} + 31,3908 \text{ N} = 62,7828 \text{ N}$$

Zum Verfahren der Seitenscheibe, nachdem die Scheibe in Bewegung ist, muss aufgrund des verringerten Reibungskoeffizienten nur noch folgende Seilkraft aufgebracht werden:

$$F_{Seil(Gleit)} = F_{G(Scheibe)} + F_{G(Schlitten)} + F_{R(Gleit)}$$

$$F_{Seil(Gleit)} = 22,563 \text{ N} + 8,829 \text{ N} + 27,468 \text{ N} = 58,86 \text{ N}$$

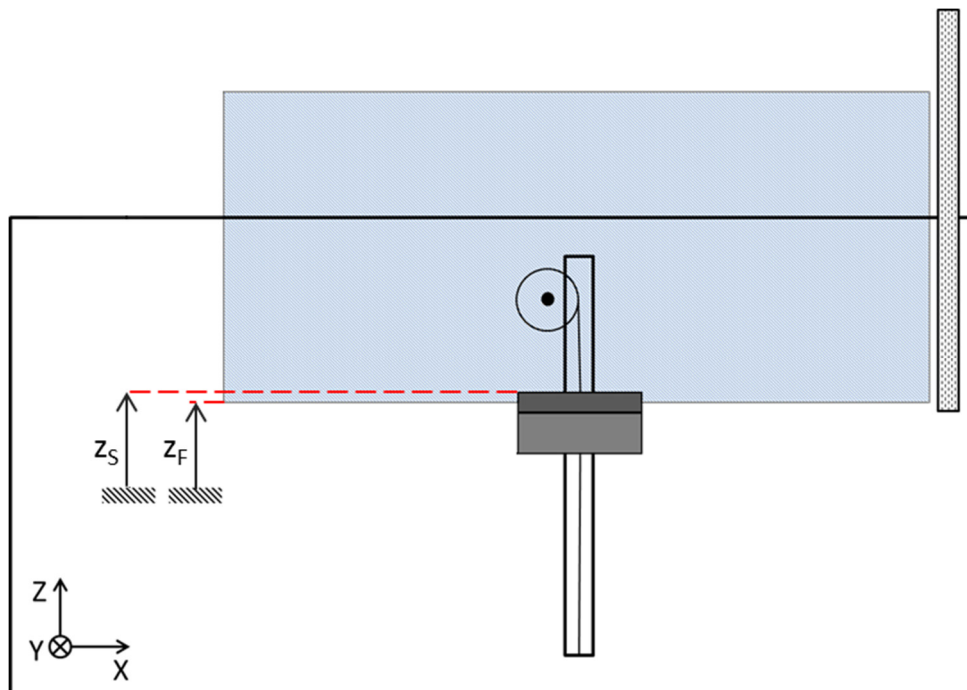
### 1.3. Kinematische Bedingungen

Im folgenden Kapitel wird auf die kinematischen Zusammenhänge des zu analysierenden Systems eingegangen. Zunächst werden die Rahmenbedingungen zur Beschreibung des Feder-Dämpfersystems erläutert, anschließend werden die Drehzahl- und Geschwindigkeitsverhältnisse aus den vorgegebenen Parametern berechnet. Aus den kinematischen Bedingungen und den Kräften, die im vorangegangenen Abschnitt bestimmt wurden, werden die geforderte Drehzahl und das Drehmoment des Gleichstrommotors berechnet. Im letzten Abschnitt werden Drehwinkel und Endlagen der Seitenscheibe berechnet.

#### 1.3.1 Lineare Bewegungen

Zwischen Seitenscheibe und Schlitten befindet sich ein Feder- und Dämpferelement. Das Element soll Stöße absorbieren und die Endlagen dämpfen. Diese beiden Elemente ermöglichen eine relative Bewegung zwischen der Seitenscheibe und dem Schlitten. Diese Bewegung muss mittels der kinematischen Randbedingungen erfasst werden.

Bild 1.7 zeigt die Koordinatenursprungspunkte der Teilsysteme und deren Verfahrungsrichtung. Die Koordinate der Seitenscheibe wird mit  $z_F$  bezeichnet, die Koordinate des Schlittens mit  $z_S$ . Zwischen den Koordinaten wird eine Relativkoordinate  $z_r$  eingeführt die das Verhalten der Feder- und Dämpferelemente erfasst. Um den Weg bzw. die Geschwindigkeit von Feder bzw. Dämpfer zu beschreiben wird immer die Relativkoordinate betrachtet. Wird der Schlitten bei einem feststehenden Fenster nach oben ausgelenkt, vergrößert sich  $z_S$  wobei sich die Relativkoordinate  $z_r$  in Folge dessen ebenfalls erhöht.



**Bild. 1.7. Kinematische Bedingungen der Seitenscheibe**

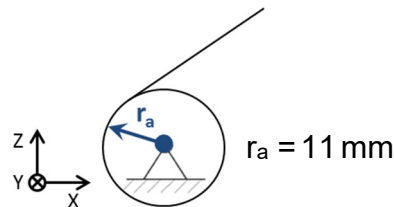
Wird der Schlitten nach unten ausgelenkt, verringert sich  $z_S$ , was wiederum zu einer Verkleinerung der Relativkoordinate führt.

$$z_r = z_S - z_F$$

### 1.3.2. Drehzahlverhältnisse an der Gleichstrommaschine

Um die Drehzahl der Gleichstrommaschine berechnen zu können, müssen der Verfahr Weg sowie die Zeiten zum Auf- und Abfahren der Seitenscheibe bekannt sein.

Die Seitenscheibe legt vom unteren bis zum oberen Anschlag  $s = 375\text{ mm}$  zurück und benötigt dafür  $t = 9 \pm 1$  Sekunden.



**Bild. 1.8. Riemenscheibe der Antriebsmaschine**

Die Riemenscheibe auf der Gleichstrommaschine hat einen Durchmesser von 22 mm. Daraus ergibt sich für die Riemenscheibe folgender Umfang:

$$U_{\text{Rolle}} = 2 \cdot \pi \cdot r_a$$

$$U_{\text{Rolle}} = 2 \cdot \pi \cdot 11\text{ mm} = 69,115 \text{ mm}$$

Für den Weg von  $s = 45\text{ cm} = 450\text{ mm}$  benötigt der Motor bei einem Umfang der Seilrolle  $U = 69,115\text{ mm}$  folgende Anzahl an Umdrehungen:

$$n = \frac{s}{U_{\text{Rolle}}} = \frac{375 \text{ mm}}{69,115 \text{ mm}} = 5,425$$

Die berechnete Anzahl der Umdrehungen muss der Motor in 9 Sekunden zurücklegen. Drehzahlangaben werden üblicherweise auf Minuten bezogen, somit ist das Ergebnis auf Umdrehungen pro Minute U/min umzurechnen:

$$n_{\text{Antrieb}} = \frac{5,425}{9 \text{ s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 36,167 \frac{1}{\text{min}}$$

Um die Funktion des elektrischen Fensterhebers nach den Vorgaben umzusetzen wird eine Gleichstrommaschine benötigt mit 36,167 Umdrehungen pro Minute.

### 1.3.3. Berechnung des benötigten Antriebsmoments

Wie bereits unter Punkt 1.2 behandelt müsste bei der Berechnung des Antriebsmomentes wieder eine Fallunterscheidung getroffen werden. Wir wissen aus Punkt 1.2. jedoch, dass die Seilkraft zum Verfahren der Seitenscheibe aus dem Stillstand größer ist als die Seilkraft zum verfahren der Scheibe aus einer Bewegung heraus. Zur Auslegung der Gleichstrommaschine muss daher das maximale Drehmoment berechnet werden. Das Drehmoment ist das Produkt aus maximaler Seilkraft und dem Radius der Riemenscheibe skaliert auf die Einheit Nm:

$$M_{\text{Mot}} = F_{\text{Seil(Haft)}} \cdot r_a = 62,7828 \text{ N} \cdot 11 \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} = 0,690 \text{ Nm}$$

Das geforderte Motormoment beträgt somit 0,690 Nm.

## 1.4. Mechanische Bewegungsgleichung

Im folgenden Abschnitt wird unter Verwendung der Ergebnisse aus den letzten Abschnitten die Bewegungsgleichung für das Gesamtsystem aufgestellt.

Wie bereits unter Abschnitt 1.2. erläutert enthält der Schlitten alle relevanten Parameter, die zur Analyse des Bewegungsverhaltens notwendig sind.

Die Dämpferkraft  $F_D$  und die Federkraft  $F_C$  fließen mittels der unter Kapitel 1.3.1. gewonnen kinematischen Zusammenhänge in die Bewegungsgleichung ein:

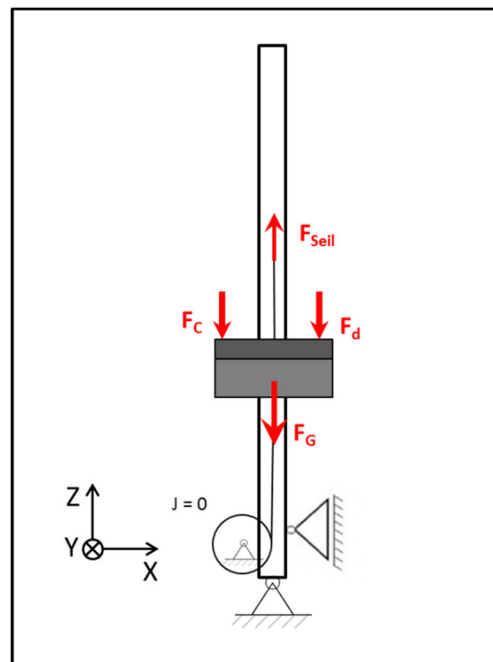
$$z_r = z_S - z_F$$

Die Federkraft berechnet sich zu:

$$F_C = c \cdot z_r = c \cdot (z_S - z_F)$$

Analog dazu berechnet sich die Dämpferkraft:

$$F_d = k \cdot \dot{z}_r = k \cdot (\dot{z}_S - \dot{z}_F)$$



**Bild 1.9. Freikörperbild der Fensterheber Mechanik**

Die Schnittstelle zwischen Schlitten und Seitenscheibe wird durch die Feder und Dämpfer gebildet. Die Bewegungsgleichung für den Schlitten liest sich wie folgt:

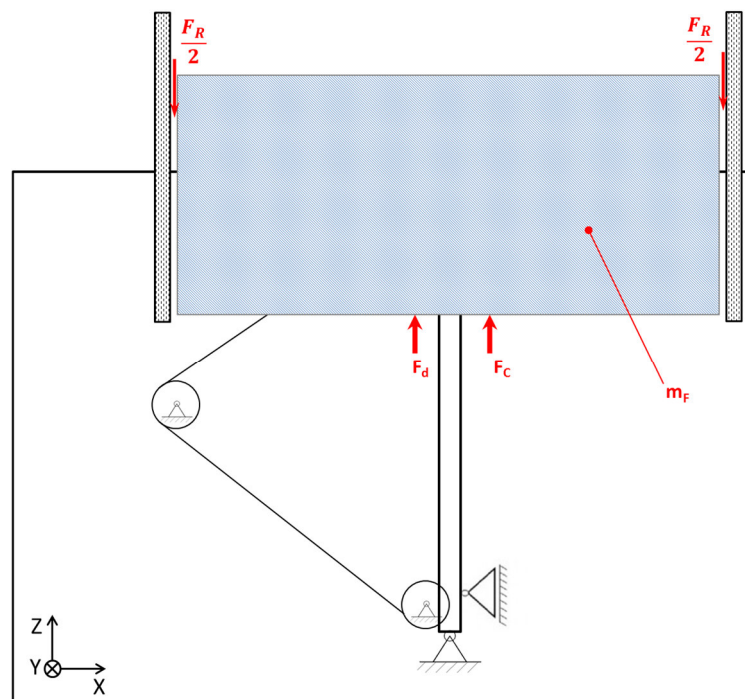
$$m_S \cdot \ddot{z}_S = F_{Seil} - F_D - F_C - F_G$$

Durch einsetzen der bisher entwickelten Zusammenhänge erhalten wir folgende Differentialgleichung 2. Ordnung:

$$\ddot{z}_S = \frac{1}{m_S} (-k \cdot (\dot{z}_S - \dot{z}_F) - c \cdot (z_S - z_F) + F_S) - g$$

An der Seitenscheibe werden ebenfalls alle angreifenden Kräfte eingetragen und die daraus resultierende Bewegungsgleichung abgeleitet.

$$m_F \cdot \ddot{z}_F = -2 \cdot \frac{F_R}{z} - F_G + F_C + F_D$$



**Bild 1.10. Freikörperbild des Seitenfensters**

Analog zu der DGL des Schlittens erhalten wir durch einsetzen der bisher entwickelten Zusammenhänge folgende Differentialgleichung 2. Ordnung für das Seitenfenster:

$$\ddot{z}_F = \frac{1}{m_F} (k \cdot (\dot{z}_S - \dot{z}_F) + c \cdot (z_S - z_F) - F_R) - g$$

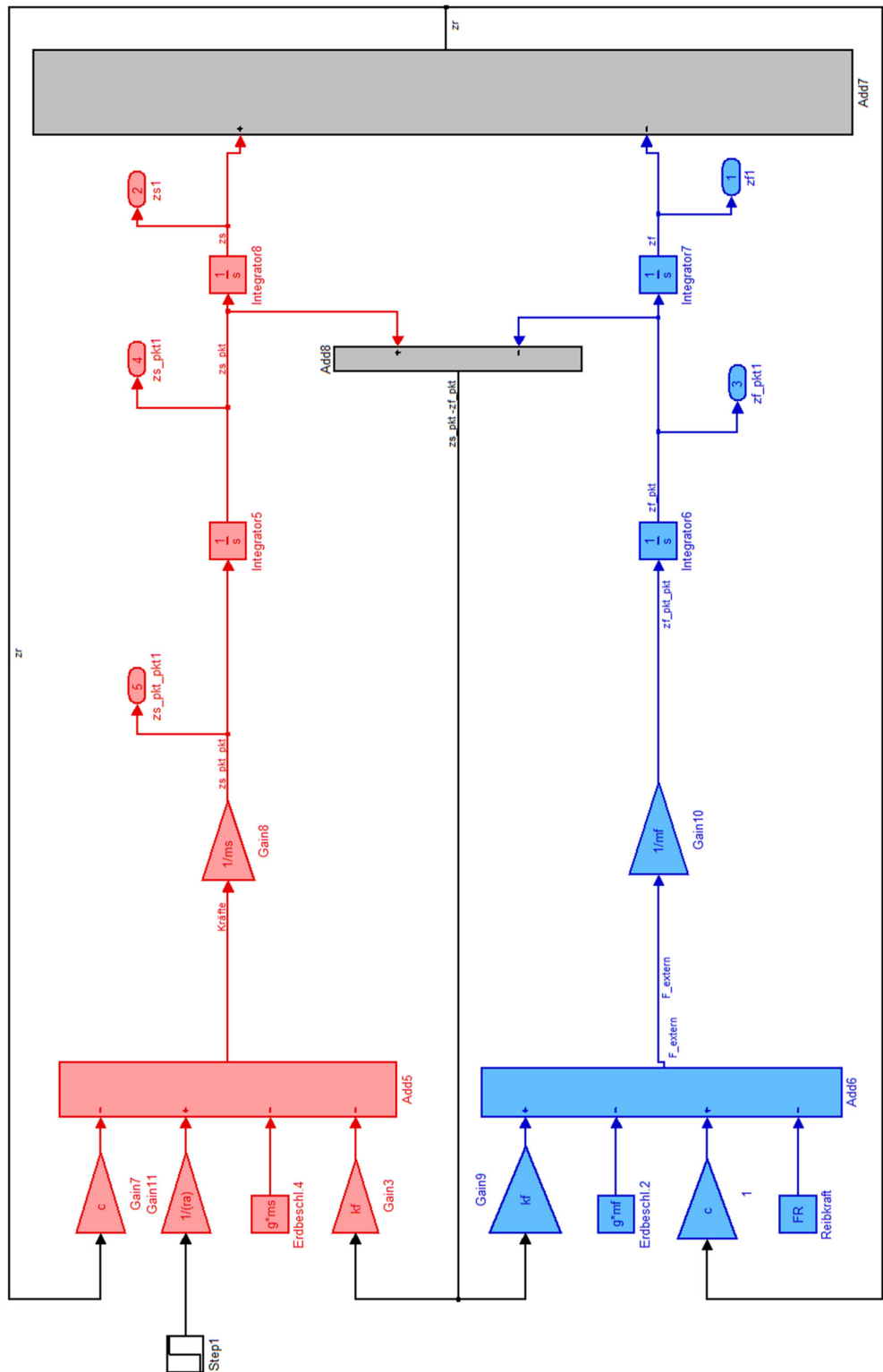
Die beiden Differentialgleichungen 2. Ordnung können jeweils als Blockschaltbild dargestellt, und anschließend mittels der Feder- und Dämpferkraft gekoppelt werden.

## 1.5. Simulink-Modell des mechanischen Modells

Hinweis für die Programmierung in Matlab-Simulink:

- Legen Sie sich ein Matlab-Skript an, in dem Sie allen Parametern und Variablen die Werte zuweisen. Man kann zwar die Parameter in jeder Simulink-Funktion eingeben, allerdings erschwert das zum einen eine Fehlersuche und zum anderen ist die Adaption des Modells aufwendiger
- Nutzen Sie für alle Rechenoperation immer die gleiche Einheitenskalierung, also z.B. immer „m“ anstatt „mm“, oder immer „Ohm“ anstatt „Milli-Ohm“ usw. Stetig wechselnde Einheitenskalierung innerhalb eines Modells ist immer eine potentielle Fehlerquelle.
- Ergänzen Sie hinter jeder Variablen im Matlab-Skript eine Textbemerkung mit der Funktion der definierten Variablen. Somit finden Sie schnell die gewünschte Größe wieder.

Die in Kap. 1.4 hergeleiteten Differentialgleichungen werden in das Programm Simulink überführt.





**Bild 1.11. Beispiel des mechanischen Simulationsmodells in Matlab Simulink**

## **1.6 Aufbau des Reibungsmodells in Simulink**

Die Modelle für Haft- und Gleitreibung werden zunächst in zwei unterschiedlichen Subsystemen modelliert.

### **1.6.1 Gleitreibung**

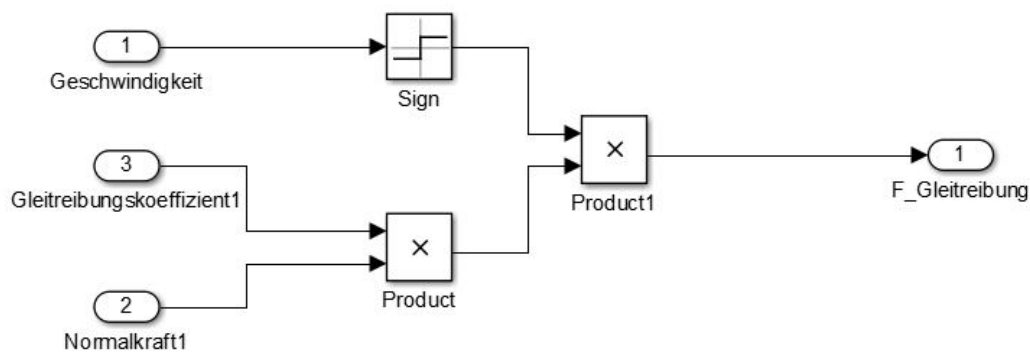
Die Gleitreibungskraft  $F_{RG}$  wirkt der Bewegungsrichtung immer entgegen und ist abhängig vom Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  und die auf die Reibfläche wirkende Kraft  $F_N$ .

$$F_{R(Gleit)} = \begin{cases} \mu_G \cdot F_N & \text{für } \dot{z}_F > 0 \\ -\mu_G \cdot F_N & \text{für } \dot{z}_F < 0 \end{cases}$$

Die obige Formel kann auch ausgedrückt werden als:

$$F_{R(Gleit)} = \mu_G \cdot F_N \cdot \text{sign}(\dot{z}_F)$$

Diese Formel kann in Simulink als Subsystem aufgebaut werden.



**Bild 1.12 Modell der Gleitreibung**

## 1.6.2 Haftreibung

Anders als bei der Gleitreibung ist die Richtung der Haftreibungskraft  $F_{RH}$  abhängig von der Richtung der auf den Körper wirkenden äußeren Kräfte. Dabei kann die Haftreibungskraft niemals größer werden als die Summe der äußeren Kräfte  $F_{ext}$ .

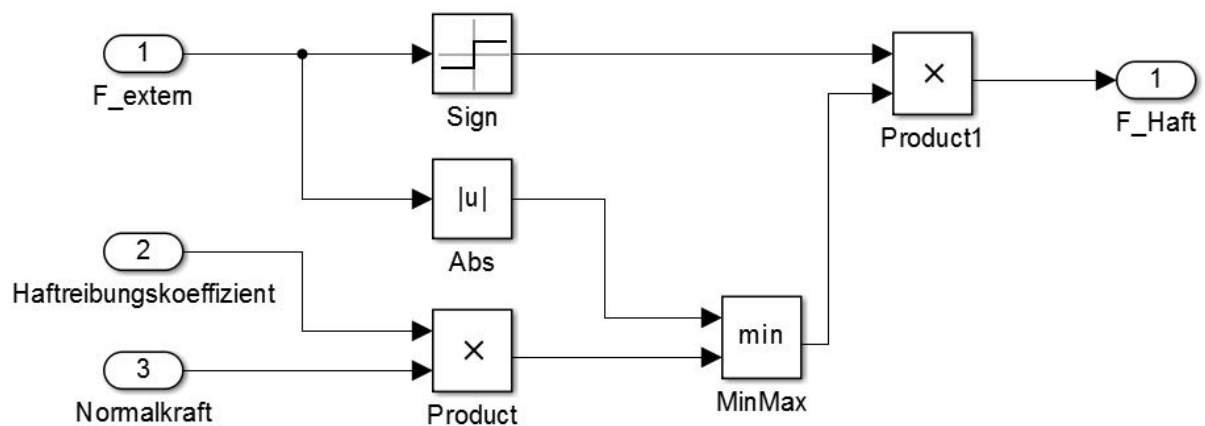
$$F_{ext} = -F_G + F_C + F_D$$

Wäre dies nicht der Fall, würde sich der Körper selbständig in Bewegung setzen. Das Haftreibungsverhalten kann mit den folgenden Formeln beschrieben und in ein Simulink Modell überführt werden:

$$F_{R(Haft)} = \begin{cases} -\mu_H \cdot F_N & \text{für } F_{ext} < -\mu_H \cdot F_N \\ \mu_H \cdot F_N & \text{für } F_{ext} > \mu_H \cdot F_N \\ F_{ext} & \text{für } -\mu_H \cdot F_N < F_{ext} < \mu_H \cdot F_N \end{cases}$$

oder

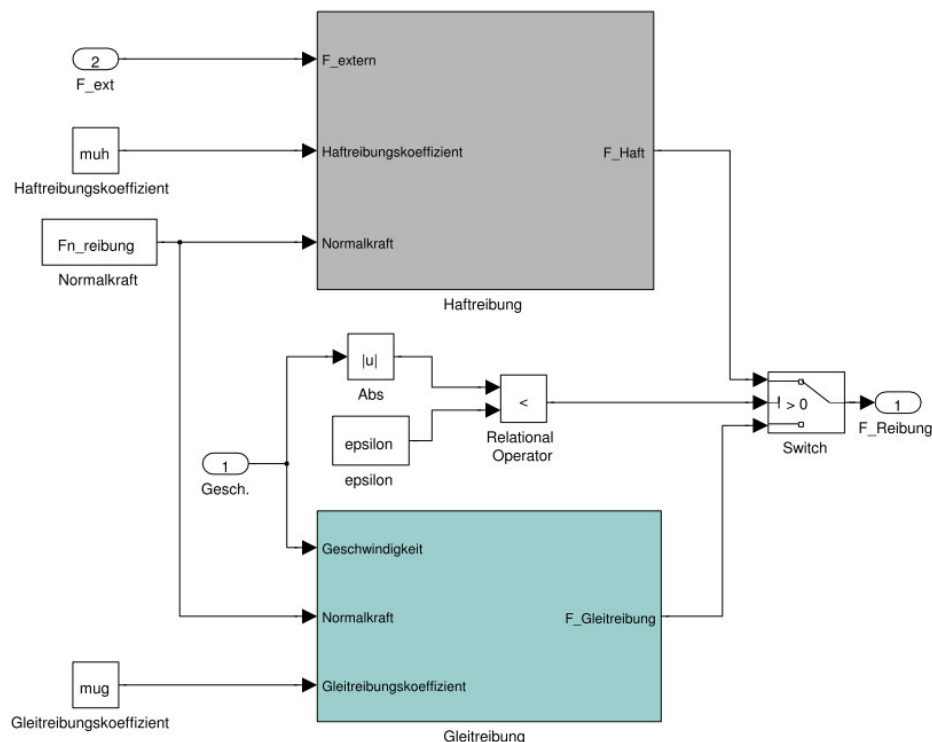
$$F_{R(Haft)} = \text{sign}(F_{ext}) \cdot \min(\mu_H \cdot F_N, |F_{ext}|)$$



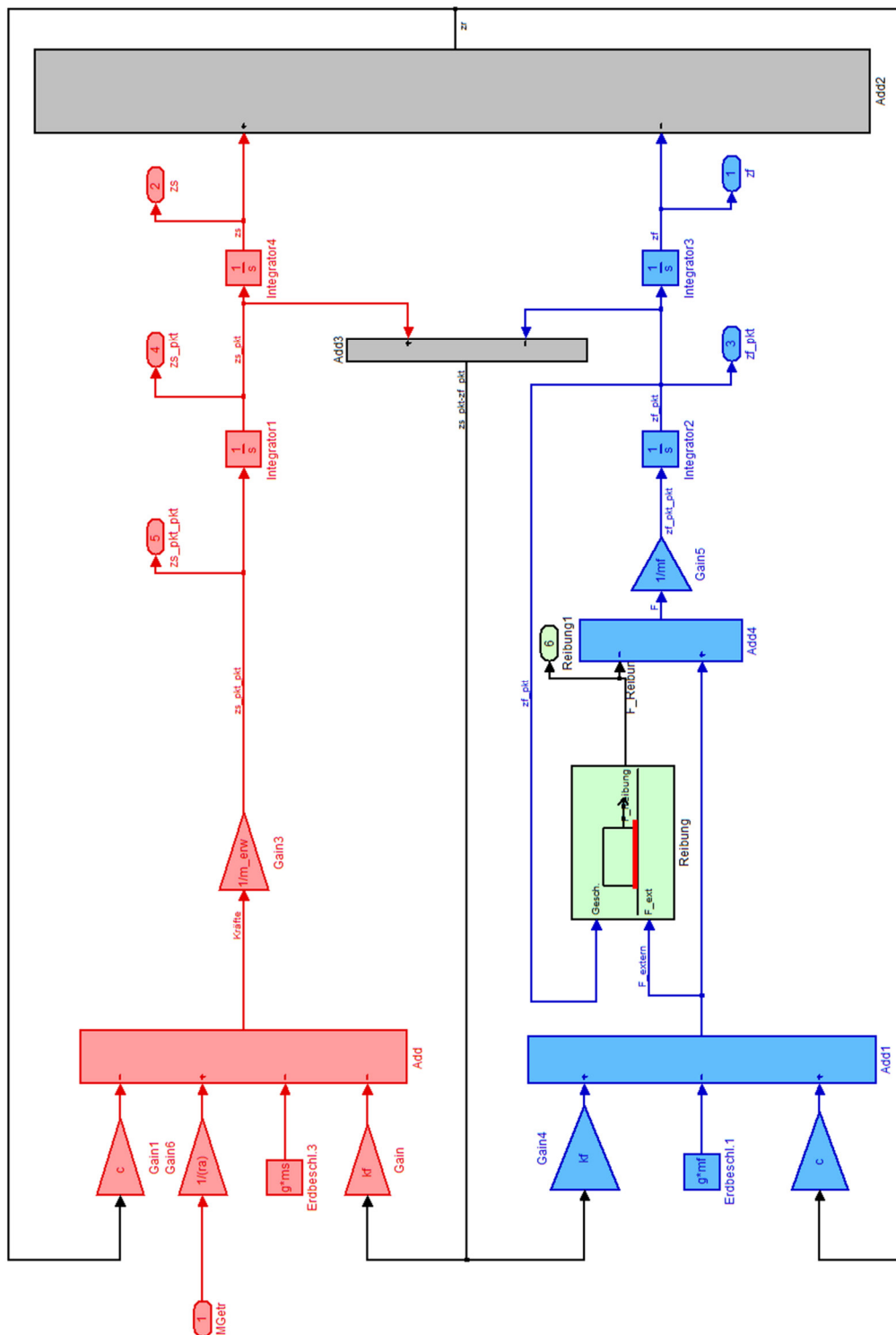
**Bild 1.13 Modell der Haftreibung**

### 1.6.3 Gesamtmodell der Reibung

Die beiden Subsysteme müssen zu einem Modell verknüpft werden. Entscheidend dabei ist das Umschalten zwischen Haft- und Gleitreibung. Theoretisch wirkt die Haftreibung nur bei Stillstand  $\dot{z}_F = 0$ , in der Simulation kann aufgrund einer endlichen Schrittweite der Zeitpunkt an dem die Geschwindigkeit zu null wird nicht immer ermittelt werden, was zu Fehlern in der Simulation führt. Es wird deshalb eine obere Schranke  $\varepsilon$  festgelegt. Für  $|\dot{z}_F| < \varepsilon$  wird die Geschwindigkeit gleich null angenommen. Der Wert von  $\varepsilon$  kann innerhalb der Simulation ermittelt werden. Sollte allerdings für ein realistisches Verhalten  $< 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  betragen.



**Bild 1.14 Gesamtmodell der Reibung**



**Bild. 1.15 Mechanisches Modell mit Reibung**