

Pfadplanung von landwirtschaftlichen Fahrmanövern

Dennis Sabelhaus, Peter Schulze Lammers, Lars Peter Meyer zu Hellingen, Frank Röben

Satellitengestützte Navigationssysteme bieten die Möglichkeit, Landmaschinen zentimetergenau auf dem Feld zu führen. Eine Referenzfahrspur wird aufgezeichnet und positionsbezogen verschoben, sodass der gesamte Schlag mit parallelen Fahrspuren bedeckt werden kann. Das Wenden von Spur zu Spur allerdings ist noch nicht im Standardumfang eines Lenksystems enthalten.

Dieser Artikel stellt eine Methode vor, die befahrbare Wendemanöver generiert. Als fahrzeugspezifische Parameter werden Geschwindigkeit, minimaler Wenderadius und die systembedingte Lenkgeschwindigkeit als Basis von Trajektorien genutzt. Eine Adaption des aus der Robotik bekannten Verfahrens der Continuous-Curvature-Pfadplanung wird angewandt. Im Realversuch konnte gezeigt werden, dass die generierten Wendespuren von einer Maschine hochgenau abgefahren werden können und somit ein präzises Anschlussfahren in eine Fahrspur möglich ist.

Schlüsselwörter

Pfadplanung, GPS-Lenksysteme, Automatisches Wenden, Wendemanöverplanung

Automatische Lenksysteme werden in der modernen Landwirtschaft zunehmend angewendet, um Felder effizient zu bearbeiten. Traktoren und Erntemaschinen können mithilfe von Echtzeitkinematik (Real Time Kinematic, RTK) im Bereich weniger Zentimeter auf dem Feld navigiert werden. Um auch beim Wenden und anderen lenkintensiven Manövern das Fahrzeug präzise zu führen, muss die Sollspur so an die Maschinenkinematik und -dynamik angepasst werden, dass eine hochgenaue Bahnverfolgung ermöglicht wird. Im Folgenden wird die Trajektorienplanung mittels Klothoiden erklärt und abschließend verifiziert.

Material und Methode

Damit automatische Lenksysteme eine Wende abfahren können, muss ein möglichst realistischer Fahrweg abgeschätzt werden. Diese Fahrwege folgen im Wesentlichen drei Kriterien, die vor der Planung bekannt sein müssen (Abbildung 1):

- Das Lenksystem kann den minimalen Wenderadius $\frac{1}{\kappa}$ mit dem maximalem Lenkeinschlag und dem Radstand automatisch berechnen.
- Mit der maximalen Querschleunigung $a_{y, max}$ wird der maximale Lenkeinschlag $\frac{d\delta}{dt}$ durch die Geschwindigkeit eingeschränkt, sodass das Fahrverhalten stabil bleibt und das Fahrzeug weder unter- noch übersteuert.
- Die dritte einschränkende Größe ist die Lenkgeschwindigkeit, d. h. der Zeitraum, in dem die Aktuatorik von maximalem Links- zu maximalem Rechtseinschlag wechselt.

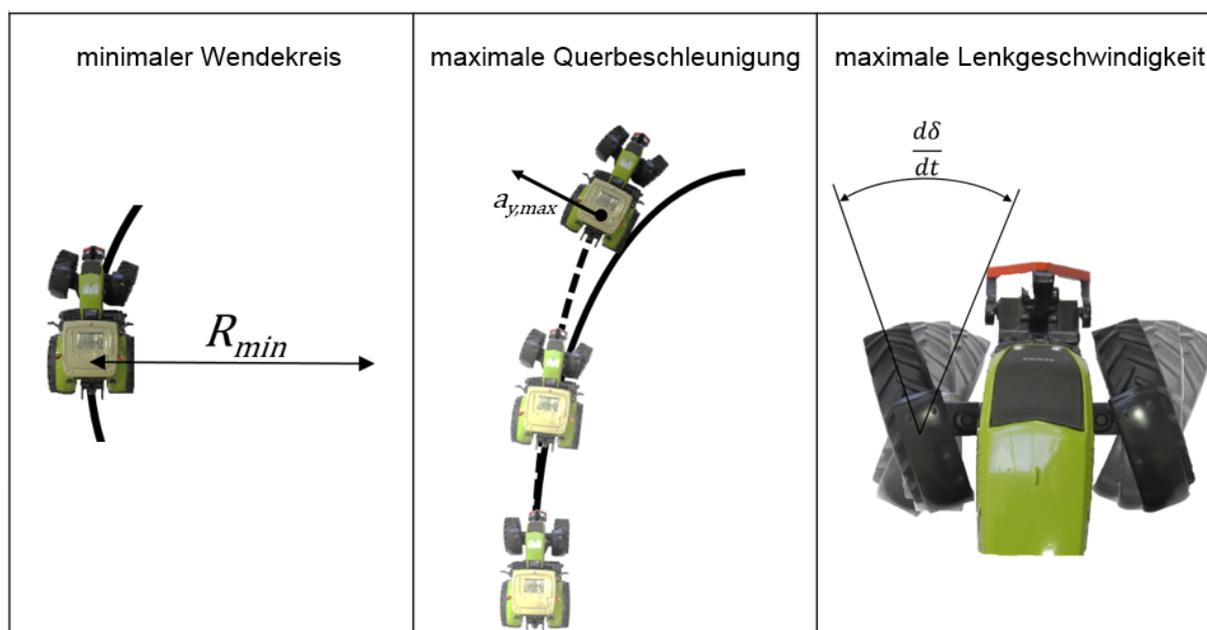


Abbildung 1: Anforderungen an eine geplante Fahrspur: Beachtung des minimalen Wenderadius, der maximalen Querbeschleunigung und der maximalen Lenkgeschwindigkeit

Einige Arbeiten zeigen bereits Methoden zum Generieren von Wendewegen. OKSANEN (2007) generiert Wendewege mit Abschnitten von Bézier-Splines, um die Länge des Wendewegs zu minimieren. Dabei soll die Wendeweglänge minimiert werden. Als Modell dient die komplexe Traktor-Anhänger-Kombination, die als übliches Feldfahrzeug definiert wurde. Es wird als dynamisches System mit 6 Zuständen und 2 Eingängen modelliert, restriktiert wird dabei auf eine 2D-Bewegung. SCHEUREN (2014) zeigt eine Methode zum Erzeugen von Vorgewendepfaden für die Kinematik eines traktorähnlichen Fahrzeugs mithilfe von gitterbasierten Bewegungsprimitiven. Um ein möglichst genaues Anschlussfahren an eine nachfolgende Spur zu realisieren, wird ein sehr feinmaschiges Gitter möglicher Spurpunkte untersucht. VOUGIOUKAS et al. (2006) berechnen numerisch die Trajektorien mittels einer zweigeteilten Bewegungsplanung und vordefinierter Kostenfunktion.

Eine Möglichkeit zum Generieren von befahrbaren Trajektorien ist die „Continuous-Curvature-Pfadplanung“ (CC-Pfadplanung). 1997 wurde das Verfahren von SCHEUER und FRAICHARD (1997) für das Generieren abfahrbarer Pfade zwischen Start- und Endpositionen vorgestellt. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass kontinuierliche Krümmungsverläufe erzeugt werden (Abbildung 2). Bei beiden Verfahren werden ein Start- und ein Zielpunkt mit Start- und Endausrichtung durch eine Trajektorie verbunden. In der linken Darstellung ist die Komposition aus minimalen Wendekreisen und Geraden – auch Dubins-Kurven (DUBINS 1957) genannt – zu sehen. Darunter wird der dazugehörige Krümmungsverlauf gezeigt. Im Übergang von Kreis zu Gerade tritt eine Diskontinuität der Krümmung auf. Dieser Sprung bedeutet, dass die Lenkradstellung abrupt vom maximalen Rechtsein Schlag auf Geradeausfahrt wechselt. Somit kann die Trajektorie nicht mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden, am schwarz eingekreisten Übergangspunkt muss angehalten werden. Durch das Einfügen von Spiralstücken – sogenannten Klothoiden – wird dieser Krümmungssprung vermieden. Die Klothoide weist die Eigenschaft maximaler Krümmungsänderung $\sigma = \dot{\kappa} = +\sigma_{max}$ auf. Die Krümmungsänderung ist die erste Ableitung der Krümmung und weist somit aus, ob ein stetiger

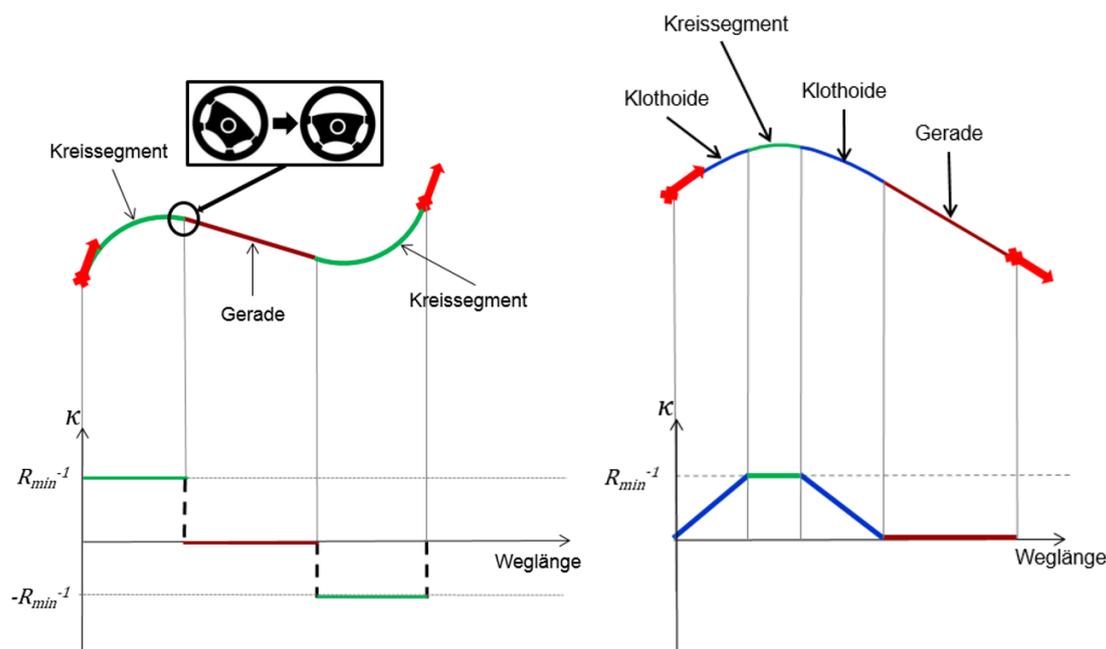


Abbildung 2: Darstellung der Krümmungsverläufe von Dubins-Kurven (DUBINS 1957) (links) und CC-Pfaden (SCHEUER und FRAICHARD 1997) (rechts)

Krümmungsverlauf gegeben ist. Mit der einleitenden Klothoide steigt die Krümmung von $\kappa = 0$ auf $\kappa = \kappa_{max}$. Die Krümmung beschreibt die bogenförmige Abweichung einer geraden Linie und ist der Kehrwert des Radius.

Das charakteristische Merkmal einer Klothoide ist die lineare Krümmungsänderung, die die Krümmung proportional zu der Klothoidenlänge ändert. KIMIA et al. (2003) beschreiben die Klothoidenpfadpunkte mithilfe der Fresnel-Integrale C_f und S_f . Der Kreismittelpunkt Ω mit seinen Koordinaten Ω_x und Ω_y für die CC-Wende kann ausgehend von den Fresnel-Integralen der einleitenden, am Startpunkt anliegenden Klothoide bestimmt werden. SCHEUER und FRAICHARD (2004) haben die Formeln mit dem Laufparameter p $[0, p_{max} = \frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}}]$ und den Basisklothoidenparametern x, y beschrieben. θ beschreibt den Winkel der Basisklothoidenabschlüsse zum CC-Kreismittelpunkt.

$$\Omega_x = x_{Klothoide} \left(\frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}} \right) - \kappa_{max}^{-1} \cdot \sin(\theta) \tag{Gl. 1}$$

$$\Omega_y = y_{Klothoide} \left(\frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}} \right) + \kappa_{max}^{-1} \cdot \cos(\theta) \tag{Gl. 2}$$

Im Folgenden wird der Fall einer CC-Wende dargestellt. Der Radius R_{big} ist als der Abstand zwischen Kreismittel- und Startpunkt definiert. Gleichung 3 zeigt den Zusammenhang.

$$R_{big} = \sqrt{(\Omega_x - x_{Klothoide}(0))^2 + (\Omega_y - y_{Klothoide}(0))^2} \tag{Gl. 3}$$

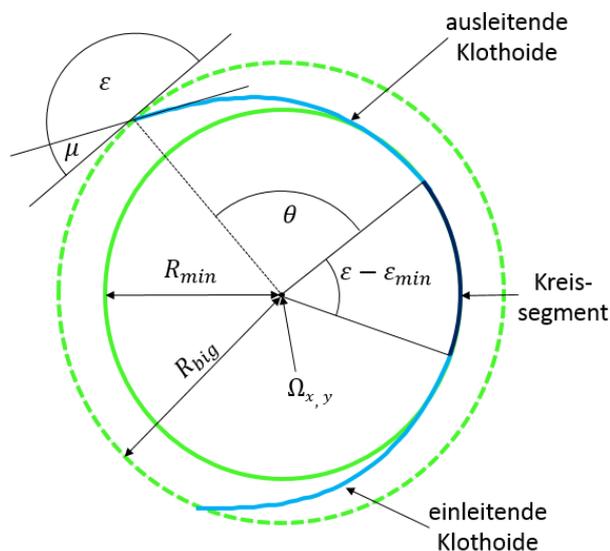


Abbildung 3: Genereller Fall eines CC-Kreises mit dem CC-Kreismittelpunkt Ω

Abbildung 3 zeigt die Konstruktionselemente eines CC-Kreises mit dem Winkel μ und dem dazugehörigen Gegenwinkel ε . Der Winkel μ liegt zwischen der Tangente am CC-Kreiseintritt und der Klothoiden-Startausrichtung. Sie können wie folgt berechnet werden:

$$\mu = \pi - \varepsilon = \text{atan}\left(\frac{\Omega_x - y_{\text{Klothoide}}(0)}{\Omega_y - y_{\text{Klothoide}}(0)}\right) \tag{Gl. 4}$$

Der Winkel ε gibt auch den Unterschied zwischen Start- und Endausrichtung an. Der minimale Winkelunterschied ist definiert als $\varepsilon_{\min} = \kappa_{\max}^2 \cdot \sigma_{\max}^{-1}$. Im Falle kleiner Winkelunterschiede ($|\varepsilon| \leq \varepsilon_{\min}$) müsste laut FRAICHARD und SCHEURER (2004) eine komplette Kreisumrundung geplant werden. Um diesen Pfad zu verhindern, haben sie einen Elementarpfad vorgestellt. Dieser Elementarpfad hat eine Krümmungsänderung. Die geforderte Krümmungsänderung $\sigma \leq \sigma_{\max}$ kann angegeben werden mit:

$$\sigma = \frac{\pi(\cos(\frac{\varepsilon}{2})C_f(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\pi}}) + \sin(\frac{\varepsilon}{2})S_f(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\pi}}))^2}{R_{\text{big}}^2 \sin^2(\frac{\varepsilon}{2} + \mu)} \tag{Gl. 5}$$

Damit können zwei achssystemmetrische Klothoidenteile berechnet und zusammengelegt werden (Abbildung 4).

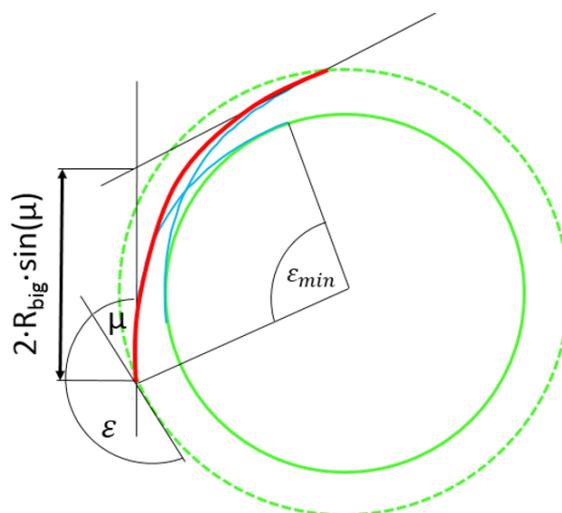


Abbildung 4: CC-Wende für den Winkelunterschied $0 < \varepsilon < \varepsilon_{min}$

Um die Idee der CC-Pfadplanung auf die Spurplanung von landwirtschaftlichen Maschinen zu übertragen, stellt Gleichung 6 eine Verbindung her:

$$l_{klothoide} = \frac{t_{Lenk}}{2} \cdot v \tag{Gl. 6}$$

Die Klothoidenlänge kann als Produkt der Fahrgeschwindigkeit und der halben Lenkzeit von maximalem Rechts- zu maximalem Linkseinschlag beschrieben werden. Diese Werte sind heutigen Lenksystemen bekannt und können während der Fahrt ermittelt werden.

CC-Pfadadaption für die Wendemanöverplanung

Mithilfe von CC-Kreisen können abfahrbare Pfade für Landmaschinen generiert werden, welche durch einen minimalen Wenderadius und eine maximale Krümmungsänderung limitiert sind. Die aufgezeigten Wendemanöver sind für die Spurbstände d zulässig, die in den angegebenen Formeln der Abbildung 5 durch Wertebereiche angegeben werden.

Als erstes Manöver wird die Omega-Wende vorgestellt, welche dem griechischen Buchstaben Omega ähnelt und daher ihren Namen hat. Diese Wende ist bei kleinen Arbeitsbreiten üblich, um in eine benachbarte, parallele Spur zu wenden. Vom Ablauf handelt es sich um eine links-rechts-links oder rechts-links-rechts Lenkkombination. Dieser CC-Pfad ist in Abbildung 5 (links) dargestellt und kann durch drei CC-Kreise zusammengestellt werden. Wenn der Abstand d zwischen Start- und Endpunkt $\geq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu)$ ist, wäre die Position des oberen, mittleren Kreises nicht planbar. Ist der Abstand d zwischen Start- und Endpunkt $2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \leq d \leq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$, so ist die Omega-Wende nicht planbar. Der U-Turn ist ebenfalls noch nicht planbar, sodass eine Übergangslösung gefunden werden muss. Die sogenannte Übergangswende wird geplant, indem eine Rechts- bzw.

Linkskurve mit drei CC-Kreisen konstruiert wird. Dabei ist der mittlere CC-Kreis mit einem Abstand x_{min} so angesetzt, dass frühestmöglich aus dem einleitenden CC-Kreis ohne Selbstumrundung herausgefahren und in den abschließenden CC-Kreis hineingefahren werden kann.

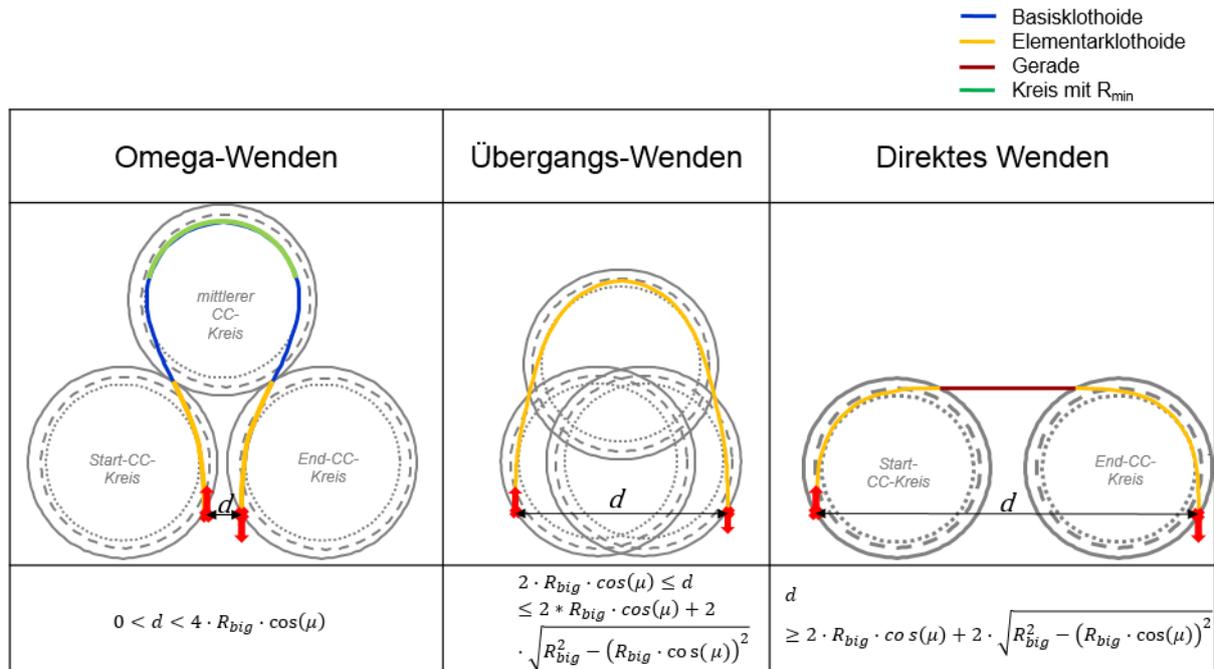


Abbildung 5: Angepasste CC-Pfade für das landwirtschaftliche Wenden

Für alle Wendemanöver mit einem Spurabstand $d \geq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$ ist eine direkte Wende (oder U-Turn) zu planen. Dieser Wendetyp besteht aus einem einleitenden CC-Kreis, einem Geradensegment und einem abschließenden CC-Kreis. Die Länge des Geradensegments kann als $l_{segment} = -\Omega_{x,start} - R_{big} \cdot \sin(\mu) + \Omega_{x,end} - R_{big} \cdot \sin(\mu)$ berechnet werden.

Mit den drei aufgeführten Manövern ist somit zwar für alle Fahrspurwechsel eine Wende planbar, jedoch wird nicht immer der kürzeste Fahrweg gefunden – unter anderem da keine Fahrtrichtungswechsel betrachtet werden. Andere planbare Manöver werden in diesem Beitrag nicht vorgestellt. Weiterführend zeigen SABELHAUS et al. (2013) andere Manöver, welche die CC-Planung in landwirtschaftlichen Szenarien aufgreift: Beispielsweise die sogenannte Fishtail-Wende, bei dem das Fahrzeug mithilfe zweier Fahrtrichtungsänderungen den Weg einer Haifischflosse abfährt, und auch spezielle Manöver, die die Vorgewendebreite minimieren.

Ergebnisse

Sobald das Fahrzeug von der Spur in die Vorgewendefläche fährt, soll eine automatische Wende geplant und gefahren werden. Es muss geprüft werden, ob die generierten Pfade den Maschinenrestriktionen im Hinblick auf die Kinematik gehorchen. Wegen der Vielzahl an möglichen Wendemanövern werden hier exemplarisch nur die Ergebnisse eines Omega-Wende hinsichtlich der Befahrbarkeit vorgestellt. Dabei wird das Wenden in eine benachbarte Spur untersucht. Die wichtigsten Parameter für eine Trajektorienbeschreibung sind die Krümmung sowie die Krümmungsänderung (FRAICHARD

und SCHEURER 2004). Diese Parameter können ohne kinematisches Fahrzeugmodell und -simulation berechnet werden, sie sind ausschließlich von der Fahrspur abhängig. Um die Fahrspureigenschaften bewerten zu können, wird ein kubischer Spline – also eine Funktion, die stückweise aus Polynomen n-ten Grades zusammengesetzt ist – zur Krümmungsberechnung verwendet, dargestellt in Gleichung 7 mit den Komponentenfunktionen x und y . Die Krümmungsänderung wird aus der zeitbezogenen Krümmung abgeleitet.

$$\kappa(t) = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{Gl. 7}$$

Die Krümmung und die Krümmungsänderung verhalten sich wie vermutet (Abbildung 6, rechts). Die Krümmung verläuft zwischen $-0,1$ und $0,1 \text{ m}^{-1}$, was dem Kehrwert des angegebenen minimalen Wenderadius von 10 m entspricht. Die Krümmungsänderung ist limitiert mit $\sigma_{\max} \approx 0,05 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Die Krümmung und Krümmungsänderung haben keine Diskontinuitäten und die geforderten Grenzen werden eingehalten. Es wurde somit nachgewiesen, dass die geplante Trajektorie den theoretischen Anforderungen der Maschine entspricht.

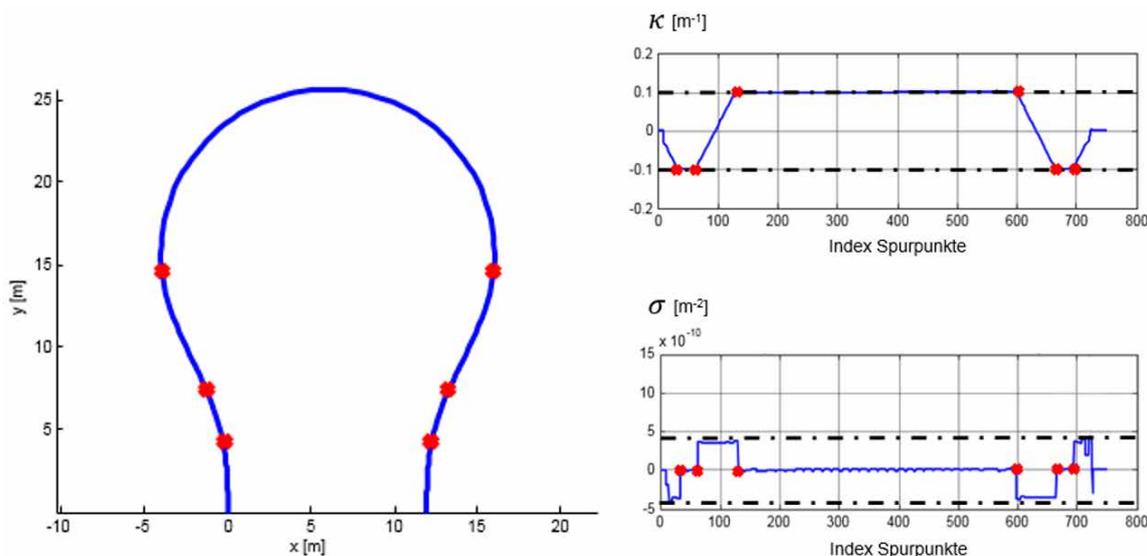


Abbildung 6: Darstellung der Krümmung (rechts oben) und Krümmungsänderung (rechts unten) sowie der Trajektorie (links)

In einem Fahrversuch wird geprüft, ob ein Lenksystem mit seiner Fahrzeugregelung die vorgegebene Spur verfolgen kann und welche Genauigkeit eingehalten wird. Als Versuchsaufbau wird ein Traktor (CLAAS Axion 840) mit Lenksystem (CLAAS S10 mit RTK-Korrekturunterstützung) gewählt. Die Fahrzeugkennwerte sind mit einem minimalen Wenderadius von $R_{\min} = 5,2 \text{ m}$, einer maximalen Lenkzeit von $t_{lenk} = 3 \text{ s}$ und einer konstanten Fahrgeschwindigkeit mit $v = 6 \text{ km h}^{-1}$ bekannt. Die vorgestellte Methodik ist in Matlab implementiert worden, die dort generierte Wendetrajektorie wird als Referenzlinie an das Lenksystem via USB übertragen und die Spur abgefahren.

Die Feldfahrt wird aufgezeichnet, alle von der Navigationssensorik des Lenksystems in RTK-Genauigkeit aufgenommenen Positionen werden mit einer Aufnahme­frequenz von 10 Hz gespeichert. Die Aufzeichnungen werden mittels Matlab-Skript ausgewertet. Das Qualitätskriterium einer Spurverfolgung ist die Querabweichung (DLG 2003). Sie wird als Abstand der aufgenommenen Positionen zur Plan-Trajektorie (angenommen als Polylinie) berechnet. Abbildung 7 zeigt die berechneten Querabweichungen. Die maximale Querabweichung liegt während der gesamten Wende bei 0,05 m. Vor allem beim Anschluss an die Zielspur erreicht die Querabweichung einen Wert unter 0,01 m. Dies ermöglicht ein präzises Arbeiten auf der neuen Spur.

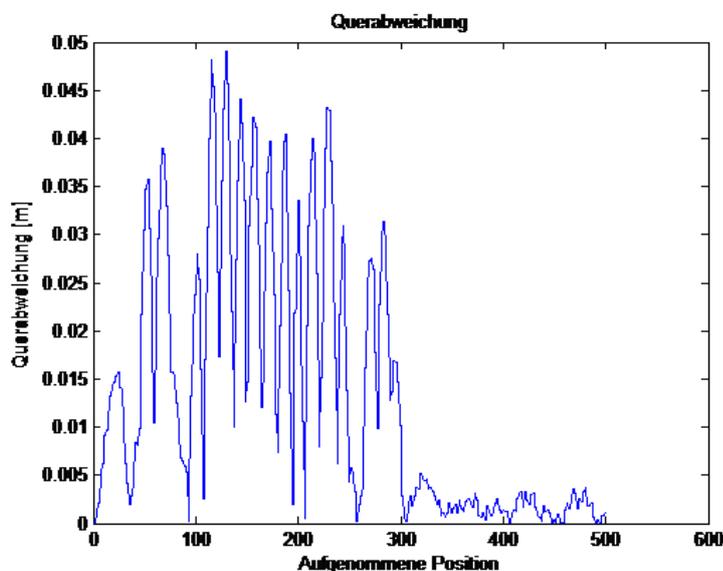


Abbildung 7: Querabweichungen zwischen aufgenommener GPS-Position und geplantem CC-Pfad

Schlussfolgerungen

Die Konstruktion von CC-Pfaden mit der Basiskomponente CC-Kreis vereinfacht die Wendemanöverberechnung und garantiert abfahrbare Pfade in einer akzeptablen Rechenzeit ohne zeitintensive Spline-Interpolationen oder -approximationen sowie andere numerische Ansätze. Die initial berechneten Bauteile Kreis, Gerade und Klothoidensegment können für jegliche Konstruktion in gedrehter oder verschobener Form verwendet werden. Erweiterungen, zum Beispiel für den Streifenanbau, müssen in einem weiteren Schritt erarbeitet werden.

Die vorgestellte Methode kann in eine Lenksystem-Software integriert und als Wendeautomation verwendet werden. Dadurch kann der Landwirt beim Wenden von der Fahraufgabe entlastet werden und sich beispielsweise auf die Anbaugerätsteuerung und Prozessoptimierung konzentrieren. Durch spurgenaues Anschlussfahren kann Saatgut präzise ausgebracht werden.

Wird davon ausgegangen, dass keine Fahrtrichtungswechsel vorgenommen werden, so wird der kürzeste Pfad gefunden und Kraftstoff kann somit eingespart werden.

Literatur

- DLG (2003): GPS-Empfänger Vergleich – Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung. DLG-Prüfbericht 5 148F, Anmelder: geo-konzept
- Dubins, L. (1957): On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics* 79(3), pp. 497–516
- Fraichard, T.; Scheuer, A. (2004): From Reeds and Shepp's to Continuous-Curvature Paths. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 20(6), pp. 1025–1035
- Kimia, B.; Frankel, I.; Popescu, A.-M. (2003): Euler Spiral for Shape Completion. *International Journal of Computer Vision* 54, pp. 159–182
- Oksanen, T. (2007): Path planning algorithms for agricultural field machines. Helsinki: Helsinki University of Technology
- Sabelhaus, D.; Röben, F.; Meyer zu Helliggen, L.P.; Schulze Lammers, P. (2013): Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres. *Biosystems Engineering* 116, pp. 399–409
- Scheuer, A.; Fraichard, T. (1997): Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles. IROS '97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7–11 Sep 1997, Grenoble, IEEE, pp. 1–7, <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.1997.655130>
- Scheuren, S. (2014): Prozessoptimierte Planung für kooperative mobile Roboter. Dissertation, Osnabrück, Institut für Informatik, AG Wissensbasierte Systeme, urn:nbn:de:gbv:700-2014070812619
- Vougioukas, S.; Blackmore, S.; Nielsen, J.; Fountas, S. (2006): A two-staged optimal motion planner for autonomous agricultural vehicles. *Precision Agriculture* 7(5), pp. 361–377

Autoren

Dipl.-Ing. Dennis Sabelhaus ist System Engineer bei CLAAS E-Systems, Bäckerkamp 19, 33330 Gütersloh, und schreibt seine Doktorarbeit am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn, E-Mail: dennis.sabelhaus@web.de.

Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers ist Leiter der Sektion Systemtechnik in der Pflanzenproduktion des Instituts für Landtechnik der Universität Bonn.

Dr.-Ing. Frank Röben ist System Engineer und **Dipl.-Ing. (FH) Lars Peter Meyer zu Helliggen** ist Software-Entwickler der CLAAS E-Systems.

Hinweis

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2014, Berlin, 19.–20. November 2014, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2226, S. 247–255).