Das kinematische Modell von move-e-star

Die Bewegung vom move-e-star basiert auf der Ausrichtung der Richtung und Geschwindigkeit von 4 Fahrwerk, jedes Fahrwerk kann als einem drehenden Rad angesehen werden. Der Aufbau der Kinematik vom move-e-star fängt von einzelnem Fahrwerk an. Ein lenkendes Rad an festem Punkt, wird in unterer Darstellung parametriert:

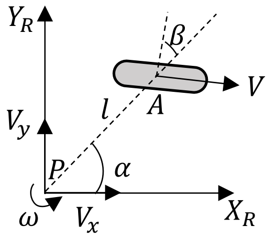

Abbildung 1: Das Rad an festem Punkt und seine Parametrierung

Ein Drehbares Rad mit Geschwindigkeit V befindet sich an festem Punkt A. Ein vorgewählter Punkt P ist l Meter entfern zum Punkt A. Das Rad dreht um seinen festen Punkt A und erzeugt den Winkel β zwischen eigener Achse und den Abstand zum Punkt P. Die Geschwindigkeit am Punkt P lautet $[V_x \quad V_y \quad \omega]^T$ .Davon wird der Zwang vom Rad abstrahiert:

In Länge-Richtung vom Rad:

$$[sin(\alpha+\beta) \quad -cos(\alpha+\beta) \quad -lcos\beta]\begin{bmatrix}V_x\\V_y\\\omega\end{bmatrix} = V$$

In Quer-Richtung vom Rad:

$$[\cos(\alpha+\beta) \quad sin(\alpha+\beta) \quad lsin\beta]\begin{bmatrix}V_x\\V_y\\\omega\end{bmatrix} = 0$$

Nun erweitern es zum 4 Rade move-e-star. Der Mittelpunkt von MES wird als dem Referenzpunkt angesehen. Die Bewegung von diesem Punkt ist definiert: $[V_{Mx} \quad V_{My} \quad \omega_M]^T$. Die move-e-star wird durch Verstellung des Lenkpols gesteuert, Hier wird der Lenkpol parametriert als: $[\omega_{LP} \quad R_{LP} \quad \theta_{LP}]^T$. Daraus wird abstrahiert:

$$V_{Mx} = \omega_{LP} R_{LP} \cos\theta_{LP}$$

$$V_{My} = \omega_{LP} R_{LP} \sin\theta_{LP}$$

$$\omega_M = \omega_{LP}$$

Der nächste Schritt ist der Aufbau der Umsetzung von Bewegung am Mittelpunkt zur Ausrichtung von einzelnem Fahrwerk. Das bedeutet, diese Umsetzung erzielt die Bestimmung des Lenkwinkels und Geschwindigkeit von einzelnem Fahrwerk unter der Angabe vom Parameter des Lenkpols.

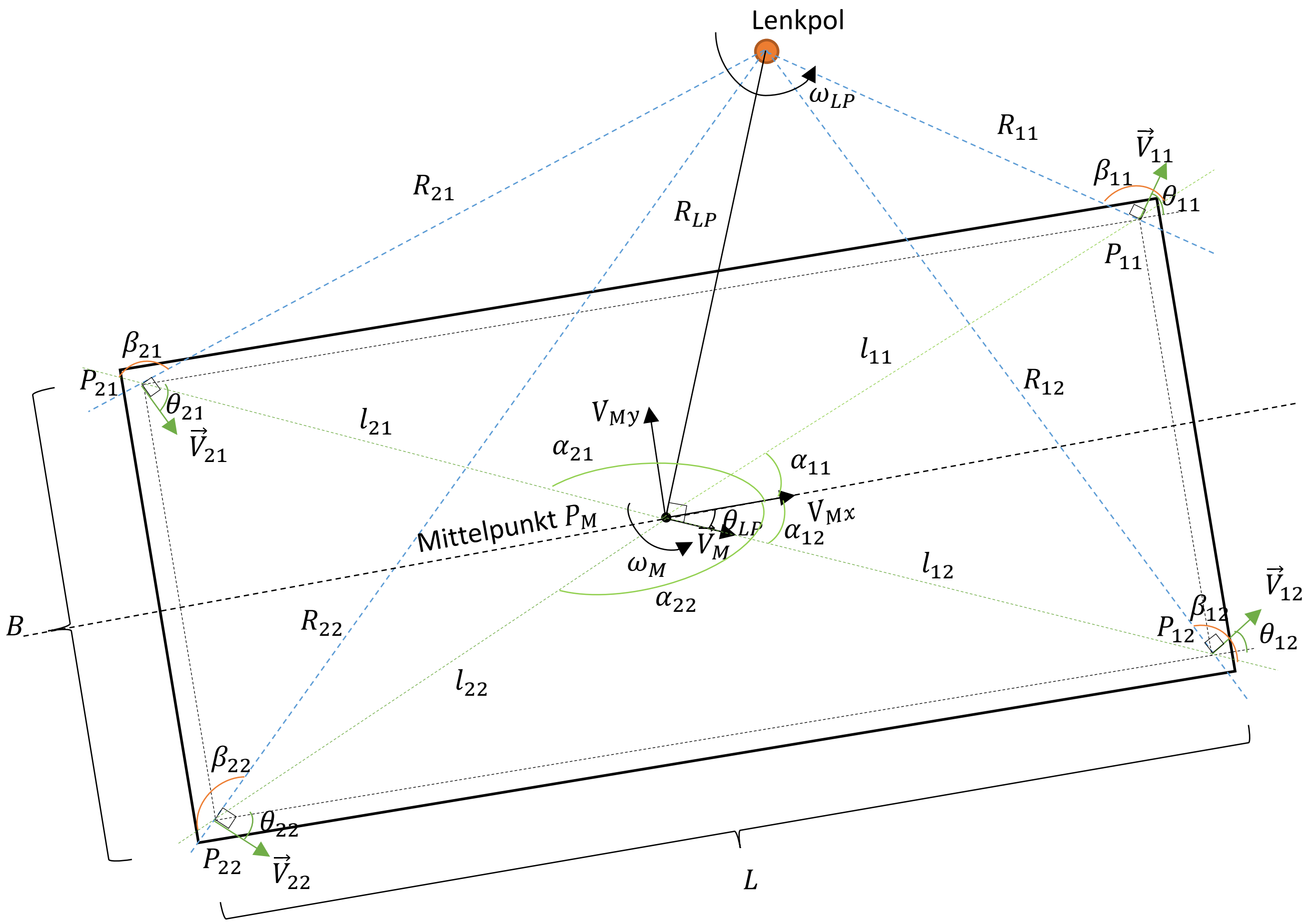

Abbildung 2: Kinematik des move-e-star und seine Parametrierung

Daraus wird zusammengefasst:

Der Fahrwerk am Punkt P_{11}:

$0 < \alpha_{11} < \frac{\pi}{2} \quad sin\alpha_{11} = \frac{B}{2l_{11}} \quad cos\alpha_{11} = \frac{L}{2l_{11}}$

$\beta_{11} = \frac{\pi}{2} + \theta_{11} - \alpha_{11}$

Es existiert die Gleichung:

$$[sin(\alpha_{11} + \beta_{11}) \quad -cos(\alpha_{11} + \beta_{11}) \quad -l_{11}cos\beta_{11}] \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{11}$$

$$[\cos(\alpha_{11} + \beta_{11}) \quad sin(\alpha_{11} + \beta_{11}) \quad l_{11}sin\beta_{11}] \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Weiterleiten:

$\sin(\alpha_{11} + \beta_{11})$

$$= \sin\left(\alpha_{11} + \frac{\pi}{2} + \theta_{11} - \alpha_{11}\right)$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{11}\right)$$

$$= \cos\theta_{11}$$

$$\cos(\alpha_{11} + \beta_{11})$$

$$= \cos\left(\alpha_{11} + \frac{\pi}{2} + \theta_{11} - \alpha_{11}\right)$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{11}\right)$$

$$= -\sin\theta_{11}$$

$$cos\beta_{11}$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{11} - \alpha_{11}\right)$$

$$= -\sin(\theta_{11} - \alpha_{11})$$

$$= -sin\theta_{11}\cos(-\alpha_{11}) - cos\theta_{11}sin(-\alpha_{11})$$

$$= -sin\theta_{11}\cos\alpha_{11} + cos\theta_{11}sin\alpha_{11} = -\frac{L}{2l_{11}}sin\theta_{11} + \frac{B}{2l_{11}}cos\theta_{11}$$

$$sin\beta_{11}$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{11} - \alpha_{11}\right)$$

$$= \cos(\theta_{11} - \alpha_{11})$$

$$= cos\theta_{11}\cos(-\alpha_{11}) - sin\theta_{11}\sin(-\alpha_{11})$$

$$= cos\theta_{11}\cos\alpha_{11} + sin\theta_{11}\sin\alpha_{11} = \frac{L}{2l_{11}}cos\theta_{11} + \frac{B}{2l_{11}}sin\theta_{11}$$

Dann es ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} cos\theta_{11} & sin\theta_{11} & \frac{L}{2}sin\theta_{11} - \frac{B}{2}cos\theta_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{11}$$

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_{11} & \cos\theta_{11} & \frac{L}{2}cos\theta_{11} + \frac{B}{2}sin\theta_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Daraus weiter zu leiten:

$$-V_{Mx}sin\theta_{11} + V_{My}\cos\theta_{11} + \frac{L\omega_M}{2}cos\theta_{11} + \frac{B\omega_M}{2}sin\theta_{11} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{sin\theta_{11}}{cos\theta_{11}} = \frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

$$\Rightarrow \theta_{11} = \tan^{-1}\frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

Der Fahrwerk am Punkt P_{12}:

$-\frac{\pi}{2} < \alpha_{12} < 0 \quad sin\ \alpha_{12} = -\frac{B}{2l_{12}} \quad cos\ \alpha_{12} = \frac{L}{2l_{12}}$

$$\beta_{12} = \frac{\pi}{2} + \theta_{12} - \alpha_{12}$$

Es existiert die Gleichung:

$$[sin(\alpha_{12} + \beta_{12}) \quad -cos(\alpha_{12} + \beta_{12}) \quad -l_{12}cos\beta_{12}]\begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{12}$$

$$[\cos(\alpha_{12} + \beta_{12}) \quad sin(\alpha_{12} + \beta_{12}) \quad l_{12}sin\beta_{12}]\begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Weiterleiten:

$$\sin(\alpha_{12} + \beta_{12})$$

$$= \sin\left(\alpha_{12} + \frac{\pi}{2} + \theta_{12} - \alpha_{12}\right)$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{12}\right)$$

$$= \cos\theta_{12}$$

$$\cos(\alpha_{12} + \beta_{12})$$

$$= \cos\left(\alpha_{12} + \frac{\pi}{2} + \theta_{12} - \alpha_{12}\right)$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{12}\right)$$

$$= -\sin\theta_{12}$$

$$cos\beta_{12}$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{12} - \alpha_{12}\right)$$

$$= -\sin(\theta_{12} - \alpha_{12})$$

$$= -sin\theta_{12}\cos(-\alpha_{12}) - cos\theta_{12}sin(-\alpha_{12})$$

$$= -sin\theta_{12}\cos\alpha_{12} + cos\theta_{12}sin\alpha_{12} = -\frac{L}{2l_{12}}sin\theta_{12} - \frac{B}{2l_{12}}cos\theta_{12}$$

$sin\beta_{12}$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{12} - \alpha_{12}\right)$$

$$= \cos(\theta_{12} - \alpha_{12})$$

$$= cos\theta_{12}\cos(-\alpha_{12}) - sin\theta_{12}\sin(-\alpha_{12})$$

$$= cos\theta_{12}\cos\alpha_{12} + sin\theta_{12}\sin\alpha_{12} = \frac{L}{2l_{12}}cos\theta_{12} - \frac{B}{2l_{12}}sin\theta_{12}$$

Dann es ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} cos\theta_{12} & sin\theta_{12} & \frac{L}{2}sin\theta_{12} + \frac{B}{2}cos\theta_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{12}$$

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & \frac{L}{2}cos\theta_{12} - \frac{B}{2}sin\theta_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Daraus weiter zu leiten:

$$-V_{Mx}sin\theta_{12} + V_{My}\cos\theta_{12} + \frac{L\omega_M}{2}cos\theta_{12} - \frac{B\omega_M}{2}sin\theta_{12} = 0$$

$$\Longrightarrow \frac{sin\theta_{12}}{cos\theta_{12}} = \frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

$$\Rightarrow \theta_{12} = \tan^{-1}\frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

Der Fahrwerk am Punkt P_{21}:

$\frac{\pi}{2} < \alpha_{21} < \pi \quad sin\ \alpha_{21} = \frac{B}{2l_{21}} \quad cos\ \alpha_{21} = -\frac{L}{2l_{21}}$

$$\beta_{21} = \frac{\pi}{2} + \theta_{21} - \alpha_{21}$$

Es existiert die Gleichung:

$$[sin(\alpha_{21} + \beta_{21}) \quad -cos(\alpha_{21} + \beta_{21}) \quad -l_{21}cos\beta_{21}] \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{21}$$

$$[\cos(\alpha_{21} + \beta_{21}) \quad sin(\alpha_{21} + \beta_{21}) \quad l_{21}sin\beta_{21}] \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Weiterleiten:

$$\sin(\alpha_{21} + \beta_{21})$$

$$= \sin\left(\alpha_{21} + \frac{\pi}{2} + \theta_{21} - \alpha_{21}\right)$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{21}\right)$$

$$= \cos\theta_{21}$$

$$\cos(\alpha_{21} + \beta_{21})$$

$$= \cos\left(\alpha_{21} + \frac{\pi}{2} + \theta_{21} - \alpha_{21}\right)$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{21}\right)$$

$$= -\sin\theta_{21}$$

$$cos\beta_{21}$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{21} - \alpha_{21}\right)$$

$$= -\sin(\theta_{21} - \alpha_{21})$$

$$= -sin\theta_{21}\cos(-\alpha_{21}) - cos\theta_{21}sin(-\alpha_{21})$$

$$= -sin\theta_{21}\cos\alpha_{21} + cos\theta_{21}sin\alpha_{21} = -\frac{L}{2l_{21}}sin\theta_{21} + \frac{B}{2l_{21}}cos\theta_{21}$$

$$sin\beta_{21}$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{21} - \alpha_{21}\right)$$

$$= \cos(\theta_{21} - \alpha_{21})$$

$$= cos\theta_{21}\cos(-\alpha_{21}) - sin\theta_{21}\sin(-\alpha_{21})$$

$$= cos\theta_{21}\cos\alpha_{21} + sin\theta_{21}\sin\alpha_{21} = -\frac{L}{2l_{21}}cos\theta_{21} + \frac{B}{2l_{21}}sin\theta_{21}$$

Dann es ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} cos\theta_{21} & sin\theta_{21} & \frac{L}{2}sin\theta_{21} - \frac{B}{2}cos\theta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{21}$$

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_{21} & \cos\theta_{21} & -\frac{L}{2}cos\theta_{21} + \frac{B}{2}sin\theta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Daraus weiter zu leiten:

$$-V_{Mx}sin\theta_{21} + V_{My}\cos\theta_{21} - \frac{L\omega_M}{2}cos\theta_{21} + \frac{B\omega_M}{2}sin\theta_{21} = 0$$

$$\Longrightarrow \frac{sin\theta_{21}}{cos\theta_{21}} = \frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

$$\Rightarrow \theta_{21} = \tan^{-1}\frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

Der Fahrwerk am Punkt P_{22}:

$-\pi < \alpha_{22} < -\frac{\pi}{2}$ $\quad sin\ \alpha_{22} = -\frac{B}{2l_{22}}$ $\quad cos\ \alpha_{22} = -\frac{L}{2l_{22}}$

$$\beta_{22} = \frac{\pi}{2} + \theta_{22} - \alpha_{22}$$

Es existiert die Gleichung:

$$[sin(\alpha_{22} + \beta_{22}) \quad -cos(\alpha_{22} + \beta_{22}) \quad -l_{22}cos\beta_{22}]\begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{22}$$

$$[\cos(\alpha_{22} + \beta_{22}) \quad sin(\alpha_{22} + \beta_{22}) \quad l_{22}sin\beta_{22}]\begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Weiterleiten:

$$\sin(\alpha_{22} + \beta_{22})$$

$$= \sin\left(\alpha_{22} - \frac{\pi}{2} + \theta_{22} - \alpha_{22}\right)$$

$$= \sin\left(-\frac{\pi}{2} + \theta_{22}\right)$$

$$= -\cos\theta_{22}$$

$$\cos(\alpha_{22} + \beta_{22})$$

$$= \cos\left(\alpha_{22} - \frac{\pi}{2} + \theta_{22} - \alpha_{22}\right)$$

$$= \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \theta_{22}\right)$$

$$= \sin\theta_{22}$$

$$cos\beta_{22}$$

$$= \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \theta_{22} - \alpha_{22}\right)$$

$$= \sin(\theta_{22} - \alpha_{22})$$

$$= sin\theta_{22}\cos(-\alpha_{22}) + cos\theta_{22}sin(-\alpha_{22})$$

$$= sin\theta_{22}\cos\alpha_{22} - cos\theta_{22}sin\alpha_{22} = -\frac{L}{2l_{22}}sin\theta_{22} + \frac{B}{2l_{22}}cos\theta_{22}$$

$sin\beta_{22}$

$$= \sin\left(-\frac{\pi}{2} + \theta_{22} - \alpha_{22}\right)$$

$$= -\cos(\theta_{22} - \alpha_{22})$$

$$= -cos\theta_{22}\cos(-\alpha_{22}) + sin\theta_{22}\sin(-\alpha_{22})$$

$$= -cos\theta_{22}\cos\alpha_{22} - sin\theta_{22}\sin\alpha_{22} = \frac{L}{2l_{22}}cos\theta_{22} + \frac{B}{2l_{22}}sin\theta_{22}$$

Dann es ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} -cos\theta_{22} & -sin\theta_{22} & \frac{L}{2}sin\theta_{22} - \frac{B}{2}cos\theta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = V_{22}$$

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_{22} & -\cos\theta_{22} & \frac{L}{2}cos\theta_{22} + \frac{B}{2}sin\theta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{bmatrix} = 0$$

Daraus weiter zu leiten:

$$V_{Mx}sin\theta_{22} - V_{My}\cos\theta_{22} + \frac{L\omega_M}{2}cos\theta_{22} + \frac{B\omega_M}{2}sin\theta_{22} = 0$$

$$\Longrightarrow \frac{sin\theta_{22}}{cos\theta_{22}} = \frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

$$\Rightarrow \theta_{22} = \tan^{-1}\frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

Dann sind die alle Formeln zusammengefasst:

Die Bestimmung des Lenkwinkels vom Fahrwerk:

$$\theta_{11} = \tan^{-1}\frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

$$\theta_{12} = \tan^{-1}\frac{L\omega_M + 2V_{My}}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

$$\theta_{21} = \tan^{-1}\frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} - B\omega_M}$$

$$\theta_{22} = \tan^{-1}\frac{2V_{My} - L\omega_M}{2V_{Mx} + B\omega_M}$$

Die Bestimmung der Geschwindigkeit vom Fahrwerk:

$$\begin{vmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{21} \\ V_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} cos\theta_{11} & sin\theta_{11} & \frac{L}{2}sin\theta_{11} - \frac{B}{2}cos\theta_{11} \\ -cos\theta_{12} & -sin\theta_{12} & -\frac{L}{2}sin\theta_{12} - \frac{B}{2}cos\theta_{12} \\ \cos\theta_{21} & sin\theta_{21} & \frac{L}{2}sin\theta_{21} - \frac{B}{2}cos\theta_{21} \\ -cos\theta_{22} & -sin\theta_{22} & \frac{L}{2}sin\theta_{22} - \frac{B}{2}cos\theta_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_{Mx} \\ V_{My} \\ \omega_M \end{vmatrix}$$

So weiter ist die Herleitung von Kinematik vom MES fertig, nun es wird in 3 typischen Lenkungsarten diskutiert und mit der Eigenschaft des Lenkpols eingekoppelt.

Vorderradlenkung:

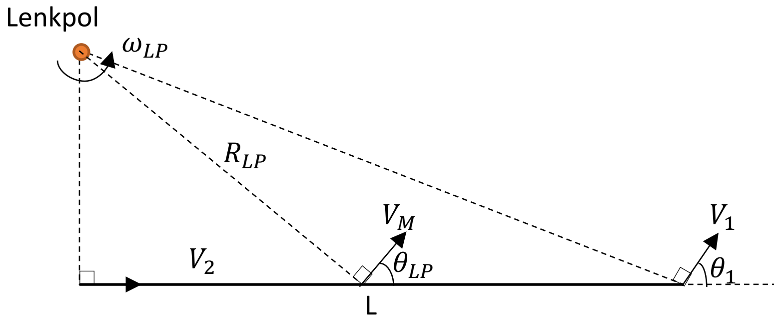

Abbildung 3: Lenkgeometrie bei Vorderradlenkung

Bei der Vorderradlenkung lautet vorderes Lenkwinkel $\theta_1 \in [-\theta_{max}\ ,\ \theta_{max}]$, das hinteres Lenkwinkel bleibt geradeaus. Dafür lautet die Eigenschaft vom Lenkpol:

$$\theta_{LP} = \tan^{-1}(\frac{\tan\theta_1}{2})$$

$$\Rightarrow \theta_{LP} \in \left[-\tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_{max}}{2}\right)\ ,\ \tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_{max}}{2}\right)\right]$$

$$R_{LP} = \frac{L}{2\sin\theta_{LP}}$$

$$\omega_{LP} = \frac{V_M}{R_{LP}} = \frac{2V_M\sin\theta_{LP}}{L}$$

Hinterradlenkung ($\theta_1 = 0\ ,\theta_2 \in [-\theta_{max}\ ,\ \theta_{max}]$):

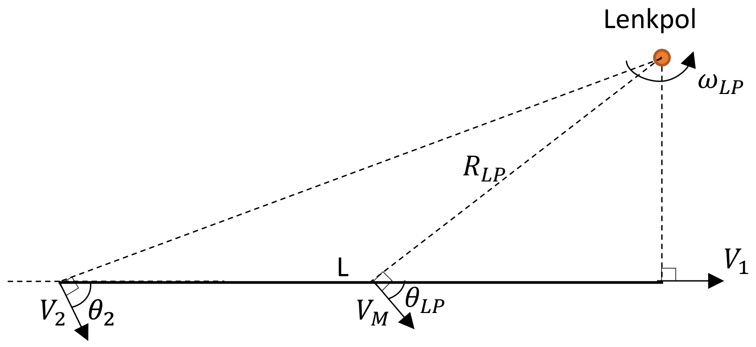

Abbildung 4: Lenkgeometrie bei Hinterradlenkung

Die Lenkgeometrie bei Hinterradlenkung ist inverse zur Vorderradlenkung. Dafür lautet die Eigenschaft vom Lenkpol:

$$\theta_{LP} = \tan^{-1}(\frac{\tan\theta_2}{2})$$

$$\Rightarrow \theta_{LP} \in \left[-\tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_{max}}{2}\right)\ ,\ \tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_{max}}{2}\right)\right]$$

$$R_{LP} = -\frac{L}{2\sin\theta_{LP}}$$

$$\omega_{LP} = \frac{V_M}{R_{LP}} = -\frac{2V_M\sin\theta_{LP}}{L}$$

Davon ist der Lenkwinkel θ_{LP}abhängig von X-Joystick Value der Fernbedienung, die weist mit Funktion $\theta_{LP} = f_\theta(X_{Value})$ auf. Genau so ist die Geschwindigkeit V_M auch von Y-Joystick Value abhängig: $V_M = f_V(Y_{Value})$. Das ergibt sich folgende Gleichungen:

$$V_{Mx} = V_M\cos\theta_{LP}$$

$$V_{My} = V_M\sin\theta_{LP}$$

$$\omega_M = \omega_{LP} = \pm\frac{2V_M\sin\theta_{LP}}{L}$$

So kann die Eingabe von Joystick zur Geschwindigkeit umgesetzt werden.

Allradlenkung ($\theta_1 \in [-\theta_{max}\ ,\ \theta_{max}]$) , $\theta_2 \in [-\theta_{max}\ ,\ \theta_{max}]$):

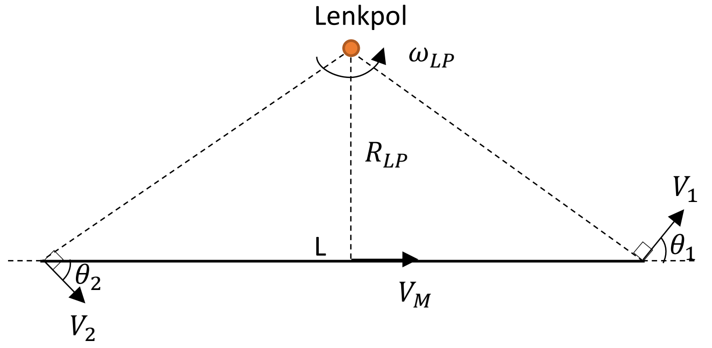

Abbildung 5: Lenkgeometrie bei Allradlenkung

Bei Allradlenkung stellt der Lenkpol genau auf der Mittellinie. Der Lenkwinkel θ_1 ist inverse Wert vom θ_2. Dafür lautet die Eigenschaft vom Lenkpol:

$$\theta_{LP} = 0$$

$$R_{LP} = \frac{L}{2\tan\theta_1}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_{LP}} \in \left[-\frac{2|\tan\theta_{max}|}{L} \quad , \quad \frac{2|\tan\theta_{max}|}{L}\right]$$

$$\omega_{LP} = \frac{V_M}{R_{LP}} = \frac{2V_M\tan\theta_1}{L}$$

Deswegen des Winkels θ_{LP} bei Allradlenkung ist immer mehr Null, deshalb definiert hier $\frac{1}{R_{LP}}$ als dem Werte, dem von X-Joystick Value abhängig ist. $\frac{1}{R_{LP}} = f_R(X_{Value})$ Genau so ist die Geschwindigkeit V_M auch von Y-Joystick Value abhängig: $V_M = f_V(Y_{Value})$. Das ergibt sich folgende Gleichungen für Umsetzung:

$$V_{Mx} = V_M$$

$$V_{My} = 0$$

$$\omega_M = \omega_{LP} = \frac{2V_M\tan\theta_1}{L}$$

Sonderfall: Bei Querfahrt wird die Fahrrichtung von X Achse in negative Y Achse versetzt. Nun die Breit und Lange des move-e-stars sind ausgetauscht. Die Umstellung wird umgeformt:

Für Vorderradlenkung:

$$V_{Mx} = V_M\sin\theta_{LP}$$

$$V_{My} = -V_M\cos\theta_{LP}$$

$$\omega_M = \omega_{LP} = \frac{2V_M\sin\theta_{LP}}{B}$$

Für Hinterradlenkung:

$$V_{Mx} = V_M \sin\theta_{LP}$$

$$V_{My} = -V_M \cos\theta_{LP}$$

$$\omega_M = \omega_{LP} = -\frac{2V_M \sin\theta_{LP}}{B}$$

Für Allradlenkung:

$$V_{Mx} = 0$$

$$V_{My} = -V_M$$

$$\omega_M = \omega_{LP} = \frac{2V_M \tan\theta_1}{B}$$