

Paraphrasierung – Experteninterviews

Detektion des Grenzbereichs

Akustisch:

„[...] auch akustisch, dass du hörst, dass du am Grenzbereich bist, man hört es an den Reifen [...]“ - #001_02_007012

Kernaussage:

Das Auftreten von Reifenquietschen signalisiert die letzten fünf bis zehn Prozent an Reifenpotential und kann somit einen Anhaltspunkt für den Grenzbereich geben. Plötzliche Drehzahlüberhöhungen können das Maximum der Antriebsachse und somit die aktuellen Grip-Niveaus kennzeichnen.

Paraphrasierung:

Zu den akustischen Detektionsmöglichkeiten wird unter anderem das Reifenquietschen gezählt [Z1, Z5-Z7]. Stand heute zeigen nicht mehr alle Reifen ein Quietschen vor der Kraftschlussgrenze, somit kann diese Methode nur hinzugezogen werden, sofern der Reifen diese Eigenschaft zeigt [Z2-Z3].

Vor allem bei Profil- und Regenreifen tritt häufig Reifenquietschen auf, da die Profilblöcke von der Haftreibung in die Gleitreibung rutschen [Z4-Z5, Z7]. Das auftretende Geräusch wird mit einem Knurren verglichen und nimmt immer weiter ab je näher man der Kraftschlussgrenze ist [Z4-Z5]. Bei Slickbereifung tritt im Allgemeinen keine Geräuschbildung nahe des Grenzbereichs auf [Z3, Z8].

Sollte Reifenquietschen auftreten, bedeutet dies aber nicht das Ende des Grenzbereichs, sondern kennzeichnet lediglich die letzten fünf bis zehn Prozent an Reifenpotential [Z2].

Weiters kann das Wahrnehmen von plötzlichen Drehzahlüberhöhungen in Beschleunigungsphasen dem Fahrer signalisieren, dass an der Antriebsachse die Schlupfgrenze erreicht und somit kein Längspotential mehr abgesetzt werden kann [Z45].

Ideen/Strategien:

-

Fahrmanöver:

*„Also das ist ein ständiges Erforschen und das hört nie auf.“ -
#007_06_037038*

Kernaussage:

Fahrer nutzen zur schnelleren Identifikation der Fahrzeugcharakteristik im Grenzbereich verschiedenste Fahrmanöver, die gezielt instabile Fahrzeugreaktionen hervorrufen sollen. Dies geschieht meist in den ersten Kurven und in einem sicheren Geschwindigkeitsbereich nahe der Fahrzeuggrenze.

Paraphrasierung:

Eine der weit verbreiteten Strategien zur Detektion des Grenzbereichs und zur Identifizierung der Fahrzeugcharakteristik in der Fahrzeugerprobung ist das gezielte Aufbringen von Störgrößen in den verschiedensten Fahrsituationen und die Reproduktion der entstandenen Fahrzeugreaktion oder das gewollte Einbringen von Fahrfehlern in einem abgesicherten Bereich [Z9]. Auf der Rennstrecke werden Manöver wie das frühzeitige und starke Beschleunigen am Kurvenausgang zur Beurteilung der Übersteuertendenz, das Bremsen in der Einlenkphase oder in eine Entlastung hinein, um die Fahrzeugreaktion auf multiple Fahrereingaben bzw. einen Lastwechsel zu evaluieren, angewandt [Z9].

Eine der wichtigsten Strategien ist der Abgleich mit dem eigenen Erfahrungsschatz. Kann das Fahrzeug mit steigendem Bremsdruck weitere Verzögerung absetzen? Ist der Anstieg linear oder nichtlinear? Wie verhält sich das Fahrzeug bei Variation von Bremsdruck und Bremsdauer sowie unter Zugabe von Lenkwinkel oder sogar Gaspedal – Stichwort „auf Zug halten“? Führt mehr Lenkwinkel zu mehr Fahrzeugrotation? Kann eine erhöhte Kurvengeschwindigkeit immer noch umgesetzt werden? Das alles sind Fragen, die geübte Fahrer innerhalb der ersten Kurven und Runden beantworten, um anschließend ein umfassenderes Bild des Fahrzeugverhaltens in den wichtigsten und häufigsten Situationen zu erhalten [Z9-Z11].

Nach dem Erreichen und Erkennen des Grenzbereichs stellt sich häufig die Frage, wie lässt sich nun dieser Zustand und somit die Maximalperformance des Fahrzeugs halten? Das Manövrieren an der Kraftschlussgrenze zwischen Fahrbahn und Reifen stellt für viele eine Gradwanderung zwischen stabilem und kontrollierbar instabilem Zustand dar. Der Fahrer versucht das Fahrzeug durch ein ständiges Wechseln von Unter- zu Übersteuertendenz in einem nahezu neutralen Zustand am oberen Ende des Grenzbereichs zu halten [Z11].

Ideen/Strategien:

- Über Identifikationsfahrmanöver den Grenzbereich schneller identifizieren.
- Grenzbereicherkennung über Anomaliedetektion? NN hier prädestiniert?
- Trotz geringer Reibwerterwartung bereits härter bremsen und im besten Fall früher die Bremse lösen. Erfordert ein ABS, einen Planner der das kann und einen Controller, der bei einem so hohen Regelfehler stabil bleibt.

Längsdynamik:

*„[...] natürlich erstmal das Feedback, was du in der Bremse spürst. [...]“ -
#006_03_004016*

Kernaussage:

Pedalfeedback im Zusammenspiel mit visuellem radindividuellen Sensorfeedback erleichtert das Finden des Grenzbereichs am Kurveneingang und -ausgang.

Paraphrasierung:

In der Bremsphase wird der Grenzbereich meist haptisch ertastet und durch das visuelle Feedback validiert. Dies geschieht einerseits durch das im Motorsport deutlich härtere und damit direktere Pedalfeedback, welches dem Fahrer erlaubt, sämtliche Reaktionen der Vorderachse während des Bremsvorgangs zu spüren [Z13-Z14]. Gemeint sind hierbei Änderungen im Pedalgedrückt und dem Pedalweg oder das Verziehen des Fahrzeugs in eine ungewollte Richtung. Weiters testen Fahrer durch das Verhältnis von Bremsdruckzugabe zu Verzögerungsstärke die Funktionsfähigkeit der Bremse und stärken somit ihr Vertrauen in das Fahrzeug [Z14].

Fahrzeuge mit ABS (Anti-Blockier-System) sind im Motorsport zusätzlich mit sogenannten „Locking Lights“ ausgestattet, die den Vorderachsschlupf für jedes Rad in den Stufen drei, sechs und neun Prozent farblich (Weiß, Gelb, Violett) und somit visuell am Dashboard darstellen. Dies ermöglicht es dem Fahrer, den optimalen Bremsdruck zu erkennen und das maximale Fahrzeugpotential auszunutzen [Z13].

Am Kurvenausgang wird der Grenzbereich stark über die Gierrate wahrgenommen. Zusätzlich helfen sogenannte „TC Activity Lights“ (Traction Control Activity Lights) in den Farben Weiß, Gelb und Rot durch das Aufzeigen der aktiven Traktionsregelung mit visuellem Feedback. Somit kann schnell und eindeutig festgestellt werden, ob noch weiteres mechanisches Potential verfügbar wäre (Weiß), oder die Hinterachse bereits an ihrem Limit ist (Rot) [Z13].

Ideen/Strategien:

- Locking Lights
- Traction Control Activity Lights
- In der TC auch die Gierreaktion des Fahrzeugs beobachten. Schlupf Target ist bei reinem Längsbeschleunigen höher, unter Querdynamik geringer.
- Live Beobachtung des Verstärkungsfaktors zwischen Bremsdruck und Bremsmoment.

Optisch/topologisch:

*„[...] Ganz wichtig, Spuren auf der Fahrbahn, wenn dieser Curb links von der Bremszone rechts wo immer unbenutzt ausschaut, dann wird da keiner drüberfahren, dann wird das keine gute Strategie sein. [...]“ -
#007_05_009021*

Kernaussage:

On-Board-Videos, Track-Walks und das Lesen der Spuren auf der Fahrbahnoberfläche (Gummiabrieb, Curbs, Bodenwellen) geben den Fahrern erste Hinweise auf Brems-, Einlenk- und Scheitelpunkte sowie auf potenzielle Gefahrenzonen durch Fahrbahnunebenheiten.

Paraphrasierung:

Als wichtigste Vorbereitung auf einen Tag an der Rennstrecke gilt der sogenannte Track-Walk. Fahrer versuchen sich, durch das Entlanggehen an der Strecke, die Fahrbahntopologie einzuprägen und schauen insbesondere auf mögliche Bodenwellen in der Bremszone und am Kurveneingang, die Instabilitäten hervorrufen könnten. Weiters wird versucht das Grip Niveau einzuschätzen und durch Gummibeläge auf Streckenbegrenzungen Bremspunkte und Ideallinien zu identifizieren. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dem Track-Walk ist das Erkennen von Abrinnmöglichkeiten von Wasser sowie von Stellen, die stehendes Wasser bei Regen bilden können [Z17, Z19].

Aufgrund dieser ersten Abschätzung können Fahrer Instabilitäten später leichter zuordnen und sind auf unvorhergesehene oder spontane Ausreißer vorbereitet. Sie treffen dann bereits vor dem eigentlichen Auftreten der Fahrzeugreaktion, durch beispielsweise eine Bodenwelle eine Gegenmaßnahme, und fahren Kurven aufgrund der Fahrbahntopologie auch unterschiedlich an [Z17-Z18]. Zusätzlich signalisiert das visuelle Feedback Abweichungen von der gewünschten Fahrzeugtrajektorie und gibt dem Fahrer so weitere Anhaltspunkte für die Detektion des Grenzbereichs [Z15, Z18].

Weiters dienen aufgearbeitete On-Board-Videos, die Referenzpunkte für Brems- und Einlenkpunkte sowie Informationen zum Kurvenstil und den nutzbaren Streckenbegrenzungen liefern, als grundlegende Vorbereitung für das Finden des Grenzbereichs auf der Strecke [Z16, Z19].

Ideen/Strategien:

- Fahrbahntopologie durch Lidar-Scan und Federwegssensoren in einer Trainingsrunde aufnehmen.
- Die Fahrbahn mittels Kamera auf Gummiabrieb/-belag abscannen, um Brems- und Einlenkpunkte sowie die Ideallinie zu finden.

OS/US Detektion:

„[...] also man muss es wirklich initial erkennen und die Gegenmaßnahme einleiten und umso früher man das spürt, umso weniger muss man auch handeln.“ - #002_02_013029

Kernaussage:

Untersteuer- und Übersteuererkennung spielen bei der Grenzbereich-Detektion die größte Rolle. Im Motorsport wird die Fahrzeugbalance durch USOS-Kanäle in mehreren Bereichen beurteilt, da so das Fahrerempfinden am besten nachempfunden werden kann.

Untersteuern erkennen die Fahrer meist rein durch das Einbrechen des Lenkmoments am Lenkrad. Zusätzlich kann über die Ist-Gierrate ein Kurvenradius ermittelt werden, der dann mit dem gestellten Lenkwinkel verglichen wird. Übersteuern wird rein über die Überrotation und die Zunahme der Gierbeschleunigung wahrgenommen. Es ist essenziell, diese Tendenzen so früh wie möglich zu erkennen und zu bekämpfen, um ein Fahren im Grenzbereich zu ermöglichen.

Paraphrasierung:

Das Maximum der Vorderachse wird grundsätzlich über das Lenkradfeedback und das der Hinterachse über die Gierrate bestimmt [Z22]. Tritt Untersteuern auf, so wird die Lenkung leichtgängiger, das Lenkmoment nimmt abrupt ab und das Fahrzeug folgt bei erhöhter Lenkwinkeleingabe nicht mehr dem Fahrerwunsch. Über die gemessene Gierreaktion kann die Abweichung zum gewünschten Lenkwinkel ermittelt werden. Der gefahrene Kurvenradius stimmt nicht mehr mit dem geforderten Radius überein [Z20, Z22-Z23, Z25, Z27, Z31, Z34, Z36]. In diesem Fall kann, sofern dies das Streckenlayout zulässt, durch ein Auflenken die Seitenkraftanforderung an den Reifen reduziert und somit das Untersteuern gedämpft werden [Z23].

Das Ablösen der Hinterachse wird durch einen Anstieg der Gierfreudigkeit und die überproportionale Rotation des Fahrzeugs auf den Fahrerwunsch am Lenkrad oder dem Gaspedal bemerkbar [Z25, Z27, Z31]. Gierbeschleunigung im Zusammenhang mit den Radschlüpfen kann Aufschluss über eine mögliche Übersteuertendenz geben [Z30]. Durch eine entgegengesetzte Lenkbewegung oder ein leichtes Aufmachen der Lenkung kann diese Fahrzeugreaktion abgefangen und korrigiert werden [Z20, Z23]. Im Notfall wird über ein Wegnehmen des Motormoments oder einen Bremseneingriff das Fahrzeug stabilisiert [Z23, Z26, Z28].

Im Motorsport wird die Fahrzeugbalance mittels USOS-Kanal (Untersteuer-, Übersteuer-Kanal – engl. Understeer-Oversteer) in Niedrig-, Mittel- und Hochgeschwindigkeitsbereichen für die drei Phasen Kurveneingang, Kurvenmitte und Kurvenausgang bewertet. Diese statistische Auswertung ermöglicht ein Einordnen des subjektiven Empfindens des Fahrers sowie ein Zuordnen von Setupanpassungen zur Fahrzeugreaktion [Z21].

Ideen/Strategien:

- Delta-Steer-Angle, Schwelle 0,5 Grad pro Sekunde – Funktion, die den theoretisch gewünschten Lenkradius mit der tatsächlichen Rotation des Fahrzeugs vergleicht.
- Untersteuer- und Übersteuererkennung in Lenkmodellen
- Detektion von OS durch Gierbeschleunigungspeaks, TC/ABS Schlupftarget runter setzen, wenn Gierbeschleunigungspeaks vorhanden sind.
- Rückstellmoment VA zeigt Gripmaximum an.
- OS Detektion durch Überrotation

- Detektion von US durch Lenkungsrückstellmoment

Querdynamik:

„[...] du lenkst einen gewissen Lenkwinkel und spürst dann eben auch über die Lenkkräfte, was eben das Maximum der Vorderachse ist [...] - #003_02_012017

Kernaussage:

Die Vorderachse kann über die Lenkung sehr sensibel wahrgenommen werden, sofern die Lenkungsrückmeldung möglichst direkt und ungefiltert am Lenkrad ankommt.

Paraphrasierung:

Querdynamisch kann der Grenzbereich durch die absetzbaren Seitenführungskräfte und die Querbeschleunigungen ermittelt werden [Z38]. Geübte Fahrer spüren deutlich den Anstieg des Seitenkraftpotentials beim Erreichen und Überfahren von griffigerem Bodenbelag durch geringere Instabilitäten im Fahrzeug und die Möglichkeit mehr Lenkwinkel aufbringen zu können oder die Kurvengeschwindigkeit zu erhöhen [Z39, Z41, Z92]. Das Ende des Grenzbereichs wird hierbei durch den erneuten Abfall der Querbeschleunigung bei steigenden Forderungen seitens des Fahrers an das Fahrzeug ermittelt [Z39].

Die Lenkkräfte und das Feedback am Lenkrad sind maßgebliche Indikatoren, um den Zustand und das fahrdynamische Potential der Vorderachse festzustellen [Z38, Z40].

Ideen/Strategien:

-

Vertikaldynamik:

„[...] wie wankt das Auto, wankt es auf der Vorderachse, wankt es auf der Hinterachse, wie ist die Rollachse [...]“ - #004_05_026031

Kernaussage:

Reifenaufstandskräfte bestimmen maßgeblich die absetzbaren Längs- und Seitenführungskräfte des Reifens. Durch das Einbeziehen von Wankbewegungen und den aktuellen Federwegen kann der fahrdynamische Grenzbereich genauer abgebildet werden.

Paraphrasierung:

Vertikaldynamik ist vor allem bei Straßenfahrzeugen ein sehr wichtiger Aspekt, da die Aufbaubewegung des Fahrzeugs dazu führen kann, dass ungeübte Fahrer schon vorzeitig Gegenmaßnahmen einleiten, die grundsätzlich nicht notwendig wären, um einen stabilen Fahrzustand zu halten [Z42]. Meist wankt das Fahrzeug zwar sehr stark, setzt sich dann aber wieder und zeigt somit zwar deutlich mehr Bewegung, aber nicht zwangsläufig mehr Unter- oder Übersteuern [Z42, Z44]. Darum ist es für einige Fahrer sinnvoll, die Beschleunigung der Hochachse und die vier Radhübe mittels Sensorik abzubilden, da die Reifenaufstandskraft enormen Einfluss auf die Größe des Kamm'schen Kreises und somit das Reifenpotential hat [Z43, Z45]. Weiters kann mit Hilfe der Radhübe die Fahrbahntopologie berechnet werden, die als ein zusätzlicher Parameter zur Ermittlung der Ideallinie dienen kann [Z43].

Ideen/Strategien:

- Fahrbahntopologie abbilden
- Radmomente/Bremsdrücke je nach Reifenaufstandskraft verteilen.

Erreichen des Grenzbereichs

Exploration:

„[...] Learning by Doing“. - #003_06_075075

*„[...] du musst in der Lage sein, das Auto in jede Situation zu bringen, aber
auch ganz easy aus jeder Situation wieder rausholen zu können.“ -
#008_04_086087*

Kernaussagen:

Die Exploration des fahrdynamischen Grenzbereichs kann mit einer Anomaliedetektion verglichen werden. Im Grenzbereich zeigt das Fahrzeug atypische Verhaltensweisen als Reaktion auf Fahrerinputs, die man so aus dem stabilen Bereich nicht gewohnt ist. Durch das gezielte Einbringen von Fahrereingaben erforschen Rennfahrer die Fahrzeugcharakteristik und können auf Basis ihres Erfahrungsschatzes den Grenzbereich hochgenau abschätzen. Eine Ankündigungsphase des Grenzbereichs wird allerdings allgemein nicht wahrgenommen.

Paraphrasierung:

In erster Linie beinhaltet die Exploration des Grenzbereichs einen Abgleich des gewohnten stabilen Fahrzeugverhaltens mit dem Ist-Zustand [Z59]. Im weiteren Verlauf der Exploration werden vom Fahrer immer stärkere Eingaben getätigt, um die Fahrzeugcharakteristik in den einzelnen Manövern deutlich zu erkennen. Meist dient als Ausgangssituation ein Geschwindigkeitsbereich mit subjektiven zehn Prozent Reserve zum vermuteten Maximum [Z47-Z48, Z50]. Werden alle Fahrbefehle ordnungsgemäß umgesetzt und es tritt weder Unter- noch Übersteuern ein, ist das Limit noch nicht erreicht [Z47-Z48, Z50, Z56, Z59]. Der Bremspunkt wird dementsprechend nach hinten verschoben und die Kurvengeschwindigkeit wird minimal erhöht [Z56, Z59]. Weiters wird durch Lastwechsel in der Einlenk- und Rollphase die Stabilität und die Reaktion des Fahrzeugs bewertet. Hierbei tritt oftmals eine Gierverstärkung oder eine Gierdämpfung auf, die wiederum die möglichen Fahrstile und die Linienwahl beeinflusst [Z58]. Der Input muss nicht zwangsläufig durch den Fahrer geschehen, auch Streckenbegrenzungen wie Curbs und die Fahrbahntopologie (Bodenwellen) werden oft zur Exploration der Fahrzeugcharakteristik genutzt [Z58]. Die initiale Exploration des Fahrzeugverhaltens geschieht hierbei innerhalb der ersten zwei Runden, wobei die Explorationsschrittweite degressiv zunimmt [Z57, Z59].

Ankündigungsphasen des Grenzbereichs werden von den Fahrern meist nicht wahrgenommen [Z54]. Beschrieben wird der Grenzbereich meist als ein Wechseln von Untersteuer- zu Übersteuertendenz, die einerseits durch den Einbruch des Lenkmoments und andererseits durch eine Überhöhung der Gierrate festgestellt werden [Z49]. Wird der Grenzbereich überschritten, reagiert das Fahrzeug meist schlagartig und äußerst sensibel auf Fahrereingaben [Z60].

Ideen/Strategien:

- Abschätzung, ab wann muss Controller eingreifen?

- Engere Rennlinie wählen als erforderlich. Räumlicher Puffer zur Streckenbegrenzung, aber dennoch ist ein Abgleich der Beschleunigungslimits möglich. Im Notfall, wenn man von zu viel Grip ausgegangen ist, kann man seinen Plan nochmal adjustieren und den Pufferplatz ausnutzen. (Feedback zwischen Controller und Planner, um auf hohe Querabweichungen zu reagieren)
- Wie erkennen wir, wann wir das Auto tatsächlich überfahren haben?
- Explorationsschrittweite nicht größer als 5%
- Exploration über Feedback der Low Level Controller

Fahrtechnik:

„Der Blick steuert.“ - #010_07_018018

„[...] Habe ich noch Strategien, das Auto zu drehen, indem ich zum Beispiel einen Curb zu Hilfe nehme? Indem ich kurveninnen den Curb anfare, der vielleicht dem Auto diese gewisse Instabilität gibt, die mir gerade in dem Moment hilft.“ - #007_06_031037

Kernaussage:

Brauchbare Streckenbegrenzungen, wie Kurveneingangs-, Scheitelpunkt- und Kurvenausgangscurbs, werden gezielt angefahren, um die Fahrzeugreaktion zu bewerten und mögliche Streckenerweiterungen in die Ideallinie einzubinden.

Die Blickführung leitet alle Fahrer durch jegliche Fahrsituationen und bestimmt maßgeblich zusammen mit dem Popometer (Gierreaktion) die Fahrerinputs aller Art. Der Blick ist gekoppelt mit der Lenkung und den Fahrpedalen.

Paraphrasierung:

Beim Erreichen des Grenzbereichs kommen verschiedene Techniken und Hilfsmittel zum Einsatz. Die Fahrer versuchen in den ersten Runden durch Testen von Bremspunkten und Heranfahren an Streckenbegrenzungen herauszufinden, welche Curbs das Fahrzeug destabilisieren und welche ohne weiteres als Streckenerweiterung oder zusätzliche Rotationsmöglichkeit genutzt werden können [Z69, Z73-Z74].

Als schwierigstes Element der Kurvenfahrt wird die optimale Scheitelgeschwindigkeit beschrieben [Z70]. Hierbei ist der richtige Bremspunkt in Kombination mit der Bremsdruckwegnahme und der Lenkwinkelzugabe entscheidend. Das Ziel ist ein Bremsdruck knapp vor dem ABS-Regeleingriff an der Vorderachse und ein Erreichen der maximal absetzbaren Querbeschleunigung ohne ein Untersteuern der Vorderachse [Z72]. Beim Variieren der Scheitelgeschwindigkeit wird versucht, die Kurveneingangslinie sowie die Scheitellinie nicht zu verändern, lediglich der Ausgang wird der erhöhten Dynamik angepasst [Z71].

Die Blickführung bildet für alle Fahrer die Grundlage und ist entscheidend für die gesamte Fahrer-Fahrzeug-Performance. Die Aussage „Wo ich hinschaue, fahre ich auch hin.“ wird vor

allen von Instruktoren häufig genutzt, da sämtliche Fahrerinputs mit dem visuellen Eindruck gekoppelt sind [Z75-Z77].

Ideen/Strategien:

- Variation des Geschwindigkeitsprofils mit adaptiver Linie am Kurvenausgang.
- Race Line Prediction – Wo befindet sich mein Fahrzeug unter den aktuellen Bedingungen mit den aktuellen Beschleunigungswerten und Drehraten am Kurvenausgang beziehungsweise auf den nächsten 5-10 Metern?

Fahrzeugunterschiede:

„[...] im Grenzbereich hat natürlich jedes Auto so ein Stück weit seinen eigenen Charakter. [...] Also ein Hecktriebler ist sicherlich immer irgendwo einem anderen Hecktriebler ähnlich. Ein Fronttriebler ist auch eher einem anderen Fronttriebler ähnlich und so weiter. Aber es gibt auch Fronttriebler, die unglaublich Heck-agil sind und es gibt Hecktriebler, die sind unglaublich untersteuernd.“ - #006_02_083101

Kernaussage:

Im Grenzbereich hat jedes Fahrzeug seinen eigenen Charakter. Fahrzeuge reagieren aufgrund von Antriebstopologie, Setup und fahrzeugindividuellen Eigenschaften unterschiedlich auf Fahrerinputs, Lastwechsel und Fahrbahnbedingungen. Aufgrund dessen wenden Rennfahrer unterschiedliche Fahrtechniken und Kurvenstile an und fahren fahrzeugspezifische Rennlinien.

Paraphrasierung:

Das Fahrzeugverhalten im Grenzbereich hängt grundsätzlich stark von der Antriebstopologie (Heckantrieb, Frontantrieb, Allrad) und den Fahrzeugeigenschaften, wie Fahrzeuggewicht, Wankstabilität oder Lastwechselempfindlichkeit ab [Z82-Z84, Z87]. Geübte Fahrer versuchen durch verschiedene, meist bereits automatisierte Manöver die Fahrzeugcharakteristik zu beurteilen und wählen dementsprechend Fahrstil und Rennlinie aus [Z83, Z86]. Hierbei ist zu beachten, dass die jeweiligen Antriebstopologien sich ähneln können, tun dies aber nicht zwangsläufig [Z83]. Mit leistungsstarken Fahrzeugen wird tendenziell eine eckigere Linie gewählt, anbremsen, kurz drehen und wieder beschleunigen, um möglichst viel Traktion absetzen zu können – Stichwort: Trailbreaking [Z85-Z86, Z88-Z89]. Leistungsschwache Autos werden tendenziell runder gefahren, um den Schwung von Kurve zu Kurve mitzunehmen – längere Rollphasen [Z85, Z88].

Die Fahrzeugcharakteristik wird durch das Verhalten in der Brems- und Einlenkphase (stabiles/unruhiges Anbremsen, Möglichkeit des Lenkens während der Verzögerung – Trailbreaking), die Lastwechselempfindlichkeit in der Rollphase sowie die Traktionsstärke am Kurvenausgang bestimmt [Z87, Z89].

Ideen/Strategien:

-

Finden der Ideallinie:

*„[...] weil auch jedes Auto eine andere Linie braucht [...]“ -
#007_07_035035*

Kernaussage:

Jedes Fahrzeug benötigt aufgrund der spezifischen Fahrzeugcharakteristik eine eigene Rennlinie. Durch Trackwalks und On-Board Videos werden Referenzpunkte für Brems-, Einlenk- und Scheitelpunkte identifiziert und als erste Anhaltspunkte für die eigene Rennlinie verwendet. Durch die gezielte Variation von Kurvenstilen und der Positionierung am Kurveneingang sowie das Nutzen von Streckenbegrenzungen wird die Linie schrittweise optimiert. Meist dienen Predictive-Laptime-Modelle als direkte Validierung im Fahrzeug.

Paraphrasierung:

Grundsätzlich gilt der kürzeste Weg um einen Rundkurs als Ideallinie [Z97]. Im Feinstbereich variiert diese Linie aber sehr stark in Abhängigkeit der Fahrzeugcharakteristik [Z87]. Fahrer versuchen die Stärken ihres Fahrzeugs möglichst gut auszunutzen und suchen hierbei einen Kompromiss aus fahrzeugindividuellem Fahrstil und der theoretischen Ideallinie [Z91, Z93, Z112, Z116].

Die Ideallinie wird meist optisch durch den Fahrer anhand von Farbunterschieden durch Gummiabrieb auf der Fahrbahnoberfläche erkannt und wird durch Onboard-Videos oder Trackwalks zusätzlich im Vorhinein aufgearbeitet. Hierbei wird der Unterschied in der Linienwahl der verschiedenen Fahrzeugklassen (Serie, GT-Sport, Formelsport oder Prototypen) deutlich [Z107, Z116].

Mit dieser Herangehensweise ist die Ideallinie zu 90 Prozent gefunden. Durch explizite Zielsetzung der Variation des Scheitel- bzw. Einlenkpunkts oder des Kurvenstils versuchen Rennfahrer unter Ausnutzung der gesamten Fahrbahnbreite und durch Zuhilfenahme von Streckenbegrenzungen wie Curbs, die für das Fahrzeug im Scheitelpunkt eine Zusatzrotation bewirken können, eine fahrzeugindividuelle Ideallinie zu finden [Z94-Z95, Z97, Z100]. Auf der Suche nach den optimalen Kurvenlinien weichen die Fahrer in der Positionierung am Kurveneingang in einem Bereich von 0,5 Metern von der theoretischen Ideallinie ab. Einlenk- und Scheitelpunkte verschieben sich je nach Variante zwei bis fünf Meter [Z96, Z98-Z99, Z104-Z106]. Den Fahrern ist hierbei immer die Geschwindigkeit am Kurvenausgang oder am Ende einer Kurvenkombination in Hinblick auf die Reduktion der Rundenzeit am wichtigsten [Z93, Z100-Z101, Z103, Z111, Z115, Z117, Z119].

Anpassungen an der Linie werden meist durch den Einsatz von „Predictive-Laptime-Modellen“, zu Deutsch „Modell zur Rundenzeitvorhersage“, direkt während der Fahrt vom Fahrer selbstständig validiert [Z99, Z110, Z113].

Ideen/Strategien:

- Predictive Laptime - Rundenzeit-Tracker, Ghost-Mode mit bester Runde, fährt mit während Linie variiert wird.
- Rennlinie vs. Exitspeed
- Ist der berechnete Scheitelpunkt der Richtige für das aktuelle Fahrzeug? – Fahrzeugcharakteristik
- Fahrzeugverhalten bestimmt Rennlinie --> Online-Rennlinienplaner berücksichtigt Grip-Map
- Gezieltes Variieren im Online Planning, um größeren Bereich zu explorieren.
- Je nach Situation in der Bremszone den Scheitelpunkt verschieben.

Grenzbereichdefinition:

„Wenn ich nicht im Grenzbereich unterwegs bin, fahre ich auf gut Deutsch spazieren.“ - #005_02_073074

„Meine eigene Definition ist quasi, dass das Fahrzeug nicht mehr das macht, was es soll, dass Befehle, die eine Reaktion am Fahrzeug hervorrufen, also eine Eingabe vom Lenkwinkel oder vom Fahrpedal, keine gewohnte Reaktion im Fahrzeug zurückgeben.“ - #004_01_005008

Kernaussage:

Der Grenzbereich wird immer in einen Fahrer- und einen Fahrzeuggrenzbereich eingeteilt. Im Grenzbereich reagiert das Fahrzeug sensibler auf jeglichen Input von außen, seitens des Fahrers oder der Fahrbahn und zeigt deutliche Abweichungen zum stabilen Fahrbetrieb.

Paraphrasierung:

Im Zuge der Grenzbereichdefinition ist nahezu ausschließlich von dem maximal möglichen Füllungsgrad des Kamm'schen Kreises die Rede. Es wird versucht in jeder Phase des Fahrbetriebs am Rand des Kamm'schen Kreises zu manövrieren. Von längsdynamisch in der Bremsphase zur Kombination aus längs- und querdynamisch in der Einlenkphase (Trailbreaking) über die reine querdynamische Belastung des Reifens in der Rollphase weiter zur Kombination von Lenkwinkeländerung und Gaspedalzugabe bis zur reinen Beschleunigung am Kurvenausgang [Z120, Z123, Z133-Z135]. Zusätzlich zu der zweidimensionalen Kreisbetrachtung muss die Vertikaldynamik in Form der Reifenaufstandskräfte berücksichtigt werden [Z131].

Der Grenzbereich ist hierbei der Bereich, indem sowohl Fahrzeug als auch Fahrer an ihre Belastungsgrenze gehen müssen – Stichwort: Fahrzeug-Fahrer-Grenzbereich [Z122, Z129, Z133]. Das Erforschen des Grenzbereichs ist auch niemals abgeschlossen und muss laufend erfolgen, da sich das Fahrzeug und die Streckenbedingungen ständig ändern [Z121].

Im Grenzbereich selbst, reagiert das Fahrzeug empfindlicher (Übersteuern) oder unempfindlicher (Untersteuern) auf die Fahrereingaben und zeigt eine deutliche Abweichung zur gewohnten Fahrzeugreaktion [Z124, Z128, Z130].

Ideen/Strategien:

- Lernalgorithmus, der die Fahrzeugcharakteristik analysiert und für kommende Situationen vorhersagen kann.

Fahren im Grenzbereich

Fahrstil:

„Wer später bremst, ist länger schnell.“ - #006_05_009009

„Es gibt so eine Regel, wenn du dich für das Gas entschieden hast, gibt es keinen Weg mehr zurück [...]“ - #006_05_142143

„Ja, es ist eigentlich ganz einfach.“ - #010_05_006006

Kernaussage:

Der Fahrstil unterscheidet sich maßgeblich zwischen den Fahrern. In der Bremsphase wird Trailbreaking bis zum Scheitelpunkt als die effizienteste Methodik beschrieben. Das Verschieben der Bremspunkte geschieht abhängig von dem Rennszenario stufenweise und geht mit einem Suchen nach dem Grip durch eine Linienvariation in der Bremszone einher.

Im Scheitelpunkt wird versucht, einen lastlosen Zustand zu vermeiden und durch gezielte Lenkwinkleingaben sowie das „Kreuzen“ von Brems- mit Gaspedal die Spannung im Fahrzeug zu halten. Weiters werden verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung einer zusätzlichen Fahrzeugrotation angewandt, um nahe am Limit zu operieren.

Am Kurvenausgang ist der Blickwinkel äußerst entscheidend und bestimmt den Auslenkpunkt sowie den Beginn der Beschleunigungsphase. Die Lenkung wird proportional zur Gaspedalzugabe aufgemacht und es wird abhängig vom nachfolgenden Streckenverlauf die Fahrzeugpositionierung berücksichtigt.

Paraphrasierung:

Durch Initialschätzungen basierend auf Erfahrungswerten und visuellen Eindrücken der Fahrbahn erreichen Rennfahrer oft auf Anhieb den nahezu perfekten Bremspunkt, um am Scheitelpunkt die maximale Querbeschleunigung abzurufen. Ermöglicht wird dies meist durch visuelle Ankerpunkte, die den Bremspunkt markieren und dem Fahrer erlauben, reproduzierbare Linien zu fahren [Z166]. Diese Technik findet vor allem Anwendung in Bremsphasen mit einem hohen Geschwindigkeitsdelta von Maximal- zu Kurvengeschwindigkeit [Z155]. Optische Markierungen können Schilder, Leitplanken-, Tribünenende, Farbunterschiede auf der Fahrbanoberfläche, Curbs oder andere markante, einprägsame Punkte sein. Bei kurzen Bremsungen ist eine weit verbreitete Methode das intuitive Abschätzen des letztmöglichen Bremspunkts anhand der subjektiven Einschätzung der Verzögerungsfähigkeit des Fahrzeugs [Z143, Z149, Z155]. Fahrer nutzen im Rennbetrieb beide Varianten und kombinieren diese auch beliebig je nach Situation und Möglichkeit [Z155].

Beim Herantasten an den optimalen Bremspunkt und die Scheitelgeschwindigkeit gibt es grundsätzlich zwei Vorgehensweisen [Z139]. Die konservative und sicherheitsorientierte Variante, in der man zuerst einen frühen Bremspunkt wählt und mit maximaler Verzögerung auf die gewünschte Kurvengeschwindigkeit herunterbremst, dann in die Kurve hineinrollt und beurteilt, ob das Querbeschleunigungsmaximum erreicht wurde und anschließend Anpassungen an Bremspunkt und Kurvengeschwindigkeit für die nächste Runde vornimmt

[Z137, Z140, Z149]. Die risikoreichere, aber zeiteffizientere Variante ist das Annähern an den Bremspunkt vom oberen Limit [Z153-Z154, Z160, Z168]. Man versucht keinesfalls zu früh zu bremsen, da dies am meisten Rundenzeit kostet, und riskiert somit, dass der Scheitelpunkt verfehlt wird und man die Ideallinie in der Kurvenmitte opfern muss. Wichtig ist, dass die Bremsphase in beiden Fällen und nach jeder Bremspunktanpassung ident durchgeführt wird und die Bremsphase grundsätzlich bis zum Scheitelpunkt gehen soll [Z145, Z156]. Handelt es sich um ein Fahrzeug mit starker Aerodynamik und hohem Abtrieb, so kann der Bremsdruck am Anfang der Bremsphase um ein Vielfaches höher sein als der Maximalbremsdruck am Ende der Bremsphase, da die dynamischen Radaufstandskräfte mit sinkender Geschwindigkeit nichtlinear abnehmen [157].

In der Kurvenmitte wird durch Vorspannen des Fahrzeugs am Kurveneingang und Trailbreaking versucht, Zustände ohne Last zu vermeiden, die Instabilitäten durch Gewichtsverlagerung hervorrufen können [Z138]. Fahrer beschreiben unter anderem, dass sie die Bremse noch nicht vollständig gelöst haben, aber bereits am Gas sind oder frühzeitig anfangen einzulenken, um sich und dem Fahrzeug mehr Zeit zu geben, die Situation zu verarbeiten [Z141-Z142, Z229]. Klassische Rollphasen mit nahezu konstanter Geschwindigkeit kommen nur bei langgezogenen Kurven zum Einsatz [Z151].

Zu den grundlegenden Fahrstilen in der Kurvenmitte gehören der einfache Scheitelpunkt, auch V-Stil, bei dem man versucht möglichst spät und spitz in die Kurve hineinzubremsen, das Fahrzeug schnell dreht und wieder hinausbeschleunigt, sowie der doppelte Scheitelpunkt, der einer konstanten Kreisfahrt ähnelt [Z146, Z161, Z164-Z165].

Sobald Gas gegeben wird, muss man die Lenkung aufmachen und sich nach außen tragen lassen können, ohne erneut vom Gas gehen zu müssen [Z159, Z167]. Der Verlauf der Gaspedalstellung muss monoton steigen, kurze Plateaus sind in Rollphasen, in denen sich eine konstante Kreisfahrt einstellt, nicht zu vermeiden [Z152, Z162]. Sobald dies nicht möglich ist, ist man zu früh am Gas und die Rollphase sollte in der nächsten Runde verlängert werden. Hat man sich für das Gas entschieden, so gibt es bei Rennfahrern kein Zurück mehr [Z152, Z168]. Man versucht dann durch andere Stellgrößen, wie Lenkwinkel und Linienwahl Korrekturen vorzunehmen und nimmt Abweichungen von der Ideallinie in Kauf, sofern dies der nachfolgende Streckenabschnitt ermöglicht [Z148, Z163].

Während der gesamten Fahrt ist die Blickführung für alle Fahrer entscheidend [Z167, Z169-Z171].

Ideen/Strategien:

- Das Fahrzeug muss selbstständig mit allen Parametern ein globales Optimum finden und dementsprechend Fahrstil, Linie und Manöver wählen. (Fuel- & Tiremanagement)
- Messen der Radaufstandskräfte und bestimmen des maximal möglichen Bremsdrucks oder Radmoments.
- Techniken, die sich nicht nur an der Trajektorienverfolgung orientieren, sondern auch an der Ausreizung des Kamm'schen Kreises. Könnte für den Controller in Zukunft ein Trade-off zwischen Trajektorienverfolgung und Beschleunigungsmaximierung bzw. Fahrzeugstabilisierung bedeuten?
- Im absoluten Grenzbereich braucht der Controller ein fahrdynamisches Verständnis.

Zusatzrotation Mid-Corner:

*„[...] dass du das Auto ein wenig mit dem Gas halt einfach lenkst [...]“ -
#001_05_048053*

*„Das Auto ist an der Vorderachse am Limit und ich mache das totale
Gegenteil, was ich eigentlich machen sollte, ich gehe ans Gas.“ -
#008_03_026028*

Kernaussage:

Durch Lastwechsel und die damit verbundene Gewichts- und somit Achslastverlagerung kann das Fahrzeug besonders in der Kurvenmitte ohne zusätzlichen Lenkwinkel einen weiteren Rotationsschub aufbauen, der ohne Performanceverlust das Fahrzeug agiler drehen lässt. Dies geschieht durch ein kurzes Tippen auf die Bremse, ein kurzes Wegnehmen des Gaspedals oder ähnlichen Manövern, die eine solche Fahrzeugreaktion auslösen können. Auch Streckenbegrenzungen können eine Zusatzrotation bewirken.

Paraphrasierung:

Wie stark und ob man eine Zusatzrotation durch einen Lastwechseln oder ein Überfahren bestimmter Streckenbegrenzungen in der Kurvenmitte einbauen kann, um die Drehwilligkeit zu verstärken, ist fahrzeugabhängig, bewirkt aber meist einen Performancegewinn und eine Verbesserung der Rundenzeit [Z74, Z176].

Ein Lastwechsel kann auf drei Arten zu einer Erhöhung der Fahrzeugrotation führen. Zum einen kann durch ein leichtes Tippen auf das Bremspedal oder ein „Lupfen“ des Gaspedals aufgrund der kurzzeitigen Gewichtsverlagerung nach vorne, bei gleichem Lenkwinkel eine stärkere Rotation des Fahrzeugs erreicht werden [Z173-Z176, Z181]. Die Drehwilligkeit am Bremspedal kann ebenfalls durch das Verstellen der Bremsbalance nach vorne verstärkt werden [Z174].

Eine weitere Möglichkeit ist das Lösen der Bremse und das damit verbundene Freigeben von Seitenführungspotential gemäß der Definition des Kamm'schen Kreises. Das Fahrzeug setzt somit in Längsrichtung kurzzeitig weniger ab, kann dafür in Querrichtung mehr Kraft aufbringen. Hierfür wird zusätzlich im Moment der Zusatzrotation das Gaspedal betätigt, um den Fahrzustand zu stabilisieren [Z180, Z182].

Die letzte Variante beschreibt das kurzzeitige Überfahren des Fahrzeugs und das Manövrieren über dem Reifenmaxima. Hier wird beispielsweise bei einem untersteuernden Fahrzeug zusätzlich ein starker Gasimpuls gegeben, der das Fahrzeug in ein Übersteuern bringt und somit eine zusätzliche Rotation ohne Geschwindigkeitseinbuße ermöglicht [Z172, Z177-Z179].

Ideen/Strategien:

- Der Controller muss verschiedene Fahrstile kennen und einschätzen können, ob dadurch Performance gewonnen werden kann.
- Rennlinie sollte Rotationsvermögen des Fahrzeugs berücksichtigen können.

- Ein Controller, der versteht, dass er über Achslastverlagerung und Längsmomente die Fahrzeugbalance verändern kann, wäre ein deutlicher Schritt nach vorne.

Maximieren des Fahrzeugpotentials

Fahrbarkeit:

*„[...] dadurch, dass unser Auto vom Gesamtkonstrukt so extrem steif ist,
wird da wenig weggefiltert. Und dadurch ist es viel effizienter zu spüren
[...]“ - #003_04_054093*

Kernaussage:

Das Vertrauen in ein Fahrzeug ist für Fahrer essenziell, da es ihnen in den anspruchsvollen Situationen die nötige Sicherheit gibt, um im Grenzbereich zu manövrieren. Wichtig hierbei sind neben der Lenkung der Sitz und das Pedalfeedback. Diese sollten die Fahrzeugreaktionen möglichst ungefiltert an den Fahrer weitergeben. Durch Anpassungen an Fahrzeugparametern, wie der Bremsbalance, vor jeder Kurve kann das Fahrzeugverhalten vor jeder Kurve individuell adaptiert werden.

Paraphrasierung:

Gelingt es dem Fahrer nicht an das Limit heranzufahren, weil es die äußeren Umstände oder das aktuelle Fahrzeugsetup aufgrund zu starker Instabilitäten und fehlendem Vertrauen in das Fahrzeug nicht zulassen, so werden in erster Linie Änderungen am Setup vorgenommen, sodass der Weg zum Grenzbereich für den Fahrer plausibel und verständlich erscheint [Z226, Z233].

Der Fahrer gewinnt Vertrauen in sein Fahrzeug, indem er möglichst viel und unmittelbares Feedback vom Fahrzeug erhält und die Fahrzeugreaktion mit seinen Erwartungen übereinstimmt [Z231]. Dies geschieht meist durch ein härteres Fahrwerk, geringere Brems- und Lenkkraftunterstützung und einen fest verschraubten, oft sogar an die Körperform angepassten Sitz [Z228, Z230, Z232].

Brake Bias und andere Fahrzeugeinstellungen können während der Fahrt geändert werden und beeinflussen die Fahrbarkeit und demzufolge die Größe des Fahrergrenzbereichs [Z226, Z229].

Ideen/Strategien:

- Notwendigkeit Linienvariation - "rundes Fahren" - Potential am Exit erreicht, kann Potential durch Anpassung der Linien am Eingang dennoch gehoben werden?
- Setupschleifen, um Fahrzeuggrenzbereich zu maximieren.
- Man müsste erkennen können, ob man bereits über die Aktoren alles tut, um das Maximum an Querbeschleunigung zu erzeugen und dies mit der Erwartung abgleichen.

Setup:

„[...] Intuition und Gefühl sind so die Dinge, die man braucht, um das Auto abzustimmen und halt genau zu merken, was stimmt jetzt hier im Grenzbereich nicht. [...]“ - #008_02_088092

Kernaussage:

Das Setup bildet die Basis und soll das Erreichen des Grenzbereiches plausibel, klar und eindeutig ermöglichen. Durch Setupschleifen mit Fahrerfeedback wird versucht, den Fahrer-Fahrzeug-Grenzbereich zu maximieren und dem Fahrer zu ermöglichen konstant an das Fahrzeuglimit zu gelangen.

Paraphrasierung:

Das Vertrauen in das Fahrzeug ist der wichtigste Punkt für einen Fahrer, der im Grenzbereich manövrieren will. Das Setup dient dazu das Fahrzeug dahingehend einzustellen, dass der Weg zum Grenzbereich für den Fahrer plausibel erscheint [Z239]. Das Setup ist somit fahrerspezifisch und unterliegt dessen Vorlieben und Gewohnheiten [Z234-Z235].

Solange die Möglichkeit besteht, wird versucht, Unstimmigkeiten zu beheben, sodass der Fahrer möglichst ungehindert seine Stärken und die des Fahrzeugs ausspielen kann [Z237-Z238]. Was am Setup geändert wird, bestimmt nahezu ausschließlich der Fahrer selbst. Es ist daher essenziell, die Fahrzeugrückmeldungen richtig einzuordnen und die richtigen Maßnahmen zu treffen [Z236]. Hierbei können auch die im Simulator gemachten Erfahrungen hinsichtlich der Fahrzeugreaktion auf entsprechende Setupänderungen hilfreich sein. Im Zuge der Trainingsläufe finden etliche Setup-, Test- und Feedbackschleifen statt [Z233, Z243-Z244].

Setupänderungen wie beispielsweise in der Bremsbalance und am Sperrdifferential werden auch während des Rennens vom Fahrer durchgeführt und können sogar vor jeder Kurve angepasst werden [Z240].

Ideen/Strategien:

- Über das Setup bereits möglichst viele Störgrößen beseitigen bzw. mindern/dämpfen.
- Setupänderungen wie Bremsbalance live verstellen?
- Fahrzeug muss selbstständig Setup anpassen/variiieren können, pro Kurve pro Streckenabschnitt

Testingstrategien:

„Always Close the Loop [...]“ - #003_11_182182

Paraphrasierung:

Um Verbesserungen des Fahrers oder eine schneller werdende Strecke (Track-Evolution) ausschließen zu können, werden meist sogenannte ABA-Tests durchgeführt. Man geht mit der Basis hinaus und fährt Referenzwerte ein (A), verbaut dann neue Teile, ändert das Setup oder wählt eine andere Linie bzw. einen anderen Fahrstil (B) und wechselt dann nochmal zurück zur Basis (A), um ein Gesamtbild der Änderung durch die gemachten Anpassungen zu bekommen [Z241-Z244, Z330].

Ideen/Strategien:

-

Messdatenaufbereitung

Datenanalyse:

„[...] unbedingt, ohne Daten bist du heute im Motorsportbereich nicht mehr lebensfähig.“ - #007_09_005006

Kernaussage:

Die Datenanalyse gehört heutzutage zu den wichtigsten Werkzeugen zur Performance-Optimierung. Vor allem während der Setupfindung wird durch die Absprache zwischen Fahrer und Renningenieur versucht, den Fahrer-Fahrzeug-Grenzbereich zu maximieren. Hierzu werden oft Marker-Buttons am Lenkrad verwendet, die einen Zeitstempel von einem relevanten Ereignis festhalten, dass beispielsweise vom gewünschten Fahrzeugverhalten abweicht.

Paraphrasierung:

Anhand der reinen Datenanalyse zu erkennen, ob das maximale fahrdynamische Potential vom Fahrer erreicht wurde, ist aufgrund der Annahmen und Vereinfachungen von Berechnungsmodellen nahezu unmöglich, da die Anzahl an unbekannten Parametern in der realen Welt nahezu unbegrenzt ist [Z246]. Die theoretischen Maximalwerte können daher von den tatsächlich umsetzbaren Zuständen abweichen [Z46]. Dennoch lassen sich Trends und Verbesserungspotential erkennen [Z245].

Die Aufgabe eines Renningenieurs wird als ein Suchen der subjektiven Eindrücke des Fahrers in den Daten und das Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen für Setup und Fahrstrategien geschildert [Z248]. Zur späteren Identifizierung von Fahrsituationen, die positiv oder negativ aufgefallen sind, gibt es im Fahrzeug einen Marker-Button, mit dem der Fahrer eine auffällige Fahrsituation in Form eines Zeitstempels markieren kann [Z249].

Die Datenanalyse beinhaltet sämtliche Fahrzeugdaten, die abgegriffen werden können, befasst sich aber hauptsächlich mit den folgenden fünf: Lenkwinkel, Bremsdruck, Gaspedalstellung, Geschwindigkeit und Rundenzeit [Z250, Z257-Z258, Z260].

Am Lenkwinkel sieht man recht eindeutig wie stark ein Fahrer mit dem Fahrzeug arbeiten muss und wie stabil das Fahrzeug am Kurveneingang und -ausgang zu manövrieren ist. Weiters kann durch den Lenkwinkel die Übersteuertendenz anhand von kleinen Gegenbewegungen und raschen Lenkwinkelkorrekturen abgelesen werden. Die Untersteuertendenz kann durch die Kombination von Lenkwinkel, Gierrate und Geodaten oder einen langen konstanten Lenkwinkel mit verzögerter Fahrzeugreaktion erkannt werden [Z250, Z252-Z253].

Sieht man sich den Bremsverlauf an, sind der Bremsstil, die Bremsdauer und der Maximaldruck entscheidend. Der Übergang von der Bremse auf das Gas sollte direkt nacheinander oder sogar überlappend erfolgen – Stichwort „auf Zug halten, Trailbreaking“. Die Verzögerungs- und Beschleunigungsdiagramme sollten möglichst rund und stetig verlaufen und wenige bis keine Ecken und Sprünge aufweisen [Z258-Z259].

Die einzelnen Fahrzeugdaten korrelieren miteinander und es entstehen Abhängigkeiten und Koppelungen, die sich gegenseitig beeinflussen. Die Analyse und die damit verbundene

Auswertung der Signale erfordert tiefgründiges Wissen über die Fahrzeugcharakteristik und die Auswirkungen auf mögliche Anpassungen [Z251, Z255-Z256].

Datenanalyse gehört heutzutage zu den wichtigsten Werkzeugen in der Performance-Optimierung und ist im Motorsport nicht mehr wegzudenken [Z257]. Der Vergleich der Daten von mehreren Läufen oder auch verschiedenen Fahrern kann Aufschlüsse zu weiterem Fahrzeug- und Rundenzeitpotential liefern [Z255-Z256].

Ideen/Strategien:

- Marker Button – Notiert Zeitpunkt eines interessanten/ungewöhnlichen Ereignisses.
- Ideallinien durch Abgleich Onboard-Videos mit Live-Kamera und Machine Learning finden.
- Messdatenaufbereitung oft nur relativ. Möglicherweise schwierig einen generischen Erwartungswert zu entwickeln.

Zusatzsensorik:

Zusätzlich zu den bewerteten Sensordaten aus der letzten Frage des Interviewleitfadens (Abschlussaufgabe) sind für die Teilnehmer noch folgende Messwerte für das Erkunden des Grenzbereichs von Bedeutung:

- Gierbeschleunigung

Die Gierbeschleunigung spiegelt das subjektive Empfinden des Fahrers und die Aussagen des „Popometers“ für viele Fahrer am besten wider. Mit Hilfe der Ableitung der Gierrate kann die Fahrzeugreaktion bereits initial erkannt werden, was dem Regler erlaubt durch eine kleinere Stellgröße auf den Sollwert einzuregeln [Z263]. Über die Gierbeschleunigung kann des Weiteren die Dringlichkeit eines Regeleingriffs beurteilt werden, da diese das Erkennen von sogenanntem „Snap-Oversteer“ ermöglicht [Z269].

- Abtriebswerte und Aerobalance

Zeigt ein Fahrzeug erhebliche aerodynamische Performance und generiert dadurch merklich Abtrieb kann durch zusätzliche Sensorik ein umfassenderes Gesamtbild der Anpresskräfte und der Aerobalance erzielt werden, welches die absetzbaren Verzögerungs- und Beschleunigungswerte aufgrund der dynamischen Änderung der Radaufstandskräfte und somit des Kamm'schen Kreises beeinflusst. Die Aerobalance kann weiterhin das Fahrzeugverhalten und die Unter- bzw. Übersteuertendenz verschieben [Z266].

- Radantriebsmomente

Bei Allradfahrzeugen kann in Hinblick auf Kurvengeschwindigkeit und Fahrzeugstabilität die Kenntnis der Radantriebsmomente von Nutzen sein. Weiters kann je nach Antriebstopologie Torque-Vectoring zur Performance-Steigerung eingesetzt werden [Z267].

- Ride-Height und Federwegssensoren

Ride-Height und Federwegssensoren können zum einen für die Berechnung der Fahrbahntopologie und der Radaufstandskräfte genutzt werden [Z264]. Weiters dienen markante Ausschläge im Verlauf der Federwegssensoren im Motorsport als Nullreferenz, um verschiedene Varianten der gleichen Kurve eindeutig über-einanderlegen zu können [Z250].

Prädiktion des Fahrdynamikpotentials

Initialschätzung:

„[...] du machst zwei oder drei Lastwechsel und fährst quasi die ersten Kurven an und dann weißt du ungefähr, was du dir traust mit dem Material, das du hast.“ - #004_05_011012

Kernaussage:

Die Initialschätzung basiert in erster Linie auf dem Erfahrungsschatz und den aktuellen Umwelt- und Streckenbedingungen. Meist genügen professionellen Fahrern zwei bis drei Lastwechsel und die erste Kurve, um den Grenzbereich und die Fahrzeugcharakteristik zu finden und einzuschätzen. Auch das Fahren im Simulator kann nützlich sein, um sich den Streckenverlauf vorab einzuprägen und Referenzpunkte zu finden.

Paraphrasierung:

Die Initialschätzung basiert auf den bereits gesammelten Streckenerfahrungen und angewandten Techniken und Fahrstilen aus vergangenen Sessions oder Simulatorsitzungen [Z107, Z116]. Mithilfe dieser Referenzwerte aus der Vergangenheit finden geübte Fahrer innerhalb der ersten zwei bis drei Runden den Grenzbereich und können durch den visuellen Abgleich von Ist- zu Sollzustand im Einlenk- und Scheitelpunkt sowie der Fahrzeugposition am Kurvenausgang weiters Fahrdynamikpotential für die kommenden Runden feststellen [Z271].

Durch den enormen Erfahrungsschatz reichen den Fahrern meist zwei bis drei Lastwechsel in der ersten Kurve, um die Fahrzeugcharakteristik zu beurteilen und das Vertrauen in das Fahrzeug aufzubauen [Z272].

Ideen/Strategien:

- Machine Learning, um den Erfahrungsschatz zur Beurteilung und Prognose der Fahrzeugcharakteristik aufzubauen.
- Abspeichern von Streckeninformationen und „Lessons Learned“ aus vergangenen Runden.
- Long Time Learning über Erfahrungswerte

Optisch:

[...] Es ist so ein Glanzthema, auch oft überfahrene Stellen, die haben einen bestimmten Glanz [...]“ - #004_06_033042

Kernaussage:

Im Trockenen ist es meist schneller die Bereiche der Strecke zu befahren, die durch Gummiabrieb belegt sind und somit mehr Grip bieten. Optisch wird dies durch schwarze Spuren auf der Fahrbahn und den Streckenbegrenzungen erkannt. Weiters nehmen Rennfahrer visuell die Abweichung der eigenen Linie zur Ideallinie wahr und könne somit weiters Potential durch ein Ändern des Fahrstils erzielen.

Paraphrasierung:

Fahrdynamisches Potential kann optisch durch das Begutachten der Fahrbahnoberfläche und das Erkennen von Stellen mit Gummiabrieb, die im Trockenen meist deutlich mehr Potential bieten, erkannt werden. Fahrer sprechen hierbei über dunkle, schwarze Spuren auf der Fahrbahn und an Streckenbegrenzungen sowie über glänzende Stellen, die sie bewusst aufsuchen, um Rundenzeit und fahrdynamisches Potential zu gewinnen [Z19, Z273].

Eine weitere Möglichkeit, um rundenzeitoptimiert zu fahren, ist das Vergleichen der eigenen Rennlinie mit der theoretischen Ideallinie. Fahrer kennen die Ideallinie aus den Vorbereitungen und können somit selbstständig abschätzen, ob sie diese bereits Großteils befahren oder noch Verbesserungspotential herrscht. Da die Linie immer mit der Fahrzeugcharakteristik gekoppelt ist, muss ebenfalls abwogen werden, ob eine Anpassung überhaupt sinnvoll ist [Z274].

Ideen/Strategien:

- Streckentemperatur, Gummiabrieb auf Rennlinie, beobachten und mit in die Prädiktion mit einfließen lassen.

Potentialerkennung:

*„Weil irgendwas macht das Auto im Grenzbereich immer.“ -
#003_07_005005*

Kernaussage:

Fahrer erkennen an dem Fehlen von leichten Instabilitäten in der Kurvenfahrt, dass der Grenzbereich noch nicht erreicht ist. Sollten übermäßige Unter- oder Übersteuertendenzen auftreten, wird dies über den Erfahrungsschatz von vergleichbaren Fahrzeugen festgestellt und über das Setup korrigiert. Zur Validierung wird meist eine Sektorenmessung zwischen zwei GPS-Referenzpunkten verwendet. Datenanalyse und ein Zusammenschieben der besten Minisektoren können das Maximalpotential zu den gegebenen Bedingungen festlegen.

Paraphrasierung:

Grundsätzlich kann durch das Nichtauftreten von Instabilitäten oder minimalen Eigenbewegungen des Fahrzeugs während der einzelnen Phasen der Kurvenfahrt gesagt werden, dass der Grenzbereich noch nicht erreicht bzw. weiteres fahrdynamisches Potential aus-

des Grenzbereichs im autonomen Motorsport

geschöpft werden kann. Ein Fahrzeug zeigt im Grenzbereich immer eine ungewöhnliche, nicht erwartete Reaktion, so die allgemeine Meinung [Z275, Z277, Z282].

Basierend auf den Erfahrungswerten von vergleichbaren Fahrzeugen kann festgestellt werden, dass übermäßiges Unter- oder Übersteuern besteht und ein Zugewinn an Potential durch eine Setupänderung oder das sofortige Anpassen von Fahrzeugeinstellungen, wie der Bremsbalance, erzielt werden kann [Z277, Z281].

Eine beliebte Methodik zur Validierung von Setup oder Fahrstiländerungen ist die Zeitmessung zwischen zwei GPS-Checkpoints oder die Delta-Rundenzeit zur besten Runde bzw. die prognostizierte aktuelle Rundenzeit [Z276, Z283]. Manuell können der Zeitpunkt des Schaltvorgangs am Kurvenausgang oder die Motordrehzahl an einem fixen Punkt Rückschlüsse auf den Zeitgewinn bzw. -verlust, nach einer vorangegangenen Anpassung der Linie oder des Fahrstils, liefern [Z278-Z279].

Durch Datenanalyse und das Zusammenschieben der besten Minisektoren kann anhand der Fahrzeugdaten die optimale Kurvenstrategie durch die Analyse von Bremspunkt, -druck, -dauer, Einlenkpunkt, Scheitelgeschwindigkeit und Positionierung am Kurvenausgang ermittelt werden [Z280].

Ideen/Strategien:

- Abbilden eines globalen Optimierers der ähnlich wie ein realer Renningenieur alle Daten auswertet. Dieser kann laufend oder als Initial Guess in der nächsten Session eingespielt werden.

Reifen & Reibwert:

„[...] Wir bräuchten den Reibwert, der tatsächlich an den Stellen vorhanden ist und nicht den Reibwert, den wir in der Fahrsituation schätzen. [...] Es ist einfach brutal dynamisch.“ - #002_09_072095

„Wenn du Pickup hast, dann merkst du das ziemlich schnell. [...]“ - #004_11_028044

„[...] ein Slick-Reifen hat einen sehr kleinen Grenzbereich. Und wenn du da ein Auto überfährst, kommst du in einen unglaublich nichtlinearen und unvorhersehbaren Bereich rein. [...]“ - #006_11_014030

Kernaussage:

Der Reifen ist die wichtigste, aber auch dynamischste Komponente im Motorsport. Unterschiedliche Reifenarten, -mischungen und -hersteller können das Fahrzeugverhalten enorm verändern und beeinflussen die Lastwechselempfindlichkeit, die maximale Verzögerungsfähigkeit, das Fahrverhalten und die Fahrzeugcharakteristik.

Reifenverschleiß kann von professionellen Rennfahrern radindividuell über die zeitliche Änderung des Fahrzeugverhaltens ermittelt und durch Anpassungen am Fahrstil hinausgezögert werden.

Pickup wird optisch durch ein Abweichen von der Ideallinie erkannt und bedingt einen deutlichen Gripverlust am betroffenen Rad. Im Rennbetrieb kann durch hohe Querbeschleunigung und Schlupfanteile der Pickup abgeschliffen werden.

Paraphrasierung:

Das Thema Reifen und Reifenwahl ist eines der Wichtigsten, wenn es um Streckenperformance und Rundenzeit geht. Je nach Profilart, Dimension und Gummimischung kann ein Reifen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und beispielsweise stärker auf Lastwechsel oder tendenziell untersteuernder reagieren [Z290]. Weiters besteht eine enorm hohe Temperaturabhängigkeit in der Übertragungsfähigkeit von Reifenkräften. Darum gilt es möglichst schnell den Arbeitstemperaturbereich eines Reifens zu erreichen und zu halten, da ein Überschreiten zu erhöhtem Reifenverschleiß und einem Abbau des Reifenpotentials führt [Z300, Z306].

Im Motorsport kommt häufig ein profilloser Reifen, der sogenannte Slick, zum Einsatz, dessen Grenzbereich als sehr klein mit geringem, bis keinem Ankündigungsverhalten der Kraftschlussgrenze beschrieben wird. Wird der Grenzbereich überschritten, so gelangt man in einen äußerst nichtlinearen Bereich, der selbst für erfahrene Rennfahrer schwierig zu kontrollieren ist. Dennoch bietet der Slick aufgrund der maximal möglichen Aufstandsfläche die größtmögliche Haftung und somit die beste Performance auf trockener Fahrbahn [Z297].

Ein Anstieg des Reifendrucks und somit eine Erhöhung der Reifentemperatur wird von Fahrern meist als teigiges oder schwammiges Fahrgefühl mit einem gewissen Phasenverzug zur Lenkeingabe beschrieben. Meist wird ein solches Verhalten an der Abweichung von Lenkwinkelvorgabe zu Gierratenaufbau (Gierbeschleunigung) festgestellt. Anpassungen an der Linie, ein früheres und sanfteres Bremsen sowie eine geringere Kurvengeschwindigkeit können helfen die Reifentemperatur zu senken [Z296, Z298, Z300].

Den Reifenverschleiß können geübte Fahrer radindividuell beurteilen [Z300, Z303]. Sollte ein Fahrzeug plötzlich in einer Linkskurve am Kurveneingang eine deutliche Untersteuertendenz zeigen so kann dies ein Indiz für ein verschlissenes rechtes Vorderrad sein, links analog. An der Hinterachse wird der Reifenverschleiß meist am Kurvenausgang bewertet. Zeigt ein Fahrzeug am Ende einer Linkskurve eine deutliche Übersteuertendenz, kann ein verschlissenes rechtes Hinterrad die Ursache sein [Z292, Z296, Z299, Z367].

Es kann also allgemein gesagt werden, dass am Kurveneingang der Verschleiß des kurvenäußeren Vorderrades und am Kurvenausgang der des kurvenäußeren Hinterrades in Abhängigkeit des ursprünglichen Fahrzeugverhaltens mit neuen Reifen beurteilt werden kann [Z292, Z294, Z296, Z367]. Der Umgang mit Reifenverschleiß kann analog zur Strategie bei erhöhter Reifentemperatur betrachtet werden.

Reibwertschätzer werden von den Befragten als eines der schwierigsten Themen in der Fahrdynamikmodellierung bewertet, da der ermittelte Reibwert immer nur dann richtig ist, wenn die Kraftschlussgrenze erreicht ist. „[...] Wir bräuchten den Reibwert, der tatsächlich an den Stellen vorhanden ist und nicht den Reibwert, den wir in der Fahrsituation schätzen. [...]“-#002_09_072095. Reibwertschätzung kann zum Beispiel auf einer Schneefahrbahn den grundsätzlichen Anhaltspunkt für die Fahrdynamikregelung geben, exploriert werden müsse dann aber auf andere Weise [Z285].

Das Aufsammeln von Gummiabrieb, auch Pickup genannt, am eigenen Reifen wird im Motorsport oft durch Vibrationen im Fahrzeug, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, erkannt

des Grenzbereichs im autonomen Motorsport

und macht sich durch einen deutlichen Gripverlust beim Anbremsen und in der Kurvenfahrt bemerkbar [Z284, Z289, Z291, Z301, Z308]. Durch die hohen Reifentemperaturen nehmen vor allem Slicks gerne und viel Pickup auf. Dadurch wird die Auflagefläche des Reifens durch den zusätzlichen Gummi reduziert und die Oberflächentemperatur durch das Vermischen von heißem und kaltem Gummi beeinflusst. Während eines Rennens definiert sich die Ideallinie aufgrund des Reifenabriebs immer enger [Z289].

Initial wird Pickup optisch durch das Verlassen der Ideallinie vermutet [Z301-Z302]. Einseitigen Pickup merkt man meistens durch ein „Schwänzeln“ und ein Drehen des Fahrzeugs auf die nicht belegte, gut konditionierte Seite, vergleichbar mit einer μ -Split Bremsung [Z286, Z307]. Vorderachspickup kann durch eine Zunahme der Untersteuertendenz bestätigt werden und kann aufgrund der höheren Sturzeinstellungen meist nicht vollständig oder nur durch starke Lenkmanöver abgefahren werden [Z305-Z306, Z308]. An der Hinterachse führt Pickup zu Einbußen in der Beschleunigungsfähigkeit und einer erhöhten Übersteuertendenz. Hier kann Pickup durch ein Überfahren der Hinterachse mit hohen Schlupfanteilen abgeschliffen werden [Z295, Z304].

Ideen/Strategien:

- Laufendes Abwägen zwischen Fahren im Grenzbereich und bedingtes Limit durch Reifenverschleiß. Soll die Linie/ der Fahrstil geändert werden, um die Reifen zu schonen?
- Erkennung von Pickup, Dreck und Reifenabrieb kann helfen den Initial Guess für die Exploration besser zu setzen.

Regen und Nässe

Fahrstil Regen:

*„[...] Hektik hat bei diesen Bedingungen da einfach nichts zu suchen,
sondern wirklich das ruhige Herangehen, das Limit wirklich sauber
heranfahen. [...]“ - #006_11_050068*

Kernaussage:

Anfangs wird unter nassen Bedingungen mit einer Sicherheitsrunde das Reibwertpotential in Risikokurven eingeschätzt. Anschließend wird versucht, die Performance schnell anzuheben, um die Reifentemperatur möglichst hoch zu halten. Der Fahrstil wird einerseits als extremer, härter, aggressiver und andererseits als kontrollierter, vorausschauender und bedachter beschrieben. Fahrzeuge werden bewusst am Kurveneingang durch ruckartige Lenkmanöver in ein Untersteuern gedrückt, um ein Ausbrechen der Hinterachse im Scheitelpunkt zu unterbinden.

Paraphrasierung:

Gegenüber dem Trockenen nehmen sich Fahrer im Nassen anfangs fahrdynamisch 30-50 Prozent zurück [Z310-Z311]. Es wird grundsätzlich zuerst eine Sicherheitsrunde gefahren und evaluiert, was das Fahrzeug unter den aktuellen Bedingungen an Rückmeldungen liefert [Z317]. Das Hauptaugenmerk wird hierbei auf die Lenkungsrückmeldung und die Vorderachsstabilität gelegt [Z318]. Manche Fahrer versuchen die Vorderachse bewusst durch schnelle Lenkmanöver am Kurveneingang in ein Untersteuern zu drücken, um die Stabilität der Hinterachse zu gewährleisten und ein Übersteuern und Eindrehen des Fahrzeugs am Kurvenausgang zu verhindern [Z313-Z314].

Das Erreichen des Fahrzeuglimits geschieht, ähnlich zu trockenen Verhältnissen, in Stufen. Nach der Sicherheitsrunde folgt eine steile Lernkurve und die Fahrer nähern sich in großen Schritten dem Grenzbereich [Z311-Z312]. Die Art und Weise, die beim Erreichen des Grenzbereichs angewendet wird, ist ident zu der im Trockenen [Z311].

Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Temperaturmanagement der Regenreifen. Bei Stark- und Dauerregen versuchen die Fahrer den Reifen permanent deutlich zu fordern und sprechen auch meist vom „Überfahren“ des Reifens, um die Oberflächentemperatur möglichst hoch zu halten [Z310, Z314]. Bei auf trocknenden Bedingungen werden mit Regenreifen an unkritischen Stellen, wie langen Geraden, bewusst feuchte und nasse Stellen aufgesucht, um Kühlwirkung zu erzielen [Z318].

Ideen/Strategien:

- Koppelung Fahrdynamik/Fahrstil mit Reifentemperatur

Größe des Grenzbereichs:

„[...] also unser Grenzbereich variiert extrem stark, vielleicht sogar Serien-spezifisch, ob es nass oder trocken ist. [...]“ - #003_10_009014

Kernaussage:

Fahren im Regen erfordert einen deutlich größeren Toleranzbereich gegenüber Instabilitäten und eine schnelle Reaktion auf die Fahrzeugrückmeldung. Die Größe des Grenzbereichs schrumpft aufgrund des schlechteren Reibwerts auf mindestens die Hälfte. Der Fahrer muss öfter, kontrollierter und schneller eingreifen als im Trockenen. Erst, wenn die Fahrzeugreaktionen intensiver werden, ist der Grenzbereich erreicht. Zusätzlich kann in Längsrichtung deutlich mehr Potential abgesetzt werden als in Querrichtung.

Paraphrasierung:

Die Größe des Grenzbereichs nimmt gemäß der Definition des Kamm'schen Kreises und dem sinkenden Reibwert grundsätzlich ab. Fahrer beschreiben diesen Sprung von trocken zu nassen Bedingungen als einen fast 50-prozentigen Einbruch im Maximalpotential des Reifens [Z319, Z321-Z322]. Zusätzlich entstehen, durch den bereits vorhandenen Gummiabrieb auf der Fahrbahnoberfläche, Stellen mit deutlich niedrigeren Reibwerten [Z339].

Es wird beschrieben, dass längsdynamisch bis zu einem gewissen Grad weiterhin sehr viel Traktion abgesetzt werden kann, dies dann aber schlagartig einbricht, da der Grenzbereich in nassen Verhältnissen als „schmal und spitz“ beschrieben wird. Querdynamisch ist das fahrdynamische Potential enorm eingeschränkt [Z320, Z326]. Der Fahrer muss deutlich öfter Gegenmaßnahmen in Form von Lenkeingriffen vornehmen und Power-Oversteering tritt häufig ein [Z327].

Das Fahrzeug muss unter diesen Bedingungen dennoch vom Fahrer stark gefordert werden, um den Grenzbereich und die Maximalperformance zu erreichen. Erst wenn die Fahrzeugreaktionen um einiges intensiver und „krasser“ werden und Instabilitäten zunehmen, ist das Limit erreicht [Z323, Z327].

Ideen/Strategien:

- Auf Niedrigreißwert ist nicht nur das maximale Querdynamikpotential eingeschränkt, sondern auch das Querschleunigungspotential.

Linienwahl:

„[...] Deshalb kannst du ja im Regen nicht auf der trockenen Ideallinie fahren, obwohl es vielleicht der beste Radius wäre [...]“ - #003_11_009021

Kernaussage:

Im Nassen definiert sich die Regenlinie aufgrund des Gummibelags deutlich neben der Ideallinie im Trockenen. Fahrer versuchen durch eine gezielte Variation der Kurvenlinie, der Positionierung am Bremspunkt und das Einbeziehen der Fahrzeugcharakteristik möglichst traktionsoptimiert zu fahren. Oft, aber nicht zwangsläufig, werden hierbei die Stellen mit Gummiabrieb gemieden. Das Lesen der Fahrbahn unter den stark wechselnden Bedingungen erfordert viel Erfahrung und die Linie muss in jeder Runde erneut angepasst werden.

Paraphrasierung:

Die sogenannte Regenlinie unter nassen Bedingungen unterscheidet sich maßgeblich von der Ideallinie im Trockenen [Z331-Z332, Z337]. Da der auf die Fahrbahnoberfläche gelegte Gummiabrieb im Nassen keinerlei Haftung bietet, wird versucht diesen möglichst zu meiden [Z329]. Fahrer evaluieren selbstständig, ob ein Befahren der Trockenlinie aufgrund der Kurvenkombination dennoch notwendig ist oder, ob die Regenlinie für den aktuellen Streckenabschnitt besser geeignet ist [Z336].

Das Finden der Regenlinie stellt einen iterativen Prozess dar. Es wird zuerst leicht versetzt zur Trockenlinie abgebremst und das Bremsverhalten des Fahrzeugs hinsichtlich Verzögerungsfähigkeit, Einlenkverhalten und Stabilität bewertet [Z334]. Dem folgt ein Kreuzen der Trockenlinie nach außen, wo im Normalbetrieb kein Gummi gelegt wird. Möglichst lange außen bleiben, zurückkreuzen und wieder neben dem Gummi herausbeschleunigen, vollendet die Kurvenlinie im Regen [Z333-Z334]. Hier werden verschiedene Varianten und Kombinationen laufend ausprobiert [Z335].

Das Lesen der Fahrbahn und das optische Suchen des Grips ist für alle Fahrer essenziell und wird unter nassen Bedingungen nochmal deutlich wichtiger, da der Rennbetrieb die Wassermengen und somit den Grip und die Regenideallinie laufend verändert [Z328, Z331, Z338].

Ideen/Strategien:

- Optischer prädiktiver „Reibwertschätzer“ (nass/trocken, feucht/stehendes Wasser, Reifenabrieb, etc.)
- Gezieltes Abfahren von Linienvarianten (Doppelter Scheitel/Einfacher Scheitel, innen-außen-innen)

Risikoabschätzung:

„[...] es kommt auf die Situation an. [...]“ - #007_11_040051

Paraphrasierung:

Das Fahren im Grenzbereich stellt für Fahrer und Fahrzeug vor allem unter nassen Streckenverhältnissen ein erhöhtes Risiko dar. Ob und wie stark man ans Fahrzeuglimit geht, hängt maßgeblich von der aktuellen Situation ab. Fahrer unterscheiden hierbei deutlich

Ideen/Strategien:

- Notwendigkeitsabschätzung? - Wann lohnt es sich wirklich ans absolute Maximum zu gehen?

Rennfahrerskills

Popometer:

„[...] ein hochkomplexes Szenario, was da in einem so abgeht, wenn man da so ein trainierter Fahrer ist.“ - #006_03_056057

„[...] dann verlasse ich mich einfach auf meine Instinkte [...]“ - #003_05_053054

Paraphrasierung:

Das Popometer beschreiben nahezu alle Fahrer als ein Werkzeug, mit dem sie sämtliche Fahrzeugrückmeldungen wahrnehmen können und durch einen Abgleich mit den eigenen Erfahrungswerten eine entsprechende Gegenmaßnahme setzen können [Z342, Z347-Z350].

Hierbei spielen Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Raumachsen, haptisches Feedback an der Lenkung und den Fahrpedalen, visuelle Eindrücke in Zusammenhang mit der Gierrate und auch akustische Rückmeldungen, wie Drehzahl, Reifenquietschen oder Abrollgeräusche (Curbs) eine Rolle [Z341-Z344, Z346]. Auf die Frage nach einem digitalen Popometer reagierten viele Teilnehmer mit einem 6D-Sensor oder sogar einem Machine Learning Modell [Z345].

Ideen/Strategien:

- Machine Learning Algorithmus, der ständig mitlernt und die Fahrzeugreaktionen auf bestimmte Eingaben unter Berücksichtigung der äußeren Bedingungen, der Streckentopologie sowie den Zielerfordernissen der aktuellen Aufgabe bewertet.

Sim-Racing:

„[...] der Sim-Racing-Fahrer fährt nur mit seinem Auge, nicht mit seinem Popometer [...]“ - #010_02_063070

Paraphrasierung:

Sim-Racing und die Arbeit in einem Simulator bieten für viele Fahrer einen wichtigen Grundstein in der Vorbereitung auf das Rennwochenende [Z353]. Sim-Racing ermöglicht dem Fahrer sich auf das Streckenlayout einzustellen und erlaubt dem Team Anhaltspunkte für Fahrzeugreaktionen auf verschiedenste Setupänderungen zu finden. Diese Erkenntnisse müssen dann unter Realbedingungen getestet und validiert werden [Z243-Z244].

Reine Sim-Racer arbeiten verstärkt mit den visuellen Eindrücken und entwickeln meist nicht das sogenannte Popometer, welches in der Realität von großer Bedeutung ist und lediglich durch Erfahrungen im realen Rennbetrieb richtig geschult werden kann [Z351, Z354].

Ideen/Strategien:

-

Skills:

*„Da bist du dann auch wieder am Spielen und Zaubern mit dem Auto [...]“ -
#005_07_077078*

*„[...] der hat da kurz am Lenkrad gezappelt und das Auto hat quasi noch
nicht mal seine Gierrate geändert. Und ich habe schon korrigiert und das
Auto hat es quasi quittiert und fertig.“ - #006_03_114137*

Kernaussage:

Die Fähigkeiten von Rennfahrern basieren grundlegend auf dem Erfahrungsschatz jedes einzelnen. Sie reichen vom reproduzierbaren Anfahren von Fahrzeugproblemen über das Einschätzen der Fahrzeugcharakteristik innerhalb weniger Kurven bis zur Vorhersage und dem vorzeitigen Quittieren von Fahrzeugreaktionen auf Bodenwellen und dies ist nur ein Bruchteil der Beispiele.

Paraphrasierung:

Rennfahrer besitzen die Fähigkeit, Balanceprobleme oder andere Fahrzeugunstimmigkeiten bewusst anzufahren, aber auch bewusst zu umfahren [Z358]. Das bedeutet, sollte ein gewisses Problem durch Änderungen am Setup nicht gelöst werden können, kann der Fahrer seinen Fahrstil so anpassen, dass dieses Problem während der Fahrt oder des Rennens unterdrückt wird. Dies geschieht durch Änderungen im Brems- und Einlenkverhalten, der Linienwahl oder Ähnlichem [Z356].

Weiters können sich Rennfahrer sehr schnell an neue Fahrzeuge und deren Eigenschaften anpassen [Z360]. Nach den ersten zwei bis drei Bremsungen und Kurven sind sie in der Lage, die Fahrzeugcharakteristik so gut einzuschätzen, dass sie anschließend nahezu perfekt ans Limit heranfahren [Z357, Z362]. Beschrieben wird diese Fähigkeit als ein „Abspeichern einer maximalen Verzögerung“, die das Auto bei den gegebenen Streckenbedingungen aufbringen kann [Z362]. Zusätzlich besitzen geübte Fahrer die Fähigkeit, mögliche Brems- und Einlenkpunkte durch Erfahrungswerte anhand des visuellen Eindrucks von Fahrbahnoberfläche und Kurvenlayout sowie dem gespeicherten Verzögerungsverhalten äußerst akkurat abzuschätzen [Z366, Z368].

Zusammengefasst werden die Fähigkeiten von Rennfahrern oft als Intuition beschrieben, welche auf einem enormen Erfahrungsschatz basiert [Z361, Z363-Z364]. Unterbewusst und nahezu instinktiv geben Fahrer beispielsweise Lenkbefehle nach einer kleinen Bodenwelle in Voraussicht auf das Ausbrechen des Fahrzeugs – „[...] der hat da kurz am Lenkrad gezappelt und das Auto hat quasi noch nicht mal seine Gierrate geändert. Und ich habe schon korrigiert und das Auto hat es quasi quittiert und fertig.“ - #006_03_114137

Ideen/Strategien:

- „[...] ein Modell würde sowas relativ einfach ausrechnen können. Du machst eine Bremsung, du machst ein zuziehen, dann hast du so ein paar Kennwerte, die legst du über deine Geodaten [...]“ - #006_09_045057