

RWTH Aachen University
Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Kraftfahrzeuge

CES-Seminararbeit

Die Kurvenanalyse-Software CORA

vorgelegt von:

Frau B.Sc. Julia Holste, Matr.-Nr.: 294764

betreut von:

Dipl.-Ing Ernö Dux

Aachen, Januar 2015

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Die Software CORA	5
2.1	Bewertungsmethode	5
2.1.1	Korridormethode	6
2.1.2	Kreuzkorrelationsmethode.....	7
2.2	Anwendung	9
3	Parametermodifikation und Grenzwerte	11
4	Zusammenfassung und Ausblick	15
5	Literatur	16

1 Einleitung

Die Simulation ist für die Entwicklung neuer Fahrzeuge und Sicherheitssysteme unverzichtbar. Es kann jedoch nicht ohne Weiteres gewährleistet werden, dass die Simulationsergebnisse auch der Realität entsprechen oder diese näherungsweise abbilden. Mit viel Erfahrung ist es möglich, sinnvolle Ergebnisse zu erkennen und unphysikalische Resultate zu verwerfen. Der Vergleich zu realen Versuchen bietet die Möglichkeit, die Aussagekraft virtuell gewonnener Daten zu bewerten. Bisher ist die rein optische Gegenüberstellung von Ergebniskurven gängige Praxis. Dieser Methode mangelt es jedoch an Objektivität und einem quantitativen Ergebnis. Ein solches ist nötig, um die Güten verschiedener Simulationsmodelle direkt vergleichbar zu machen.

Auf Grund der Bedeutung solcher Simulationsmodelle ist es nötig, deren Vorhersagegenauigkeit und Eignung zu bestimmen. Die Darstellung der Modellgüte in einem einzigen, interpretierbaren Wert erleichtert die Bewertung der Ergebnisse. Darüber hinaus entsteht die Möglichkeit, bestimmte Modellabschnitte, die das Gesamtverhalten stark beeinflussen, gezielt zu erkennen und zu verbessern. Da bereits viele detaillierte Simulationsmodelle existieren, birgt dieses Vorgehen großes Potential für eine effizientere Entwicklung.

Diese Arbeit gliedert sich in zwei Abschnitte. In Kap. 2 wird zunächst die verwendete Software vorgestellt. Dazu gehört eine Erklärung der internen Methoden unter Berücksichtigung der notwendigen mathematischen Formeln. Auch eine Erläuterung der wichtigsten Parameter wird an dieser Stelle vorgenommen. Der zweite Abschnitt umfasst die Literaturrecherche in Kap. 3 und gibt die Inhalte der verfügbaren Quellen in Bezug auf die Software und ähnliche Methoden wieder. Ein besonderes Augenmerk soll auf die angegebenen Werte zur Parametereinstellung gelegt werden. Außerdem ist von großem Interesse, ob eine Unterscheidung zwischen guten und schlechten Ergebnissen an Hand eines Grenzwertes getroffen wird.

2 Die Software CORA

Mit der Software CORA kann die Korrelation zwischen zwei eindeutigen Kurven berechnet werden. CORA steht dabei für **COR**relation and **A**nalysis. Als Ergebnis wird eine Zahl zwischen null und eins ausgegeben. Je größer dieser Wert ist, desto besser ist die Übereinstimmung. In Abhängigkeit der gewählten Toleranzen bedeutet der Wert eins eine perfekte Korrelation und null keine Übereinstimmung. [THU12]

Die Software ist kommandozeilenbasiert und wird sowohl von Windows als auch von Linux unterstützt. Da keine kommerzielle Nutzung beabsichtigt ist, kann CORA kostenlos von der Homepage der Partnership for Dummy Technology and Biomechanics (pdb) heruntergeladen werden. Um eine möglichst objektive Bewertung zu erhalten, soll das Expertenwissen von den Algorithmen getrennt werden. Dieser Grundgedanke führt zu einer anwendungsspezifischen Einstellbarkeit der Parameter und somit zu einer flexibel einsetzbaren Software. [THU12]

2.1 Bewertungsmethode

Zur Bestimmung der Korrelation werden zwei Kurven miteinander verglichen. Die Erste kann dabei auch aus der Mittelung mehrerer, beispielsweise experimentell ermittelter, Kurven entstehen und wird als Referenzkurve bezeichnet. Die Vergleichskurve hingegen stammt meistens aus Simulationen und teilweise aus Versuchen. Die Bewertung der Übereinstimmung erfolgt an Hand von zwei verschiedenen Methoden. Auf diese Weise sollen die jeweiligen Nachteile ausgeglichen werden. In Abb. 2-1 wird die Struktur dieser Methoden dargestellt. [THU12]

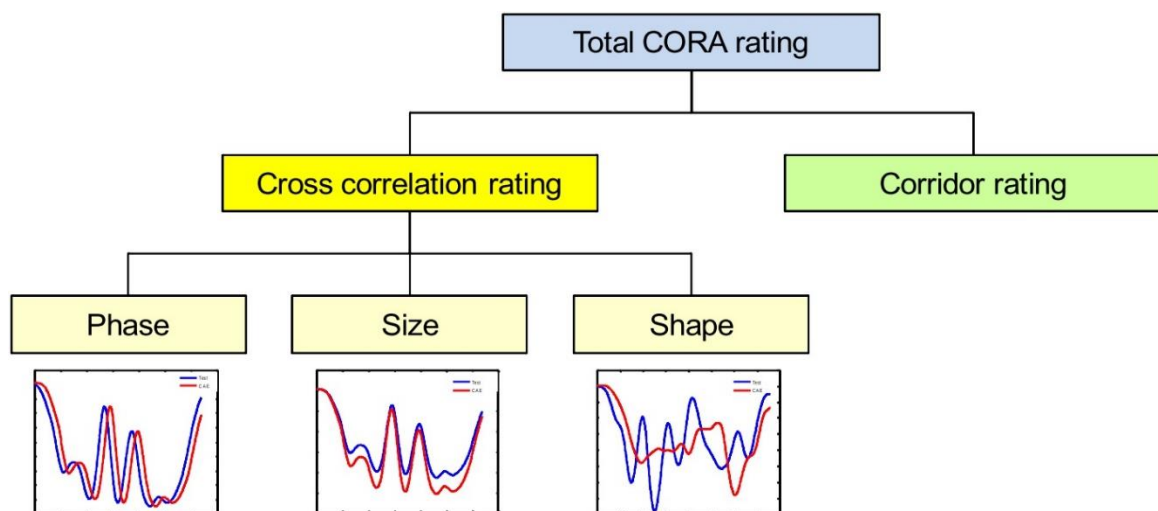


Abb. 2-1: CORA Bewertungsstruktur [THU12]

Die Ergebnisse der Korridor- und Kreuzkorrelationsmethode werden gewichtet und nach Gl. 2-1 zur Gesamtbewertung zusammengefasst.

$$C_3 = g_1 \cdot C_1 + g_2 \cdot C_2$$

Gl. 2-1

Dabei steht C_1 für die Wertung der Korridormethode und C_2 für das Gesamtergebnis der Kreuzkorrelation. Die Summe der Gewichte g_i muss für jede Gleichung dieser Art, das heißt für jede Gleichung mit Gewichtungsfaktoren, eins ergeben. [THU12]

2.1.1 Korridormethode

Die Korridormethode kann als mathematische Umsetzung der intuitiven Bewertung der Übereinstimmung zweier Kurven aufgefasst werden. Es werden ein innerer und ein äußerer Korridor um die Referenzkurve definiert. Dann kann für jeden Zeitpunkt festgestellt werden, ob die Vergleichskurve in einem der Korridore liegt. Die Bewertung erfolgt dabei nur innerhalb des Auswertintervalls, welches durch t_{min} und t_{max} bestimmt wird. Beide Kurven müssen innerhalb des Intervalls definiert sein und gleich viele Stützstellen aufweisen. Abb. 2-2 stellt die Korridore beispielhaft dar. [THU12]

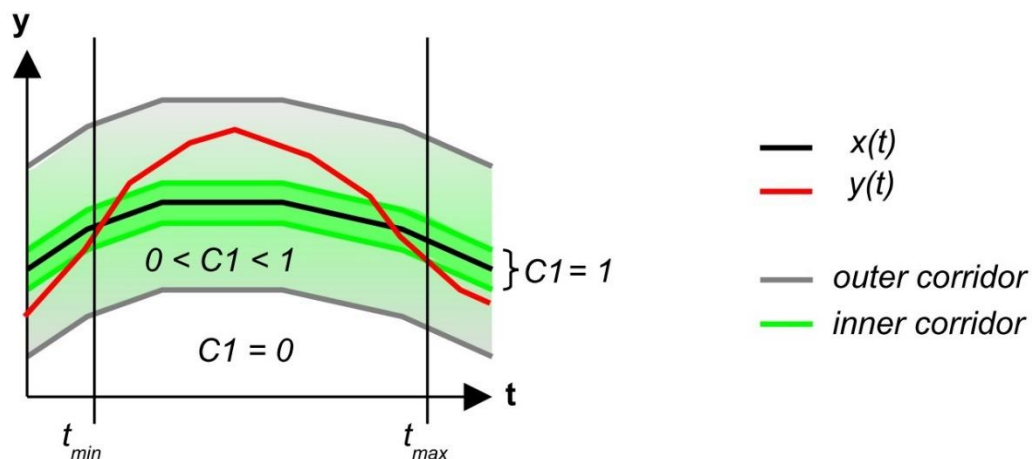


Abb. 2-2: Bewertungsregionen der Korridormethode [THU12]

Um die schwarze Referenzkurve sind in grün und grau die beiden Korridore angeordnet. Liegt die rote Vergleichskurve im inneren Korridor, wird die Übereinstimmung mit eins bewertet. Außerhalb beider Korridore liegt keine Korrelation vor, demnach wird c_i zu null. Der Verlauf der Bewertung dazwischen wird nach Gl. 2-2 vorgenommen, wobei δ_o und δ_i die halben Korridorbreiten beschreiben. Die Gesamtwertung der Methode C_1 ergibt sich aus der Mittelung aller c_i . [THU12]

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |y(t_i) - x(t_i)| < \delta_i(t) \\ \left(\frac{\delta_o(t) - |y(t_i) - x(t_i)|}{\delta_o(t) - \delta_i(t)} \right)^k & \\ 0 & \text{if } |y(t_i) - x(t_i)| > \delta_o(t) \end{cases} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Es gibt verschiedene Möglichkeiten um die Breite der Korridore festzulegen. Standardmäßig werden diese in Abhängigkeit des maximalen Absolutwerts der Referenzkurve gebildet. Die

Standardabweichung kann zur Bildung der Korridore genutzt werden, falls die Referenzkurve durch mehrere Signale entsteht. Bei dieser Methode ist die Breite nicht konstant. Abgesehen davon können benutzerdefinierte Korridore erstellt werden, wobei in diesem Fall weitere Kurven für die Software hinterlegt sein müssen. Der Nachteil der Korridormethode ist die schlechte Bewertung von phasenverschobenen Kurven. Dieser muss durch die Kreuzkorrelationsmethode kompensiert werden. [THU12]

2.1.2 Kreuzkorrelationsmethode

Die Kreuzkorrelationsmethode besteht im Wesentlichen aus drei Untermethoden, die jeweils bestimmte Kurvencharakteristiken bewerten. Es werden somit drei Bewertungen vorgenommen, die gewichtet in das Ergebnis der Kreuzkorrelationswertung eingehen. Gl. 2-3 beschreibt diesen Zusammenhang. [THU12]

$$C_2 = g_V \cdot V + g_P \cdot P + g_G \cdot G \quad \text{Gl. 2-3}$$

Dabei sind V , P und G die Bewertungen von Verlauf, Phasenlage und Größe der betrachteten Kurve. In Abb. 2-3 sind diese Kurvencharakteristiken beispielhaft dargestellt.

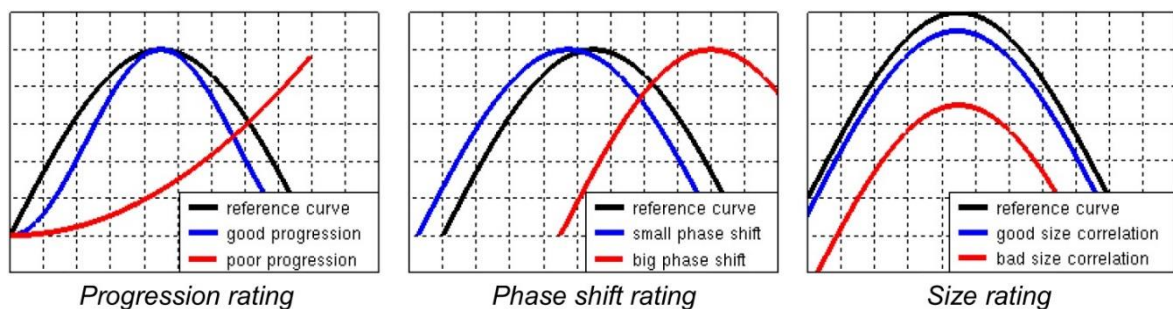


Abb. 2-3: Untermethoden der Kreuzkorrelationswertung [THU12]

Die Software geht bei der Erstellung der Kreuzkorrelationsbewertung wie folgt vor: Zunächst wird die Phasenverschiebung eliminiert. Dazu wird die Referenzkurve in einem bestimmten Bereich verschoben und jeweils der Kreuzkorrelationswert K nach Gl. 2-4 berechnet, wobei $x(t)$ und $y(t)$ weiterhin die Referenz- und Vergleichskurve bezeichnen. Dabei liegt K immer zwischen minus eins und eins. Die maximale Kreuzkorrelation bestimmt die Position der Kurve für die folgenden Untermethoden. Als Nachteil dieses Verfahrens ist die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Auswertintervall und der maximalen Phasenverschiebung zu nennen. [THU12]

$$K_{xy}(m) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x(t_{min} + (m+i) \cdot \Delta t) \cdot y(t_{min} + i \cdot \Delta t)}{\sqrt{(\sum_{i=0}^{n-1} x^2(t_{min} + (m+i) \cdot \Delta t) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} y^2(t_{min} + i \cdot \Delta t))}} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Hier gibt m an, wie oft und in welche Richtung die Referenzkurve um Δt verschoben wird. Dabei gilt Gl. 2-5. [THU12]

$$\frac{t_{shiftmin}}{\Delta t} \leq m \leq \frac{t_{shiftmax}}{\Delta t} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Um diesen Bereich für m zu bestimmen, wird der Parameter INT_{MIN} genutzt, der immer zwischen null und eins liegen muss. Die Berechnungsvorschrift ist Gl. 2-6 zu entnehmen. [THU12]

$$\begin{aligned} t_{shiftmin} &= -(1 - INT_{MIN}) \cdot (t_{max} - t_{min}) \\ t_{shiftmax} &= (1 - INT_{MIN}) \cdot (t_{max} - t_{min}) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Mit dem so ermittelten maximalen K kann die Verlaufswertung direkt durch Gl. 2-7 berechnet werden. Der Exponent k_V ist dabei eine positive ganze Zahl und verantwortlich für die Strenge der Bewertung. [THU12]

$$V = \left(\frac{1}{2} \cdot (K + 1) \right)^{k_V} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Die Wertung der Phasenlage ähnelt der Korridormethode. Zur Berechnung wird Gl. 2-8 verwendet. Dabei ist δ die Zeit, um die die Referenzkurve verschoben ist. Mit dem Exponent k_P kann wiederum beeinflusst werden, wie stark Abweichungen von der Referenz bestraft werden. [THU12]

$$P = \begin{cases} 1 & \text{if } |\delta| < \delta_{min} \\ \left(\frac{|\delta_{max} - |\delta||}{\delta_{max} - \delta_{min}} \right)^{k_P} & \\ 0 & \text{if } |\delta| > \delta_{max} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die Parameter D_{MIN} und D_{MAX} werden mit der Breite des Auswertintervalls multipliziert und bestimmen so die halben Korridorbreiten δ_{min} und δ_{max} in Abszissenrichtung. Gl. 2-9 gibt die Berechnungsvorschrift für δ_{min} an. Analog dazu wird δ_{max} ermittelt. [THU12]

$$\delta_{min} = D_{MIN} \cdot (t_{max} - t_{min}) \quad \text{Gl. 2-9}$$

Zuletzt wird die Größe der Kurven bewertet. Dazu werden die Flächen unter den Kurven quadriert und durcheinander geteilt. Mit x als Referenz- und y als Vergleichskurve ergibt sich das in Gl. 2-10 dargestellte Verhältnis. [THU12]

$$\frac{F_x}{F_y} = \frac{\sum_{i=1}^n x^2(t_{min} + i \cdot \Delta t)}{\sum_{i=1}^n y^2(t_{min} + \delta + i \cdot \Delta t)} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Nun kann die Größenwertung an Hand von Gl. 2-11 vorgenommen werden. Dabei gibt der Exponent k_G wiederum an, wie schnell die Wertung von eins nach null abfällt. [THU12]

$$G = \begin{cases} \left(\frac{F_x}{F_y}\right)^{k_G} & \text{if } F_y > F_x \\ \left(\frac{F_y}{F_x}\right)^{k_G} & \text{else} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Abschließend werden die drei Ergebnisse aus den Untermethoden der Kreuzkorrelation gewichtet und in Gl. 2-3 zusammengefasst. Diese Wertung ergibt wie zuvor beschrieben zusammen mit dem Ergebnis der Korridormethode nach Gl. 2-1 das Gesamtergebnis der CORA Untersuchung.

2.2 Anwendung

Zur Installation der Software muss in der Datei cora.bat der Pfad zur Startdatei hinterlegt werden. Außerdem ist in der Datei cora.cfg der Pfad zum Browser anzugeben. Dieser wird verwendet, um die Auswertung darzustellen. Nun kann die Software mit Hilfe der Konsole ausgeführt werden. Dazu muss in den Ordner gewechselt werden, in dem die Kurvendaten und die Parameterdatei liegen. Der Startbefehl lautet dann, für die Berechnung von „Beispiel“: „<full path of cora>\cora Beispiel.cps -b“. Die Option -b ist zum Starten des Browsers notwendig. Zusätzlich wird die Bewertung auch als Textdatei im entsprechenden Ordner gespeichert. [THU12]

Die Parameter, die einer CORA Bewertung zugrunde liegen, können in der jeweiligen .cps Datei modifiziert werden. Die wichtigsten Parameter sind im Folgenden aufgeführt. [THU12]

t_{min}, t_{max}	Anfang und Ende des Auswertintervalls
k	Exponent der Korridorwertung
g_1	Gewichtungsfaktor der Korridormethode
a_0, b_0	Breite des inneren/ äußeren Korridors
D_{MIN}, D_{MAX}	Faktoren zur Bestimmung der zulässigen Phasenverschiebung
INT_{MIN}	Faktor zur Bestimmung der minimalen Überschneidung der Kurven
k_V	Exponent der Verlaufswertung
k_G	Exponent der Größenwertung
k_P	Exponent der Phasenlagewertung
g_V	Gewichtungsfaktor der Verlaufswertung
g_G	Gewichtungsfaktor der Größenwertung
g_P	Gewichtungsfaktor der Phasenlagewertung
g_2	Gewichtungsfaktor der Kreuzkorrelationsmethode

Diese Parameter bestimmen das CORA Ergebnis maßgeblich. Dabei spielen die Gewichtungsfaktoren bei der endgültigen Zusammensetzung der Bewertung eine übergeordnete Rolle, wie die Gleichungen in Kap. 2.1 zeigen. [THU12]

Ein Beispiel soll die Darstellung der Ergebnisse verdeutlichen. Die Signale stammen von Beschleunigungsaufnehmern, die bei der Simulation von Fahrzeug-Fahrzeug-Crashes mit

stark vereinfachten Modellen eingesetzt werden. Als Referenz wird die Kollision bei 50 km/h und 50 % Überdeckung gewählt. Die Fahrzeugmassen betragen 670 kg und 1337 kg. Für die Vergleichskurve wird die Masse des schwereren Modells auf 1880 kg erhöht. Dem Benutzer wird nach erfolgreicher Berechnung durch die Software das Diagramm in Abb. 2-4 angezeigt.

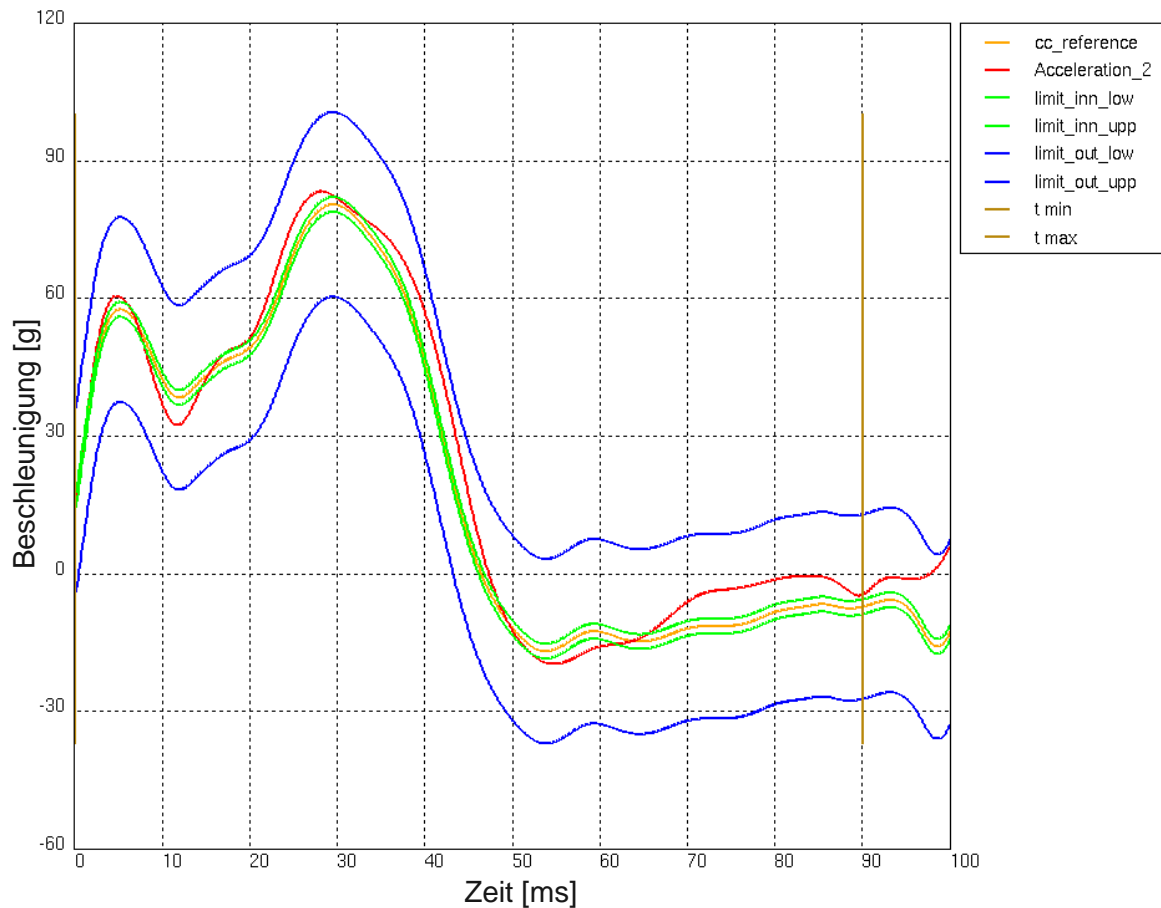


Abb. 2-4: CORA Ergebnisdiagramm

Die gelbe Kurve ist das verschobene Referenzsignal, wie es zur Bewertung durch die Untermethoden der Kreuzkorrelation genutzt wird. Um eine gute Sichtbarkeit zu gewährleisten, sind der grüne innere und der blaue äußere Korridor recht breit dargestellt. Das Auswertintervall ist durch senkrechte Linien gekennzeichnet. Es ist leicht erkennbar, dass die rote Vergleichskurve vollständig innerhalb des äußeren Korridors liegt. Die Parameter wurden, mit Ausnahme der Korridorbreiten, entsprechend [ME113] gewählt. Es ergibt sich eine CORA Wertung von 0,873.

3 Parametermodifikation und Grenzwerte

In diesem Kapitel werden die Literaturquellen untersucht, die Informationen zur CORA Software und ähnlichen Bewertungsmethoden enthalten. Dabei wird besonders darauf geachtet, ob Angaben zu Parametereinstellungen existieren oder Grenzwerte genannt werden, die eine gute von einer schlechten Bewertung unterscheiden.

In [DSO12] werden zwei Dummy-Modelle miteinander verglichen. Diese unterscheiden sich lediglich in der Definition der Materialien. Version 5.0 (v5.0) ist dabei das rechenintensive, aber validierte Modell, Version 5.0 RAM (v5.0 RAM) ist auf Grund der einfacheren Materialdefinitionen schneller. In einer Vollfahrzeug-Simulation würde sich jedoch die benötigte Zeit trotz des um 60 % schnelleren Dummy-Modells nicht wesentlich ändern. Die CORA Ergebnisse zeigen eine bessere Übereinstimmung des Modells v5.0 in beinahe allen Simulationen. Bei den Zertifizierungsversuchen schneidet v5.0 RAM in allen Auswertungen schlechter ab. Die minimale Differenz zwischen den Modellen liegt bei der Bewertung des Thorax vor. Hier beträgt der Unterschied in der CORA Wertung nur 0,005. Die maximale Differenz beträgt 0,188 und tritt beim Vergleich der Lendenwirbelsäulen auf. Auch in den Komponentenversuchen schneidet v5.0 besser ab. Allerdings liegt die CORA Wertung für den Abdomen vom v5.0 RAM Modell um 0,021 über der Wertung von v5.0. Die übrigen Ergebnisse unterscheiden sich um maximal 0,189. Verschiedene Schlittenversuche zeigen wiederum die höhere Genauigkeit des v5.0 Modells. Die größte Differenz beträgt 0,232 im Versuch mit der D3_P Barriere. Insgesamt wird aus diesen Ergebnissen geschlossen, dass der Genauigkeitsverlust durch die Verwendung von anderen, einfacheren und damit schnelleren Materialien nur sehr gering ausfällt. An keiner Stelle sind Werte für Parameter oder Grenzen angegeben. [DSO12]

Auch in [GEH09] werden unterschiedliche Dummy-Modelle verglichen. Allerdings ist dies nicht der wichtigste Punkt des Dokuments. Das Ziel ist, eine objektive Bewertungsmetrik für den Vergleich von Kurven aus Versuchen und Simulationen zu entwickeln. Dies wird ebenfalls als eine Hauptaufgabe im Bereich der Fahrzeugsicherheit identifiziert. CORA wird als universellste Software für diesen Zweck vorgestellt. In der Regel liefert die Korridormethode ab 0,5 realistische Ergebnisse, so dass dieser Wert als erste Grenze verstanden werden kann. Es wird festgestellt, dass die Kreuzkorrelationsmethode nicht mit Signalrauschen umgehen kann, daher ist eine Filterung solcher Kurven notwendig. Die Definition des Auswertintervalls ist ebenfalls kritisch. Einige Signale machen eine manuelle Einstellung auf Grund ihrer Eigenschaften unumgänglich. Abschließend wird festgestellt, dass sich bei der Verwendung identischer Parameter unterschiedliche Dummy-Modelle voneinander unterscheiden lassen, aber die globale Bedeutung der CORA Wertung weiterhin unklar ist. [GEH09]

Motiviert durch die Möglichkeit Unfälle zu erkennen und an weitere Informationen zu gelangen, spielt CORA auch in Bezug auf kollisionsbedingte Geschwindigkeitskurven eine Rolle. In [ME113] wird die Notwendigkeit identifiziert, Approximationen solcher Kurven zu generieren, um neue Fahrzeugsicherheitsfunktionen zu entwickeln. Dazu müssen die

Charakteristiken der realen Kurven erhalten bleiben. Die Approximation soll demnach eine möglichst hohe Ähnlichkeit mit der originalen Geschwindigkeitskurve aufweisen. Korridormethode und Kreuzkorrelationsverfahren erhalten die Gewichtungen $g_1 = 0,556$ und $g_2 = 0,444$. Die Untermethoden der Kreuzkorrelation sind mit $g_V = 0,333$, $g_P = 0,5$ und $g_G = 0,167$ gewichtet. Das Auswertintervall wird so gewählt, dass der Auslaufbereich nicht berücksichtigt wird. Zur Bestimmung der Korridorbreiten wird der höchste absolute Funktionswert mit den Faktoren $a_0 = 0$ und $b_0 = 0,45$ multipliziert. Die Korridore zur Bewertung der Phasenverschiebung werden mit $D_{MIN} = 0,05$ und $D_{MAX} = 0,09$ gebildet. Es wird angemerkt, dass das CORA Verfahren keine gültige Ähnlichkeitsfunktion darstellt, da die Symmetrieeigenschaft verletzt wird. Der Grund dafür ist die Abhängigkeit der Bewertungskriterien von der Referenzkurve. Daher wird die Bewertung mit vertauschten Kurven wiederholt und eine Mittelung beider Ergebnisse durchgeführt. Die verschiedenen Approximationsverfahren erreichen jeweils eine Güte von mindestens 0,92, ohne Berücksichtigung der Standardabweichung. Entsprechend gut werden auch die Crasheschweregrößen durch die generierten Kurven abgebildet. Zusammenfassend wird die Eignung der Approximationen hervorgehoben, sowie die Anwendbarkeit von CORA in leicht modifizierter Form bestätigt. [ME13]

Die große Anzahl verfügbarer Dummies macht die Auswahl des passenden Modells schwierig. Eine objektive Bewertung kann dieses Problem lösen, wie in [GEH11] erkannt wird. Verschiedene Simulationen werden mit jedem Modell durchgeführt, um ein möglichst großes Spektrum an Lastfällen abzudecken. Da CORA bereits einige Jahre verwendet wird, können Annahmen über die Güte der Bewertung getroffen werden. Wird nur ein einziges Signal untersucht, ist die Übereinstimmung ab einem Wert von 0,8 als gut einzustufen. Die gleiche Aussage gilt für einen kompletten Test mit mehreren Signalen ab einem Wert von 0,7. An dieser Stelle wird allerdings auch angemerkt, dass die Bewertung eines Dummies in Relation zu einem Referenzmodell bevorzugt wird. Die Zertifizierungstests zeigen eine stetige Verbesserung der CORA Wertung, die mit dem Jahr der Veröffentlichung korreliert. Ausreißer lassen sich durch unterschiedliche Prioritäten in der Entwicklung der einzelnen Modelle erklären. Gleiches gilt für die Komponententests. In diesem Zusammenhang wird festgestellt, dass kleine Unterschiede in der Bewertung nicht überschätzt werden sollen. Klein bedeutet in diesem Fall etwa 0,05. Auch in Schlitten- und Fahrzeugversuchen schneidet das neueste Dummy Modell am besten ab. Die Gewichtung der Faktoren der einzelnen Signalauswertungen hat einen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Allerdings bleibt die Reihenfolge der Modelle gleich, beziehungsweise ändert sich höchstens für zuvor ähnlich bewertete Modelle. Somit wird gezeigt, dass sinnvolle Gewichtungen auch eine sinnvolle CORA Wertung bewirken. Abschließend wird eine Kombination aus Zertifizierungs-, Komponenten- und Schlittentests als beste Möglichkeit identifiziert, um Dummy Modelle zu bewerten. [GEH11]

In [COR12][COR12], S.238ff, werden verschiedene Bewertungsmethoden miteinander verglichen. Dabei wird ein Ansatz gewählt, der in dieser Form in keiner der übrigen Quellen genutzt wird. Zusätzlich zu den verschiedenen Methoden nimmt auch eine Gruppe aus

Experten eine Bewertung der betrachteten Signale vor. Es werden reale Tests und Simulationen jeweils untereinander und gegeneinander geprüft. Bei den Signalen handelt es sich um Kopfpimpaktor-Beschleunigungen. Die Wertung durch die Expertengruppe ist mit zwei Ausnahmen sehr konsistent. Die Idee ist, kein Modell zu verwerfen, das durch die Experten als validiert angesehen wird. Dazu wird für jede Bewertungsmethode der Wert als Grenze gewählt, bei dem die Validierung durch den Menschen gerade nicht mehr gegeben ist. Mit den Parametern $INT_{MIN} = 0,80$ und $k_V = 55$ muss die CORA Verlaufswertung für ein Signal mindestens 0,430 betragen, um dieses zu akzeptieren. Die Korridormethode hingegen muss mindestens 0,719 erreichen, damit das Modell nicht verworfen wird. Die Tatsache, dass die Befragung anderer Experten oder die Verwendung anderer Signale zu anderen Ergebnissen führen können, ist bekannt. Für Europa wird dennoch die CORA Verlaufswertung, neben zwei weiteren Methoden, zur Validierung von Modellen für den Fußgängerschutz im Kopfbereich vorgeschlagen. [COR12]

Ein neues Verfahren zur Bewertung von Kurven wird in [MUR14] vorgestellt. Es ähnelt in den Grundzügen der CORA Methode. Die Anforderungen sind wie folgt definiert: Das Ergebnis der Methode soll eine einzelne Zahl und alleinstehend interpretierbar sein, das heißt ohne die Kurven gesehen zu haben, soll das Übereinstimmungsmaß abschätzbar sein. Auf Grund möglicher Streuungen soll die Berücksichtigung von Varianzen und Fehlerabschätzungen der Basiskurve möglich sein. Außerdem müssen die Kurven relativ zueinander verschoben werden können. Um diese Anforderungen umzusetzen wird zunächst eine Korridormethode entwickelt. Die Breite ist durch den Anwender in Abszissen- und Ordinatenrichtung definierbar. Eine aufwendige Konstruktion ist nötig, um dies zu realisieren. Die perfekte Übereinstimmung der Kurven wird mit null bewertet. Liegt die Vergleichskurve auf der Korridorgrenze, wird der Wert eins vergeben. Außerhalb soll der Wert mit steigender Entfernung weiter wachsen. Der Anstieg der Bewertung kann über Parameter für beide Bereiche separat definiert werden. Um auch die Phasenverschiebung zwischen den Kurven berücksichtigen zu können, wird ein weiterer Faktor eingeführt, der ein bestehendes Phasenabweichungskriterium umsetzt. Dieser beträgt bei identischen eins und bei gegenphasigen Kurven zwei. Zur Korrektur der Relativverschiebung wird ein Optimierungsproblem gelöst, das als Ergebnis die Zeitverschiebung bei optimaler Übereinstimmung liefert. Dazu wird an Hand des Verhältnisses der globalen Maxima ein Skalierungsfaktor für die Vergleichskurve definiert. Dieser ist nach Lösung des Problems ein Maß für die Amplitudengleichheit der Kurven. Mit den nun bekannten Berechnungsverfahren kann die Methode in drei Schritte gegliedert werden. Zunächst wird der Korridor um die Basiskurve konstruiert und das Optimierungsproblem gelöst. Nun wird die korrigierte Vergleichskurve als Grundlage für die Korridorkonstruktion genutzt. So entstehen zwei phasensensitive Korridorwertungen, die gemittelt und zu ihrer Differenz addiert werden. Im zweiten Schritt werden die Kurven vertauscht, so dass die ursprüngliche Basiskurve nun die Vergleichskurve ist. Es ergeben sich zwei weitere phasensensitive Korridorwertungen, die auf gleiche Weise zusammengefasst werden. Der dritte Schritt besteht in der Bewertung der ermittelten Zeitverschiebungen. Bei genügend kleiner Differenz ist das Minimum der zwei berechneten Ergebnisse die Bewertung der Kurvenübereinstimmung. Liegt die Differenz der

Verschiebungen über 10 % der Intervalllänge, wird eine Warnung ausgegeben, die den Benutzer darauf hinweist, dass die Übereinstimmung schlecht, und keine sinnvolle Verschiebung möglich ist. Ein Beispiel liefert Ergebnisse, die als gute Übereinstimmung aufgefasst werden. Die Korridorwertung beträgt dabei 1,18, der Phasenfaktor 1,14 und der Skalierungsfaktor 0,72. Die Vergleichskurve liegt demnach im Mittel auf dem Korridorrand, ist kaum phasenverschoben und muss um etwa ein Drittel herunterskaliert werden. Als Vorteile dieser Methode werden die Konstruktionsweise des Korridors und die einfache Interpretierbarkeit der Ergebnisse genannt. [MUR14]

In [BAR13] wird eine objektive Bewertungsmetrik aus der Kombination und Verbesserung bestehender Verfahren entwickelt, um die Übereinstimmung von Signalen dynamischer Systeme zu quantifizieren. Die Methode soll in der Lage sein, Phasenverschiebung, Größe und Verlauf zu bewerten. Außerdem muss diese für die Anwendung in der Fahrzeugsicherheit robust, symmetrisch und einfach sein, eine physikalische Bedeutung haben, Expertenwissen enthalten und Streuung berücksichtigen. Im Fokus liegen Kurven, die aus Experimenten und Simulationen gewonnen werden. Somit muss an Hand des Ergebnisses ersichtlich sein, in wie weit ein Modell für die beabsichtigte Nutzung geeignet ist. Als Grundlage wird neben der Korridormethode aus CORA auch die Enhanced Error Assessment of Response Time Histories (EEARTH) Metrik für das kombinierte Verfahren verwendet. Da die Kreuzkorrelationsmethode von CORA Kurvendaten außerhalb des Auswertintervalls benötigt um sinnvolle Ergebnisse zu produzieren, ist EEARTH diesem vorzuziehen. Im entwickelten Verfahren werden die Korridormethode mit 0,4 und die drei Bewertungen Phase, Größe und Form aus EEARTH mit je 0,2 gewichtet. Für den Exponent der Korridorwertung gilt hier $k = 2$ und die Abtastrate beträgt 10 kHz. Sind die Parameter entsprechend ISO/TS 18571 eingestellt, gelten folgende Grenzwerte für das Gesamtergebnis R :

$R > 0,94$	sehr gut
$0,80 < R < 0,94$	gut
$0,58 < R < 0,80$	ausreichend
$R < 0,58$	mangelhaft

Die entwickelte Bewertungsmethode ist vollständig validiert und kann zwischen Signalen verschiedener Güte unterscheiden. Dies wird an Hand von vier Fallbeispielen verdeutlicht. Dazu werden Simulationen mit einem Experiment hinsichtlich Kraft, Moment, Beschleunigung, und Verschiebung verglichen. Die entwickelte Methode ist beschränkt auf eindeutige Signale aus Experimenten und Simulationen, die aus dem Bereich der Fahrzeugsicherheit stammen. Veränderungen der Parameter oder eine Betrachtung von mehr als zwei Kurven gleichzeitig führen zur Ungültigkeit der angegebenen Grenzwerte. [BAR13]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der gut durchdachten Struktur der Software, ist CORA ein nützliches Werkzeug zur Bewertung der Übereinstimmung verschiedener Kurven. Durch die Verwendung mehrerer Methoden können die jeweiligen Nachteile kompensiert werden. Die individuell einstellbaren Parameter ermöglichen eine universelle Anwendung, können aber auf Grund ihrer Komplexität für unerfahrene Nutzer zu Problemen führen. Daher bleibt der Einsatz eines Experten im Einzelfall oder bei der Definition von innerhalb eines Anwendungsfelds gültigen Einstellungen unerlässlich.

In Kap. 3 zeigt sich eine Schwäche von CORA. Die Methode ist nicht symmetrisch und somit keine gültige Ähnlichkeitsfunktion. Dieses Problem lässt sich wie in [ME113] beschrieben recht einfach lösen. Eine Integration dieser Korrektur in die Software ist unkompliziert und bringt in mathematischer Hinsicht eine klare Verbesserung.

Es werden verschiedene Parametereinstellungen und Gewichtungen vorgeschlagen. Da diese meist auf einen bestimmten Anwendungsfall limitiert sind, ist die Übertragbarkeit auf andere Signalarten nicht uneingeschränkt gegeben. Die Korridormethode wird als verlässliches Bewertungsverfahren vorgestellt. Mit kleinen Einschränkungen findet auch die Kreuzkorrelation Anwendung. Die Notwendigkeit diese durch EEARTH zu ersetzen, wird innerhalb dieser Arbeit nicht erkannt. Die Begründung für dieses Vorgehen ist aber verständlich.

Offen bleibt die Frage nach allgemeingültigen Grenzwerten zur Unterscheidung von guter und schlechter Übereinstimmung. Da vereinzelte Grenzen für bestimmte Anwendungsgebiete genannt werden, liegt der Schluss nahe, dass auch universell gültige Werte existieren und in Zukunft formuliert werden können. Zumindest für die verschiedenen Kurvenarten ist die Aufstellung allgemein anerkannter Grenzen durch eine Expertengruppe denkbar.

Unklar ist ebenfalls das Ausmaß der Parametersensitivität. Zwar führen kleine Änderungen der Parameter nicht zu völlig anderen Ergebnissen, wie Kap. 3 zeigt. Es ist aber auch nicht auszuschließen, dass sich gewisse Einstellungen gegenseitig beeinflussen. Denkbar ist die Durchführung einer statistischen Versuchsplanung um diese Frage zu klären. Auf Grund der großen Anzahl möglicher Faktoren wäre der Aufwand für diese Methode allerdings recht hoch. Eine vorhergehende Analyse und Abwägung des Erkenntnisgewinns ist in diesem Zusammenhang empfehlenswert.

5 Literatur

- [BAR13] BARBAT, S.; FU, Y.; ZHAN, Z.; YANG, R.; GEHRE, C.
Objective Rating Metric for Dynamic Systems
23rd ESV Conference, Paper 13-0448, Seoul, 2013
- [COR12] CORDERO, R.; GARCIA, J.; EL HABACHI, A. A.; MÜNZ, T.; VINCZE-PAP, S.;
PUPPINI, R.; BIDAL, S.; JACOB, C.
D2.1 Evaluation criteria to choose VT methods
Project: Implementation of Virtual Testing in Safety Regulations
CIDAUT, Boecillo, 2012
- [DSO12] D'SOUZA, R.; STAHLSCHMIDT, S.; HUANG, Y.
Development of a special version of the FAT ES-2/ES-2re for rapid prototyping
11th LS-DYNA Forum, Ulm, 2012
- [GEH09] GEHRE, C.; GADES, H.; WERNICKE, P.
Objective Rating of Signals Using Test and Simulation Responses
21st ESV Conference, Paper 09-0407, Stuttgart, 2009
- [GEH11] GEHRE, C.; STAHLSCHMIDT, S.
Assessment of Dummy Models by using Objective Rating Methods
22nd ESV Conference, Paper 11-0216, Washington D.C., 2011
- [MEI13] MEIER, A.; GONTER, M.; KRUSE, R.
Approximationsverfahren für kollisionsbedingte Geschwindigkeitskurven
Proceedings 23. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 2013
- [MUR14] MURMANN, R.; HARZHEIM, L.; DOMINICO, S.
Neuartige Methode zur Bewertung von Versuchs- und Simulationsergebnissen
VDI-Berichte Nr. 2224, Düsseldorf, 2014
- [THU12] THUNERT, C.
CORA Release 3.6 User's Manual
Gesellschaft für Numerische Simulation mbh, Braunschweig, 2012