

Manfred Becke*
Uwe Golder**

Manuelle Auslaufanalyse
über das Polstrecken-Verfahren

1 Einleitung

In aller Regel setzt sich die Schleuderbewegung oder die Auslaufbewegung eines Fahrzeuges nach einer Kollision aus einer Translations- und Rotationsbewegung zusammen. Über die Reibarbeit der Reifen wird die vorhandene Translations- und Rotationsenergie abgebaut. Durch Aufstellen der Energiebilanz ergibt sich die Beziehung:

$W_{\text{Reib}} = E_{\text{Translation}} + E_{\text{Rotation}}$

$W_{\text{Reib}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v'^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \omega'^2$

Hierin bedeuten:

- m = Fahrzeugmasse (kg)
- Θ = Trägheitsmoment um die Hochachse (kgm²)
- v' = Schwerpunktschwindigkeit nach der Kollision (m/s)
- ω' = Winkelgeschwindigkeit nach der Kollision (s⁻¹).

Mit $\Theta = m \cdot i^2$ und $\omega' = v'/R$, wobei R der Abstand zwischen dem momentanen Drehpol zu Beginn der Auslaufbewegung und dem Fahrzeugschwerpunkt in dieser Position ist, ergeben sich folgende Gleichungen für die Schwerpunkts- oder Winkelgeschwindigkeit nach der Kollision:

$v' = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{Reib}} \cdot R^2}{m(R^2 + i^2)}} \quad (\text{m/s})$

$\omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{Reib}}}{m(R^2 + i^2)}} \quad (1/\text{s})$

In beiden Fällen sind die Beträge für die Reibarbeit W_{Reib} und dem Abstand Momentanpol zum Schwerpunkt unbekannt. Ist die Auslaufbewegung über ein gut dokumentiertes Spurenbild nachvollziehbar, können die unbekannten Größen grafisch ermittelt werden. Nachfolgend wird ein Verfahren vorgestellt (Polstrecken-Verfahren), das ein Bestimmen der Reibarbeit über das Ausmessen von geraden Strecken ermöglicht.

2 Theorie

Das Fahrzeug wird durch ein Zweiradmodell dargestellt, bei dem die Räder einer Achse zu einem Modellrad zusammengefaßt werden. Die Bewegung in dem betrachteten Intervall AB erfolge auf einem Kreisbogen.

*Dipl.-Ing. Manfred Becke
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle und Kfz.-Technik
**Dipl.-Ing. Uwe Golder, Sachverständiger im Ing.-Büro Schimelpfennig und Becke, Im Bilskamp 2 F, 4400 Münster

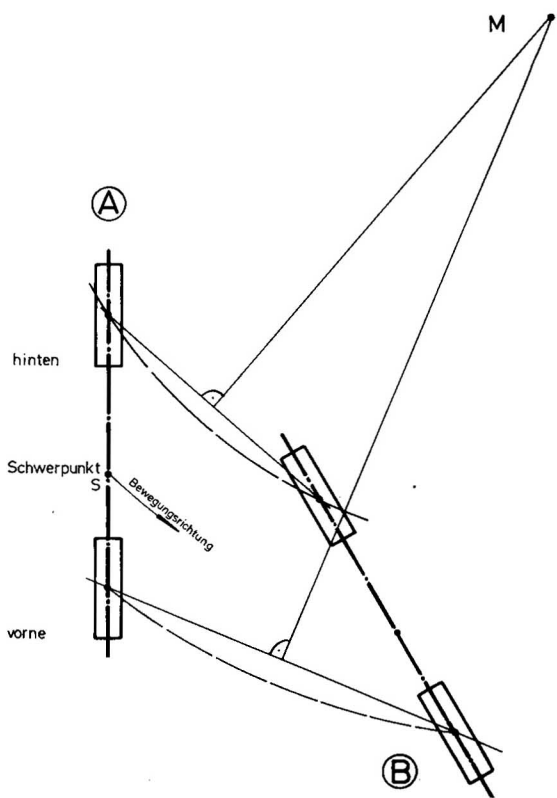


Bild 1

Der Mittelpunkt einer Kreisschar ist dadurch zu bestimmen, indem auf zwei beliebigen Sehnen die Mittelsenkrechten errichtet werden.

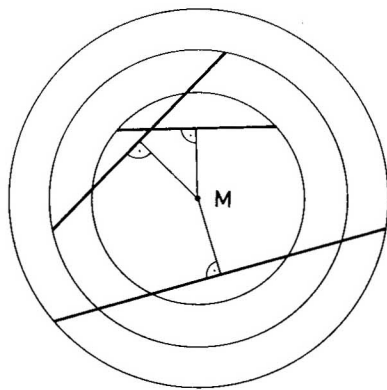


Bild 2

Übertragen auf die Bewegung des Zweiradmodelles entsprechen die Verbindungslinien der Radaufstandspunkte in den Positionen A und B zwei Sehnen. Durch Errichten der Mittelsenkrechten wird der momentane Drehpol für das Intervall AB ermittelt (Bild 1).

2.1 Frei rollende Räder

Bei frei rollenden Fahrzeugrädern verrichtet nur die Komponente der übertragbaren Seitenkraft Arbeit, die der zur Bewegungsrichtung des Rades entgegen gerichtet ist.

Diese Kraftkomponente liegt tangential zur Bewegungsbahn und steht somit senkrecht auf dem Bahnradius R des Radaufstandspunktes.

Die arbeitsleistende Komponente F_t ist abhängig vom Reifenschräglaufwinkel und steht über der Sinusfunktion mit der Seitenkraft F_s in Verbindung:

$F_t = F_s \cdot \sin \alpha$

Da $\alpha = 90^\circ - \beta$ ist, nimmt der Ausdruck folgende Form an:

$F_t = F_s \cdot \cos \beta$

Die Arbeit ist definiert als das Produkt aus Kraft und zurückgeleg-

tem Weg. Gemäß Bild 4 ist die Reibarbeit $W_{\text{Reib}} = F_t \cdot s$, wobei s der Kreisbogenlänge im Intervall AB entspricht:
 $W_{\text{Reib}} = F_s \cdot \cos\beta \cdot R \cdot \varphi$ mit $\varphi = \varphi^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}$.

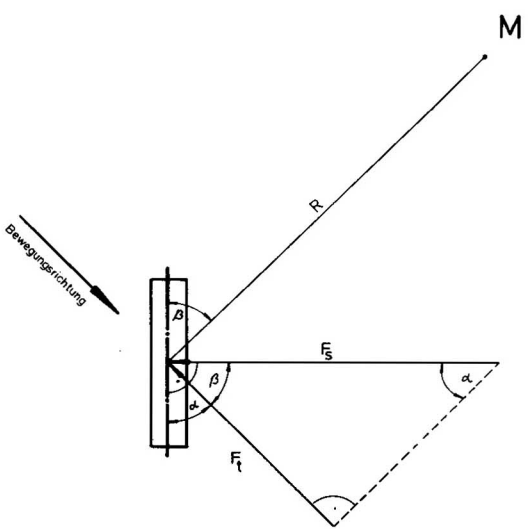


Bild 3

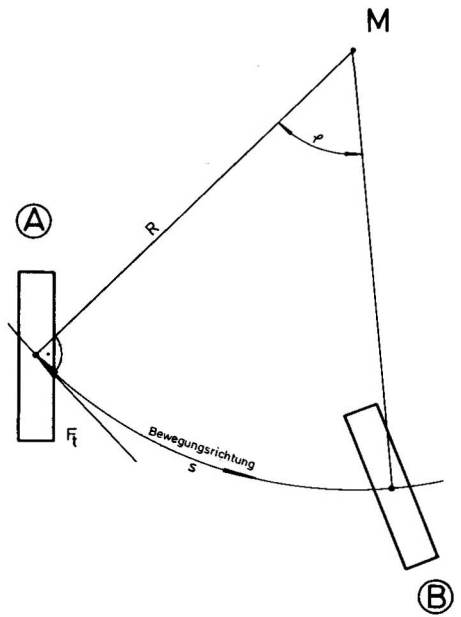


Bild 4

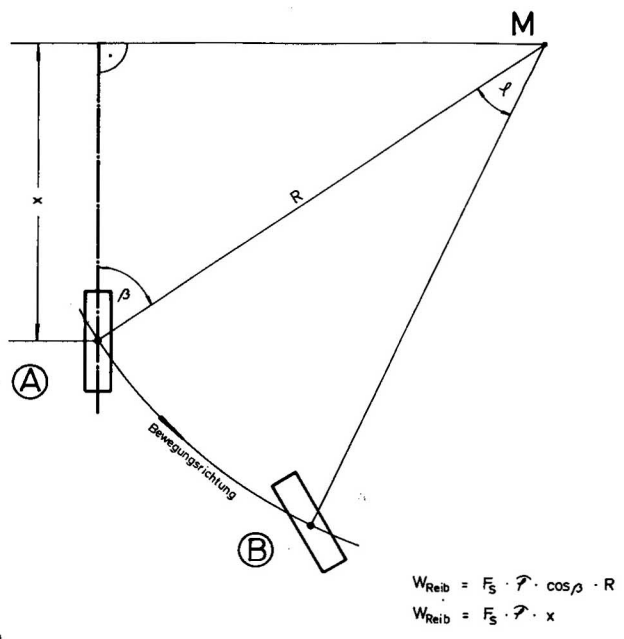


Bild 5

Aufgrund der geometrischen Gesetzmäßigkeiten entspricht im Bild 3 der Winkel zwischen der Verbindungslinie Momentanpol – Radaufstandspunkt und der Radebene dem Winkel β . Die Strecke x in der Verlängerung der Radebene vom Radaufstandspunkt bis zur Senkrechten durch den Momentanpol berechnet sich zu:

$x = R \cdot \cos\beta$

Durch Ausmessen der Strecke x und des überstrichenen Drehwinkels im Intervall von A nach B kann die geleistete Reibarbeit berechnet werden. Da F_s gleich dem Produkt aus Radlast m_R , Erdbeschleunigung g und Reibbeiwert μ ist, ergibt sich folgender Ausdruck für die Reibarbeit:

$W_{\text{Reib}} = m_R \cdot g \cdot \mu \cdot x \cdot \varphi$.

Die Herleitung der theoretischen Zusammenhänge bezog sich jeweils nur auf ein Rad des Zweiradmodelles. Um die gesamte Reibarbeit von Vorder- und Hinterachse in dem untersuchten Intervall zu berechnen, müssen beide Beträge aufsummiert werden. Da der überstrichene Drehwinkel für das Vorder- und Hinterrad gleich groß ist, muß für Vorder- und Hinterachse jeweils nur die erforderliche Strecke x_v bzw. x_h ausgemessen und mit den weiteren Größen multipliziert werden.

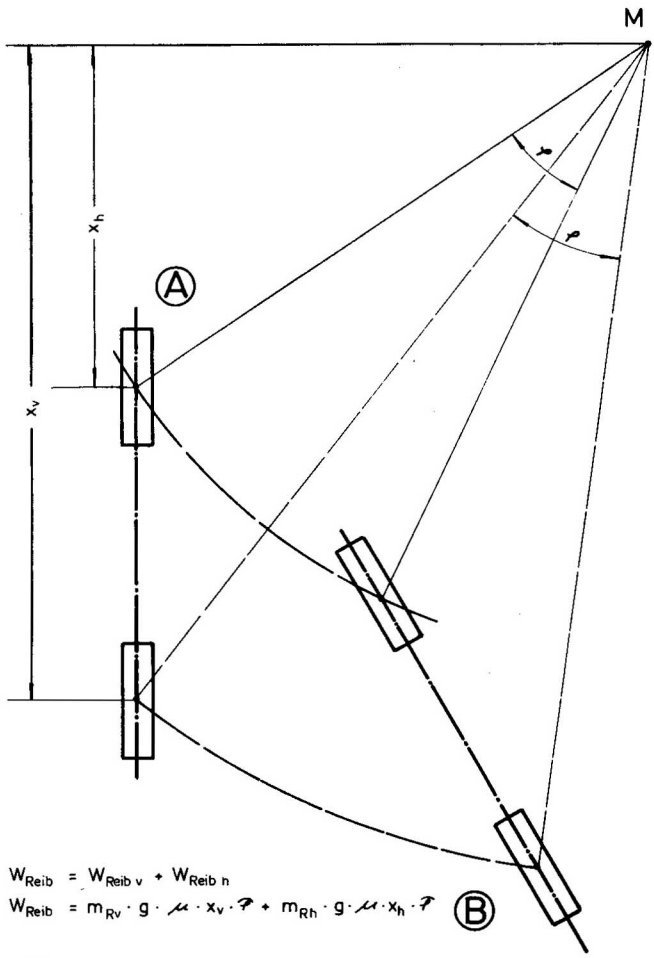


Bild 6

Bei der zugrundegelegten Bewegung auf einem Kreisbogen führt das Ausmessen der Strecken x_v und x_h in den Modellpositionen A und B zu gleichen Ergebnissen.

2.2 Blockierte Räder

Bei einem blockierten Rad ist die arbeitsleistende Kraftkomponente unabhängig vom Reifenschräglaufwinkel, da sie als Reibkraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Über den gesamten Auslaufweg bleibt die Größe der Kraft konstant. Der Winkel β wird zu Null und damit $\cos\beta$ zu Eins.

$W_{\text{Reib}} = m_R \cdot g \cdot \mu \cdot R \cdot \varphi$.

Für diesen Fall ist der Bahnradius des Radaufstandspunktes von Bedeutung.

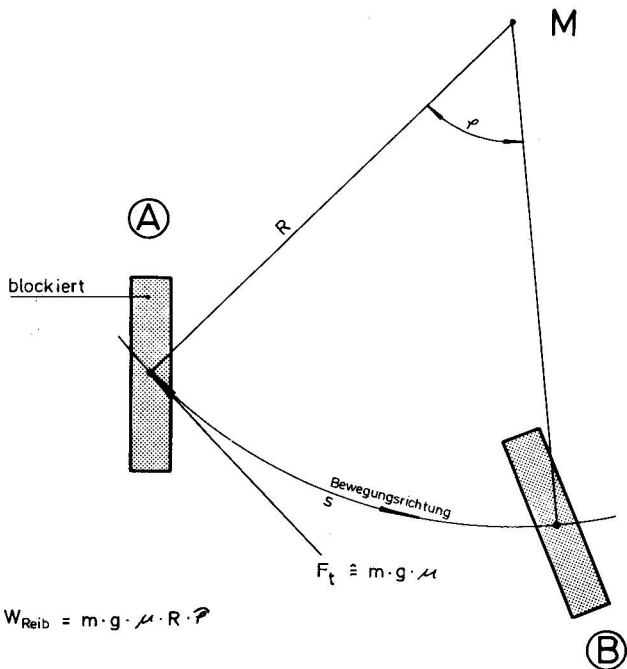


Bild 7

2.3 Eingeschlagene Räder

Durch Lenkeinschlag oder kollisionsbedingt kann der Fall auftreten, daß eines der Räder oder mehrere Räder frei rollend sind und einen Radeinschlag aufweisen. Die Reibarbeit wird dann durch veränderte Reifenschräglaufwinkel beeinflusst.

Auch für diesen Fall muß, wie dies Bild 8 zeigt, die Strecke in Verlängerung der Radebene bis zur Senkrechten durch den Momentanpol ausgemessen werden. Gegenüber dem parallel zur Fahrzeuglängsachse stehenden Hinterrad weist die Strecke x_v eine andere Richtung auf.

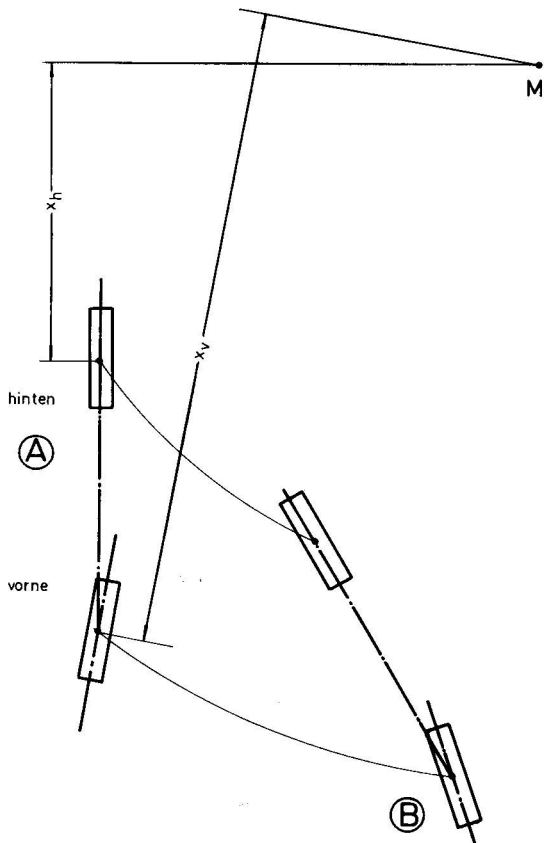


Bild 8

2.4 Sonderfall

Für den Fall, daß in dem betrachteten Intervall der Momentanpol außerhalb eines Korridores liegt, der durch den Radstand des

Fahrzeuges gebildet wird (Radstandskorridor), stellt sich ein Sonderfall ein, der eine Vereinfachung zuläßt. Als weitere Bedingung für diesen Sonderfall müssen diese Räder frei rollend sein und eine parallele Stellung zur Fahrzeuglängsachse aufweisen. Die im Bild 9 allgemein ausgemessenen Strecken x_v und x_h können durch die Beziehungen

$$x_v = x_{Sp} + l_v \text{ und } x_h = x_{Sp} - l_h$$

ausgedrückt werden.

Die Abstände des Fahrzeugschwerpunktes zur Mitte der Vorderachse l_v bzw l_h berechnen sich über die Achslastverteilung und den Radstand des Fahrzeuges:

$$l_v = \frac{m_h}{m} \cdot l_R$$

$$l_h = \frac{m_v}{m} \cdot l_R$$

Eingesetzt in die vorherigen Gleichungen führt dies zu folgenden Formeln:

$$x_v = x_{Sp} + \frac{m_h}{m} \cdot l_R$$

$$x_h = x_{Sp} - \frac{m_v}{m} \cdot l_R$$

Werden in dem Ausdruck

$$W_{Reib} = m_v \cdot g \cdot \mu \cdot x_v \cdot \bar{\varphi} + m_h \cdot g \cdot \mu \cdot x_h \cdot \bar{\varphi}$$

die Strecken x_v und x_h durch diese Gleichungen ersetzt, stellt sich als Endformel eine Beziehung ein, bei der für die Berechnung der Reibarbeit die gesamte Fahrzeugmasse und der Abstand des Schwerpunktes in der Verlängerung der Fahrzeuglängsachse bis zur Senkrechten durch den Momentanpol von Bedeutung sind:

$$W_{Reib} = m \cdot g \cdot \mu \cdot x_{Sp} \cdot \bar{\varphi}$$

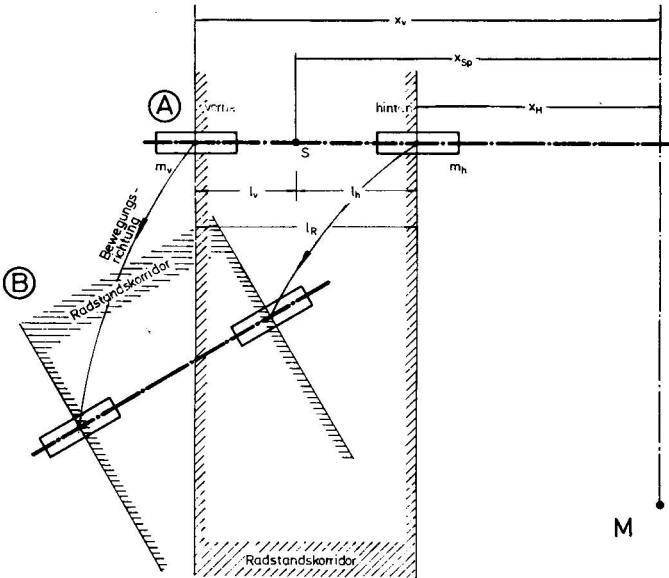


Bild 9

3 Beispiele

Anhand zweier Beispiele soll die Vorgehensweise des Verfahrens dargestellt werden. Es erfolge gleichzeitig der Übergang von einem Zweirad- auf ein Vierradmodell.

3.1 Beispiel 1

Zunächst soll für den Sonderfall – alle Räder frei rollend, parallele Radstellung und Momentanpol liegt außerhalb des Radstandskorridores – die Vorgehensweise beschrieben werden.

Bild 10 zeigt das Spurenbild eines schleudernden Pkw. Die drei dargestellten Fahrzeugstellungen unterteilen den Schleudervorgang in die Intervalle 1,2 und 2,3. Für jedes dieser Intervalle wird als erstes der momentane Drehpol, wie unter 2.0 beschrieben, be-

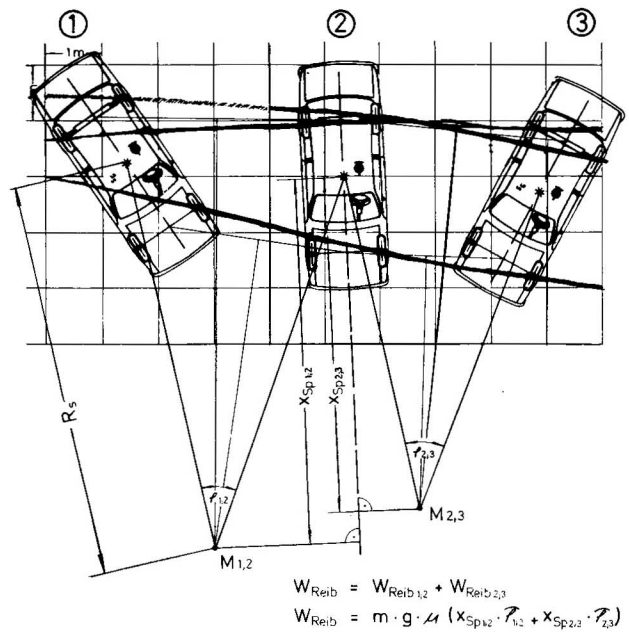
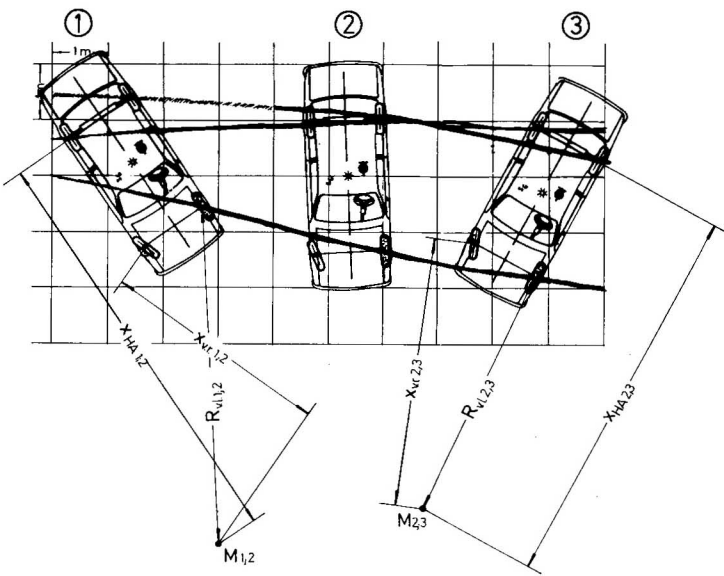


Bild 10

stimmt. Durch das Verbinden zweier gleicher Bezugspunkte zu Beginn und am Ende des Intervalles und durch Errichten der Mittelsenkrechten liegt der Momentenpol für jedes der Intervalle fest. Die Verbindung des Fahrzeugschwerpunktes zu Beginn und am Ende des Intervalles mit dem Momentenpol führt zu dem überstrichenen Drehwinkel $\varphi_{1,2}$. Da die Fahrzeugposition 2 als Endposition für das Intervall 1,2 und als Anfangsposition für das Intervall 2,3 gilt, empfiehlt es sich beim Ausmessen der Strecken $x_{Sp1,2}$ und $x_{Sp2,3}$ von dieser Position auszugehen. Durch Aufsummieren der Produkte $x_{Sp1,2} \cdot \bar{\varphi}_{1,2}$ und $x_{Sp2,3} \cdot \bar{\varphi}_{2,3}$ und Multiplikation mit den bekannten Größen für Fahrzeugmasse, Erdbeschleunigung und Reibbeiwert kann der Betrag der Reibarbeit berechnet werden.

3.2 Beispiel 2

Bild 11 zeigt die gleiche Schleuderphase, wie im Beispiel 1, nur soll in diesem Fall das linke Vorderrad blockiert und das rechte nach links eingeschlagen sein. Um die auszumessenden Strecken deutlicher hervorzuheben, wurde auf eine Darstellung der erforderlichen Linien für die Momentenpole und die jeweils überstrichenen Drehwinkel verzichtet. Aus dem gleichen Grund werden die erforderlichen Strecken nicht von der für beide Intervalle gemeinsam geltenden Position 2 aus ge-



linkes Vorderrad: $W_{Reib_{vl}} = m_{Rv} \cdot g \cdot \mu (R_{vl1,2} \cdot \bar{\varphi}_{1,2} + R_{vl2,3} \cdot \bar{\varphi}_{2,3})$
rechtes Vorderrad: $W_{Reib_{vr}} = m_{Rv} \cdot g \cdot \mu (x_{vr1,2} \cdot \bar{\varphi}_{1,2} + x_{vr2,3} \cdot \bar{\varphi}_{2,3})$
mit m_{Rv} = Radlast vorn
Hinterräder: $W_{Reib_{HA}} = m_{HA} \cdot g \cdot \mu (x_{HA1,2} \cdot \bar{\varphi}_{1,2} + x_{HA2,3} \cdot \bar{\varphi}_{2,3})$
mit m_{HA} = Achslast hinten
 $W_{Reib} = W_{Reib_{vl}} + W_{Reib_{vr}} + W_{Reib_{HA}}$

Bild 11

messen, sondern von der Anfangsposition 1 des Intervalles 1,2 bzw. der Endposition 3 des Intervalles 2,3. Bei diesem Beispiel muß eine getrennte Betrachtung für das linke Vorderrad (abgekürzt v.l.), das rechte Vorderrad (abgekürzt v.r.) und die Hinterachse (abgekürzt HA) durchgeführt werden. Es gilt zu beachten, daß bei den getrennt betrachteten Vorderrädern die jeweilige Radlast, bei den gemeinsam betrachteten Hinterrädern die Hinterachslast berücksichtigt werden muß.

4 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren vorgestellt, das durch Ausmessen von geraden Strecken eine Berechnung der von den Fahrzeugrädern geleisteten Reibarbeit während einer Auslaufbewegung ermöglicht. Das Polstrecken-Verfahren kann sowohl für den Fall der frei rollenden Räder, die zudem einen Radeinschlag aufweisen können, als auch der blockierten Räder angewandt werden. Bei dem Verfahren wurde von der Vereinfachung ausgegangen, daß sich das Fahrzeug in den betrachteten Intervallen auf einem Kreisbogen bewegt. Der hierbei gemachte Fehler hängt von der Größe des Intervalles ab. Je kleiner dieses gewählt wird, desto größer wird die Genauigkeit und es ist von Fall zu Fall zu unterscheiden, mit welchem Aufwand die Auslaufbewegung eines Fahrzeuges zu analysieren ist.