

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT
INSTITUT FÜR INFORMATIK

Teamstrategie und -koordination im Kontext des Roboterfußballs

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplominformatiker

eingereicht von: Philipp Strobel

geboren am: 24.11.1986

geboren in: Berlin

Gutachter/innen: Prof. Dr. Verena V. Hafner

Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard

eingereicht am: verteidigt am:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Beitrag der Arbeit	2
1.2	Struktur der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Begriffe	5
2.2	Aspekte der Teamkoordination	10
2.2.1	Explizit – Implizit	10
2.2.2	Zentral – Dezentral	11
2.2.3	Spezialisierung – Generalisierung	14
2.2.4	Teamkommunikation	14
2.3	Ziele der Teamkoordination	15
2.4	Verwandte Arbeiten	18
3	Werkzeuge	23
3.1	RobotControl	23
3.2	MultiAgent-Dialog	24
3.3	Datensammlung	24
3.4	RoboCup Data Explorer	26
3.5	Simulation (Simsark)	29
4	Teamkoordination	31
4.1	Zeitsynchronisation	31
4.1.1	Notwendigkeit der Zeitsynchronisierung	31
4.1.2	Network Time Protocol (NTP)	32
4.1.3	Simple Network Time Protocol (SNTP)	34
4.1.4	Synchronisierung im Nao-Team Humboldt	34
4.2	Teamball	36
4.2.1	Es dreht sich alles um einen Ball	36
4.2.2	Teamball als Durchschnitt	38
4.2.3	Teamball als Cluster	38
4.2.4	Zukünftige Optimierungen	40
4.3	Statische Koordination	41
4.3.1	Diskussion	43

4.4	Dynamische Koordination	45
4.4.1	Rollenabstimmung (Assignment)	46
4.4.2	Positionierung	53
4.4.3	Dynamische Rollen	58
4.4.4	Verhalten	65
5	Experimentelle Auswertung	67
5.1	Datenauswertung	67
5.2	Simulationsergebnisse	70
5.2.1	Auswertung der Simulationsvarianten	71
5.2.2	Auswertung nach Zeitpunkt des Rollenwechsel	75
5.2.3	Auswertung nach Rollenwechselbedingung	76
5.2.4	Auswertung verschiedener Aufstellungen	79
5.2.5	Zusammenfassung	81
5.3	GermanOpen 2019	83
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
6.1	Zusammenfassung	87
6.2	Ausblick	90

Abstract

This thesis is about the development and analysis of team strategies and team coordination in the context of robot soccer. In the past years the focus of the Standard Platform League (SPL) has been on the basic problems of humanoid robots playing soccer, such as stable walking on artificial turf, detection of a black/white ball, or localization and orientation on a symmetrical soccer field. These problems have now been solved by the top teams and only small improvements can be made. In order to gain a greater advantage, the focus shifts to team strategy and player coordination instead.

In the Nao-Team Humboldt (NaoTH) the cooperation of the players has only been rudimentarily. This thesis sets the foundations for a team strategy and team coordination in the Nao-Team Humboldt. On the one hand, the concept of roles in the team is introduced and different methods for the role change are implemented. On the other hand, different forms of positioning and organisation of players are developed. The implemented algorithms are tested and evaluated in both: in the simulation and in real competition games. In the competition games the role change has proven to be very effective and the simulation results also show, that the role change and the dynamic positioning is superior to the version without roles and without dynamic positioning.

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Einordnung, Entwicklung und Analyse von Teamstrategien und der Teamkoordination im Kontext des Roboterfußballs. In der Standard Platform League (SPL) lag bisher der Fokus auf den grundlegenden Problemen von fußballspielenden humanoiden Robotern, wie zum Beispiel dem stabilen Laufen auf künstlichem Rasen, der Erkennung eines schwarz-weißen Balls oder die Lokalisierung und Orientierung auf einem symmetrischen Spielfeld. Diese Probleme sind von den Top Teams mittlerweile gelöst und es lassen sich nur noch wenige Verbesserungen erzielen, die zwischen Sieg oder Niederlage entscheiden. Um sich einen größeren Vorteil zu verschaffen, rückt stattdessen der Fokus auf die Teamstrategie und die Koordination der Spieler zueinander.

Auch im Nao-Team Humboldt (NaoTH) wurde sich bisher nur rudimentär mit der Zusammenarbeit der Spieler beschäftigt. In dieser Arbeit werden die Grundlagen für eine Teamstrategie und Teamkoordination im Nao-Team Humboldt gelegt. Zum einen wird das Konzept der Rollen im Team eingeführt und verschiedene Varianten für den Rollenwechsel implementiert. Zum anderen werden verschiedene Formen der Positionierung und der Organisation des Teams auf dem Spielfeld entwickelt. Die implementierten Varianten werden sowohl in der Simulation als auch in echten Wettkampfspielen getestet und evaluiert. Im Wettkampf hat sich der Rollenwechsel als sehr effektiv erwiesen. Ebenso zeigen die Simulationsergebnisse, dass sowohl der Rollenwechsel als auch die dynamische Positionierung gegenüber dem Stand ohne Rollen und ohne dynamische Positionierung überlegen ist.

1 Einleitung

RoboCup ist eine internationale Initiative zur Erforschung und Weiterentwicklung von Robotern, künstlicher Intelligenz und Machine Learning. RoboCup ist in mehrere Ligen unterteilt, deren jeweiliger Schwerpunkt in einem anderen Themenfeld liegt (Soccer, Rescue, @Home, Industrial, Junior). Um den Fortschritt und die Weiterentwicklung voranzutreiben, ändern die Ligen ihre jeweiligen Regeln. Für die Fußballligen ist das ausgerufene Ziel, bis 2050 Roboter gegen den amtierenden Fußballweltmeister spielen zu lassen und zu gewinnen.

Das Nao-Team Humboldt (NaoTH) nimmt seit 2009 erfolgreich an der „Standard Platform League“ (SPL) teil. In dieser Liga spielen 5 gegen 5 humanoide Nao-Roboter autonom Fußball gegeneinander. Der Nao-Roboter ist ca. 50cm groß, hat nur beschränkte Rechenleistung und wird von allen Teams der SPL eingesetzt. Der Fokus liegt damit auf dem Wettkampf der Algorithmen und nicht auf dem Vor- oder Nachteil der eingesetzten Hardware.

In der SPL wurde zu Beginn auf einem kleinen Feld mit farblichen Positionsmarken, einem roten Ball und drei Spielern gespielt. Aktuell (2019) wird auf einem 9m x 7m messenden Feld ohne farbliche Positionsmarken, mit einem schwarz-weißen Ball 5 gegen 5 gespielt. Die neuste Regeländerung betrifft die Teamkommunikation. Konnte bisher bis zu drei Mal pro Sekunde mit den Teammitgliedern per WLAN kommuniziert werden, ist seit diesem Jahr die Kommunikation auf einmal pro Sekunde beschränkt. Verstöße werden mit Zeitstrafen geahndet. Diese Änderung hat zur Folge, dass der bisherige Ansatz – soviel wie möglich mit den Teammitgliedern zu kommunizieren – nicht mehr bzw. nur noch eingeschränkt möglich ist. Entsprechend müssen die Teams ihre Kommunikationsstrategie ändern und anpassen. Neben dem verlängerten Sendeintervall spielen auch technisch bedingte Verzögerungen (Latenz) eine Rolle. Daher synchronisieren sich die Roboter untereinander, um die Latenz der WLAN-Kommunikation ausgleichen zu können.

Die Herausforderungen für den Roboter sind vielfältig: er muss in der Lage sein, allein stabil zu laufen und schießen zu können, die Bilder beider Kameras und der Sensordaten müssen verarbeitet und die notwendigen Schlussfolgerungen gezogen werden, außerdem muss sich der Roboter orientieren und lokalisieren können und sich zusätzlich mit seinen Teammitgliedern absprechen. Die etablierten Teams haben diese grundlegenden Herausforderung soweit gelöst. Das heißt, die Roboter schaffen es, sich sicher auf dem Feld zu bewegen und selbst bei Zusammenstößen nicht hinzufallen bzw. schnell wieder aufzustehen. Auch die Orientierung und Lokalisierung sowie die Ballerkennung stellt nur

1 Einleitung

eine geringe Herausforderung dar. Damit sind die Unterschiede zwischen den führenden Teams klein und größere Leistungssprünge können auf diesen Gebieten nicht mehr erreicht werden.

Dabei wurde den Themen Teamkoordination und Teamstrategie bisher nur wenig Beachtung geschenkt. Denn nur noch mit guter Positionierung als Team und mit gezielten Pässen und Schüssen lässt sich ein guter Gegner ausspielen bzw. am Torschuss hindern. Dies kann nur gelingen, wenn die genannten Grundlagen (Laufen, Lokalisierung, Ballerkennung) funktionieren. Erkennt ein Team den Ball nicht, kann auch die beste Strategie nichts mehr ausrichten.

Um die Teamstrategie und -koordination weiter voranzutreiben, wurde in der SPL 2017 der Mixed-Team-Wettkampf eingeführt. Dabei sollen sich zwei Teams zusammenfinden und mit jeweils drei Robotern gemeinsam gegen ein anderes Mixed-Team spielen. Die Herausforderung hierbei ist, dass trotz unterschiedlicher teaminterner Strategien zusammengespielt werden muss.

Es ist absehbar, dass zukünftig auch das Feld vergrößert wird. Damit ist es für einen einzelnen Roboter nicht mehr möglich, das gesamte Feld zu überblicken. Außerdem ist der Energieverbrauch und die Erhitzung der Gelenke sehr viel größer, wenn ein einzelner Roboter den Ball über das gesamte Feld dribbelt. Eine gute Strategie und ein gutes Zusammenspiel kann die Probleme auf einem großen Feld durch optimale Aufstellung, gutes Passspiel – ein Pass ist immer schneller als den Ball selbst nach vorne zu dribbeln (Gegner ausspielen) –, optimale Feldabdeckung und angepasste Kommunikation vollständig vermeiden.

Die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen liegen damit bei der Teamstrategie und -koordination sowie bei der Antizipation von eigenen und gegnerischen Spielern.

1.1 Beitrag der Arbeit

In dieser Arbeit werden die Begriffe Teamstrategie und -koordination im Kontext des Roboterfußballs eingeordnet und der Stand im Nao-Team Humboldt diskutiert.

Es werden sowohl Werkzeuge zur Konfiguration und Analyse eines Teams von Robotern als auch zur Durchführung simulierter Spiele entwickelt. Zur besseren Absprache der Roboter untereinander wird ein Verfahren zur Synchronisierung dieser implementiert. Zusätzlich müssen sich die Spieler auf einen gemeinsamen Ball einigen, um daran ihre gemeinsame Strategie auszurichten. Daher wird ein Verfahren implementiert, mit dem sich die Spieler auf einen gemeinsamen Teamball einigen können.

Der Hauptteil ist der Entwicklung neuer Strategien im Roboterfußball, der Testdurch-

führung und der Auswertung gewidmet. Dazu werden Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse empirisch ausgewertet. Weiterhin wird der reale Einsatz der entwickelten Algorithmen und Strategien bei der GermanOpen 2019 analysiert und bewertet.

Darüber hinaus lassen sich komplexe Algorithmen, wie die Teamstrategie, nur mit umfangreich aufgezeichneten und gesammelten Daten analysieren und bewerten. Entsprechend wird in der Arbeit auf die Sammlung, Aufbereitung und Auswertung solcher Daten eingegangen.

1.2 Struktur der Arbeit

Zu Beginn werden die Begriffe Teamstrategie, Teamkoordination und Teampositionierung definiert und eingeordnet sowie erläutert, was eine gute bzw. erfolgreiche Strategie darstellt (Abschnitt 2.1). Anschließend werden verwandte Arbeiten und Publikationen aus anderen Ligen vorgestellt und der Unterschied zur SPL dargelegt (Abschnitt 2.4).

Als Mensch ist man es gewohnt, ohne Verzögerung auf dem Feld miteinander zu sprechen. Die Roboter kommunizieren über WLAN. Dies bringt allerdings Verzögerungen mit sich, die bei der Verarbeitung der empfangenen Informationen beachtet werden müssen. In Abschnitt 4.1 wird beschrieben wie sich die Roboter untereinander verständigen und welches Verfahren zur Synchronisation verwendet wird.

Die Konfiguration und Fehlersuche für ein gesamtes Team stellt eine neue Herausforderung dar. Entsprechend mussten neue Werkzeuge entwickelt werden, die ein gesamtes Team gleichzeitig konfigurieren und die Auswertung der aufgezeichneten Daten aller Spieler ermöglichen. Die implementierten Werkzeuge werden in Abschnitt 3 vorgestellt.

Im Fußball dreht sich alles um einen einzigen Ball. Entsprechend sollte das Team sich auf einen Ball einigen können, auch wenn mehrere Roboter vermeintlich unterschiedliche Bälle kommunizieren. Das implementierte Verfahren, wie sich die Roboter auf einen Ball (Teamball) einigen können, wird in Abschnitt 4.2 beschrieben.

In Abschnitt 4.3 wird die im Nao-Team Humboldt aktuell verwendete Strategie erläutert. Anschließend wird die neu implementierte Strategie und die dafür notwendigen Voraussetzungen vorgestellt (Abschnitt 4.4).

Im Anschluss wird die Anwendung der neuen Strategie sowohl in der Simulation (Abschnitt 3.5) als auch auf dem realen Roboter während der GermanOpen 2019 beschrieben (Abschnitt 5.3). Die Auswertung sowie Bewertung der neuen dynamischen Strategie bzgl. der statischen Strategie wird in Abschnitt 5 vorgenommen.

Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Entwicklungsmöglichkeiten gegeben (Abschnitt 6).

2 Grundlagen

2.1 Begriffe

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe im Kontext des Roboterfußballs bzgl. Strategie und Teamspiel erläutert und deren Zusammenhang untereinander dargelegt. Es werden zu Beginn die allgemeinen Begriffe Strategie, Zusammenspiel, Koordination, Taktik, Formation und Rolle beschrieben. Anschließend werden verschiedene Aspekte, die ein Team zusammen durchführen und damit schneller als ein einzelner Spieler ausführen kann, als Teil der Teamstrategie dargestellt. Insbesondere sind das die Pfeifenerkennung als Team, die Einigung auf einen Ball (Teamball), die Suche nach dem Ball, wenn keiner der Spieler den Ball sieht, und die Positionierung als gesamtes Team auf dem Feld.

Strategie

Eine Strategie beschreibt allgemein einen (längerfristigen) Plan zur Erreichung eines bestimmten Ziels. Die Teamstrategie bezieht das gesamte Team in der Planung mit ein, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Bezogen auf (Roboter-)Fußball ist das gemeinsame Ziel, so viel Tore wie möglich zu schießen und gleichzeitig den Gegner selbst daran zu hindern, Tore zu schießen. Dabei lässt sich eine Spielstrategie in weitere Kategorien, wie beispielsweise offensive und defensive Strategien unterteilen. Die Strategie kann außerdem während eines Spiels, je nach Spielsituation, angepasst werden. Häufig fällt im Zusammenhang mit der Strategie der Begriff „Locker-Room Agreement“. Damit bezeichnet man die Übereinkünfte, die vor dem Spiel oder während der Halbzeitpause in der Kabine getroffen werden. Bezogen auf den Roboterfußball, kann das „Locker-Room Agreement“ als Konfiguration der Strategieparameter aufgefasst werden. Dabei wird festgelegt, wie die Spieler aufgestellt werden und welches Verhalten die Roboter in bestimmten Situationen ausführen sollen. Allgemein bezieht sich das „Locker-Room Agreement“ auf vordefinierte Aktionen und Set-Plays.

Teamkoordination und Zusammenspiel

(Team-)Koordination bzw. Zusammenspiel ist Teil der Teamstrategie und beschreibt, wie sich die Spieler untereinander und zueinander verhalten. In die Teamkoordination fließen Wahrnehmung, Kommunikation, Taktik, Formation und Rollen ein und fassen diese Information zu einer einheitlichen Formulierung zusammen. Während die Teamkoordination vorwiegend das gesamte Team – mindestens mehrere Spieler – umfasst,

2 Grundlagen

kann ein Zusammenspiel auch auf zwei Spieler eingeschränkt werden und nur einen Ausschnitt der gesamten Teamkoordination (bspw. Passspiel) beschreiben.

Zum Beispiel kann das Zusammenspiel zweier angreifender Spieler auf zwei Arten beschrieben werden. Es gibt den „Striker“, der den Ball vorträgt, und es gibt einen „Supporter“. Dieser kann sich sowohl offensiv als auch defensiv positionieren. Beim offensiven Spiel positioniert sich der Supporter für ein Passspiel. Beim defensiven Spiel sollen die Ballverluste des „Strikers“ abgefangen werden.

Taktik

Die Taktik kann sowohl auf der Ebene der Teamstrategie beschrieben werden – wie das Team sich als Ganzes verhalten soll – als auch auf der Ebene der Koordination oder der individuellen Aktionen in bestimmten Situationen. In dieser Arbeit wird die Taktik auf der Ebene einzelner Spieler eingeordnet. Dabei legt die Taktik fest, wie sich der oder die Spieler in bestimmten Situationen verhalten sollen. Im Gegensatz zur Strategie kann sich die Taktik häufiger und von Spiel zu Spiel ändern. Das ermöglicht, sich auf bekannte Gegner einzustellen und auf dessen Stärken bzw. Schwächen besser reagieren zu können. Zum Beispiel ist es für Gegner mit langen Schüssen sinnvoll, das Feld möglichst großflächig abzudecken, um jederzeit den Ball abzufangen und in jedem Teil des Feldes schnell am Ball zu sein. Im Gegensatz dazu sollte sich das Team bei dribbelnden Gegner um den Ball zusammenziehen und damit ein Durchdribbeln erschweren. Außerdem sollten sich einzelne Spieler auf dem Feld strategisch verteilen, um damit wiederum den Gegner im eignen Angriff leichter auszuspielen.

Set-Play

Eng mit der Taktik verbunden ist das sogenannte „Set-Play“. Dabei wird in definierten Spielsituationen eine Aufstellung der Spieler und das auszuführende Verhalten festgelegt – im Gegensatz zu taktischen Spielzügen im laufenden Spiel. Beispielsweise wird bei einem Anstoß ein zuvor definiertes Set-Play verwendet. Dazu stellen sich die Spieler bei einem eigenen Anstoß so auf, dass der vorderste Spieler diesen durchführt. Bei einem gegnerischen Anstoß kann je nach Team eine andere Aufstellung gewählt werden, um damit den Weg zu blockieren und einen direkten Torschuss zu verhindern. Ein Set-Play ändert sich nur selten, da über lange Zeit die beste Aufstellung gefunden wurde und praktische Anwendung gezeigt hat, dass ein bestimmtes Set-Play funktioniert und effektiv ist. Weitere Set-Plays können beim Einwurf („Kick-In“), Eckanstoß („Corner Kick“), Torwartanstoß („Goal Free Kick“) oder beim Freistoß („Pushing Free Kick“) durchgeführt werden.

Formation

Eine Formation ist die Anordnung der Spieler zueinander auf dem Feld. Dabei kann die Formation über das gesamte Spiel hinweg statisch oder auch dynamisch sein. Bei einer statischen Formation behalten die Spieler ihre Position bei und weichen nur davon ab, wenn die Spielsituation es erfordert. In dynamischen Formationen können die Spieler ihre Position abhängig vom Spielverlauf bzw. von der Spielsituation verschieben. Damit verliert man unter Umständen eine gute Feldabdeckung, gewinnt aber im Gegenzug ein reaktives und auf die Spielsituation angepasstes Verhalten. Beispielsweise können mehrere Spieler versuchen, das eigene Tor zu verteidigen und andere Spieler sind passbereit für einen schnellen (Gegen-)Angriff. Eine Formation kann dabei eine beliebige Form annehmen, sollte aber auf den Gegner angepasst werden, um dessen Stärken zu schwächen und dessen Schwächen auszunutzen.

Rollen

Im Fußball wird dem Spieler je nach Fähigkeit eine bestimmte Rolle oder Rollengruppe zugeordnet. So gibt es die Unterteilung in Torwart, Abwehrspieler, Mittelfeldspieler und Stürmer. Diese Rollengruppen werden weiter unterteilt in innen, außen, offensiv und defensiv.

Im Roboterfußball, insbesondere in der SPL, wird nur 5 gegen 5 gespielt. Entsprechend müssen die Rollen(-gruppen) angepasst werden. Es kommen hierbei die Gruppen Torwart (Goalie), Abwehr (Defender), Mittelfeld (Midfielder) und Stürmer (Forward) zum Einsatz und die Gruppen werden, bis auf den Goalie, in Links, Mitte, Rechts unterteilt. Zusätzlich lassen sich weitere Rollen mit besonderem Verhalten definieren. So ist der Spieler direkt am Ball der sogenannte „Striker“. Ein unterstützender Spieler für den „Striker“ oder „Goalie“ ist der „Supporter“.

Im Gegensatz zum echten Fußball, in dem das Können die Einsetzbarkeit eines Spielers in eine bestimmte Rolle vorrangig definiert, kann jeder Roboter jede Rolle übernehmen, da sie an sich nur geringe Unterschiede aufweisen. Zur einfachen Beschreibung des Verhaltens ist es trotzdem sinnvoll, den Robotern Rollen zuzuordnen und darüber dessen Verhalten zu definieren.

Tatsächlich gibt es aber auch unter den Robotern Unterschiede, die die Festlegung auf eine bestimmte Rolle bzw. Position rechtfertigen. So hat das Alter bzw. der Gelenkverschleiß der Roboter Einfluss auf das Laufverhalten. Ein neuer oder reparierter Roboter läuft stabiler als ein Roboter mit verschlissenen Gelenken. Auch während des Spiels kann es sinnvoll sein, dass bestimmte Roboter ihre Rolle wechseln. Legt ein Spieler viel Distanz zurück, wird sein Laufverhalten aufgrund der Gelenkerwärmung

instabil, für diesen würde sich im Laufe des Spiels eine Rolle eignen, die weniger Laufleistung erfordert. Auch der Akkustand könnte bei der Rollenzuordnung einfließen. Je mehr Laufleistung ein Roboter hat, umso höher ist auch sein Energieverbrauch. Entsprechend kann sich während des Spiels auch die Rollenzuordnung so ändern, dass der Spieler mit den höchsten Akkustand und der geringsten bisherigen Laufleistung die Rolle mit den höchsten Ansprüchen einnimmt.

Eine weitere Besonderheit im Roboterfußball ist, dass Bestrafungen von Spielern mit Zeitstrafen geahndet werden. Dazu werden die bestraften Spieler für mindestens 45 Sekunden aus dem Spiel genommen. Mit jeder weiteren Strafe erhöht sich dabei die auszusetzende Zeit. Andererseits können Roboter durch Hardware- und Softwarefehler ausfallen und vom Spielfeld genommen werden. Damit kommt es häufiger vor, dass nicht die gesamte Mannschaft auf dem Feld steht und einige Rollen und dessen Positionen unbesetzt sind. Die verbleibenden Spieler sollten darauf vorbereitet sein und wichtige Rollenpositionen als Erstes besetzen bzw. die Taktik oder Aufstellung insgesamt an die Spielerzahl anpassen.

Teampfeife

Bei jedem Anstoß wird das Spiel von einem Schiedsrichter angepfeifen. Entsprechend kann die Pfeifenerkennung als weiterer Aspekt für eine gemeinsame Entscheidung im Team gesehen werden. Dazu nimmt jeder Roboter einzeln die Pfeife wahr und kommuniziert, wann die Pfeife wahrgenommen wurde. Das Team kann mittels Mehrheitsentscheid gemeinsam festlegen, ob das Spiel tatsächlich angepfeifen ist. Dabei sollte nicht nur einfließen, ob eine Pfeife erkannt wurde, sondern auch wann und aus welcher Richtung. Die gemeinsame Entscheidung verhindert insbesondere die Bestrafung bei falsch erkannter Pfeife. Eine fehlerhaft wahrgenommene Pfeife hat den erheblichen Nachteil, dass gleich zu Beginn ein oder mehr Spieler bestraft werden. Spieler, die sich zu früh wegen einer fehlerhaften Pfeifenerkennung bewegen, erhalten eine Zeitstrafe und dürfen für 15 Sekunden nicht am Spiel teilnehmen.

Gleichzeitig ermöglicht die gemeinsame Pfeifenerkennung, dass alle Spieler den Anpfiff mitbekommen und verhindert damit einen verzögerten Spielbeginn.

Das größte Risiko bei der Teampfeife besteht darin, dass die Pfeife vom Team nicht oder zu früh erkannt wird. Bei ersterem wird das Team nach 10 Sekunden auf den Spielbeginn hingewiesen. Bei letzterem kann das gesamte Team für 15 Sekunden bestraft werden. Damit hat das gegnerische Team Zeit, den Ball in die eigene Hälfte zu spielen oder gar ein Tor zu schießen. Beide Varianten sollten vermieden werden und das Risiko durch strategisches Verhalten kompensiert werden. Beispielsweise kann ein

Spieler nach erkannter Teampfeife als „Tester“ eingesetzt werden. Falls dieser dann bestraft wird, wissen die restlichen Spieler, dass die Teampfeife falsch erkannt wurde. Im Nao-Team Humboldt gibt es noch keine gemeinsame Pfeifenerkennung, andere Teams hingegen nutzen bereits den Vorteil einer Teampfeife.

Teamball

Eine weitere Form der Zusammenarbeit ist der Teamball. Jeder Spieler agiert zunächst allein für sich und nimmt die Umgebung aus seiner Sicht wahr. Entsprechend sind die Schlussfolgerungen für jeden Spieler verschieden. Bezogen auf den Spielball sieht jeder Spieler „seinen“ Ball. Da es im Fußball aber nur einen Ball geben kann, muss sich das Team auf den sogenannten „Teamball“ einigen bzw. augenscheinlich gleiche Bälle zu einem Ball zusammenfassen. Die Herausforderung dabei ist, dass die Ballerkennung starkem Rauschen und Fehlwahrnehmung unterlegen ist. Es kann dabei vorkommen, dass ein Spieler in einem anderen Roboter oder auch in Linien glaubt, einen Ball zu sehen. Ein Teamball, der vom gesamten Team bestimmt wird, kann dabei helfen, solche Fehlerkennungen zu korrigieren und das Verhalten der Spieler anzupassen. Je besser die Ballerkennung und damit auch die Genauigkeit des Teamballs ist, umso komplexere Verhaltensvarianten können umgesetzt werden. So kann ein Spieler, ohne den Ball selbst zu sehen, sich so positionieren, dass er für einen Pass bereit steht oder gar selbst an den Ball gehen, wenn dieser in seiner Nähe ist. Da es im Fußball nur einen Ball gibt und das übergeordnete Verhalten sich an diesem Ball ausrichten muss, wird in Abschnitt 4.2 die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Teamball-Implementierung beschrieben.

Teamsuche

Wenn keiner der Spieler einen Ball sieht, muss nach diesem gesucht werden. Anstatt jeden Spieler einzeln für sich nach dem Ball suchen zu lassen, sollte das gesamte Team nach dem Ball suchen. Dazu kann die Suche aufgeteilt werden und jeder Spieler sucht einen bestimmten Bereich des Spielfeldes nach dem Ball ab. Damit wird verhindert, dass mehrere Spieler den gleichen Feldbereich mehrfach absuchen und ermöglicht ein schnelleres Auffinden des Balls. Dies kann auch durch eine optimale Aufstellung mit maximaler Feldabdeckung erreicht werden. Damit die Spieler wissen, in welchem Bereich sie suchen, müssen sich die Spieler explizit abstimmen oder aufgrund des selben Suchverhaltens wissen, wo welcher Spieler suchen sollte. Mit zunehmender Genauigkeit und Verbesserung der Ballerkennung kommt es viel seltener vor, dass keiner der Spieler einen Ball sieht. Entsprechend nimmt die Wichtigkeit der Teamsuche ab. Diese könnte allerdings in den nächsten Jahren wieder an Bedeutung gewinnen, wenn das Spielfeld

vergrößert wird, die Spieler nicht mehr das gesamte Feld überblicken können und damit häufiger den Ball aus den Augen verlieren.

Teampositionierung

Die Beschreibung der Teamstrategie erfolgt meist über die Festlegung der Position eines Spielers bzw. dessen Rolle. Entsprechend wird auch die Bewertung einer erfolgreichen Strategie häufig daran gemessen, wie „gut“ sich ein Spieler positioniert hat.

Damit bestimmt die Position der Spieler die eigentliche Strategie. Auch Taktik und Spielzüge können anhand der Position definiert und dargestellt werden. So lässt sich die Frage nach einem erfolgreichen Passspiel mit einer optimalen Positionierung beschreiben. In einer defensiven Strategie positionieren sich die Spieler kompakter in der eigenen Hälfte und vernachlässigen die Feldabdeckung. Hingegen versuchen die Spieler sich bei einer offensiven Strategie optimal auf dem Feld zu verteilen, um damit den Gegner ausspielen zu können.

2.2 Aspekte der Teamkoordination

Die Teamkoordination lässt sich in Kategorien untergliedern. Zum einen lässt sie sich in explizite und implizite Teamkoordination, in die Koordinationsinstanz (zentral / dezentral) und in spezialisiert oder generalisiert unterteilen. Ein weiterer Aspekt der Teamkoordination betrifft die Kommunikation. Ohne direkte oder indirekte Absprachen lässt sich nur schwer als Team zusammenspielen.

2.2.1 Explizit – Implizit

Die Teamkoordination lässt sich in implizite und explizite Teamkoordination einteilen. Dabei wird unter impliziter Teamkoordination, diejenige Koordination verstanden, die sich aus den Regeln bzw. aus einfachen Verhaltensaktionen ergibt. Im Roboterfußball führen häufig einfache Bedingungen zu impliziter Koordination. So ist eine implizite Koordination, wenn immer der Spieler an den Ball geht, der am dichtesten steht.

Unter expliziter Teamkoordination werden genau, für den einzelnen Spieler bzw. das gesamte Team, beschriebene Aktionen verstanden. Diese werden häufig auch als sogenanntes „Locker-Room Agreement“ [22] bezeichnet, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Aktion ausführen. So ist unter anderem die Anfangsaufstellung explizit definiert – jeder Spieler hat genau eine Position zu der er gehen muss. Auch dass der Torwart an den Ball geht, sobald dieser in der Nähe des eigenen Tores ist, wird explizit festgelegt. Allgemein kann man sogenannte „Wenn-Dann“-Definitionen als explizite

Koordination bezeichnen. Eine weitere Möglichkeit sich explizit zu koordinieren ergibt sich, wenn einzelne Spieler sich in bestimmten Situationen abstimmen müssen. So können sich zwei (oder mehr) Spieler darüber abstimmen, wer an den Ball geht oder zu wem gepasst wird.

Allgemein lässt sich sagen, je genauer die Aktionen für einen Spieler beschrieben werden, umso expliziter ist die Koordination. Und je einfacher die Regeln für ein gewünschtes Verhalten sind, umso impliziter ist sie.

2.2.2 Zentral – Dezentral

Eine weitere Form der Unterteilung der Teamkoordination betrifft die Art, wie sich das Team oder mehrere Spieler für bestimmte Aktionen entscheiden. Dabei kann die Entscheidung, wie sich im Team koordiniert wird, zentral von einem Spieler bzw. einem Beobachter getroffen werden oder dezentral von jedem Spieler einzeln.

Bei einer zentralisierten Entscheidung kann beispielsweise ein „Trainer“ vom Seitenrand das Spielgeschehen beobachten und je nach Spielsituation den Spielern entsprechende Befehle und Taktiken kommunizieren. In der SPL konnte von 2014 bis 2017 mit einem sogenannten „Coach“ am Seitenrand gespielt werden. 2018 wurde diese Regel allerdings verworfen, da kaum ein Team diese Möglichkeit nutzte. Einige Teams handeln stattdessen aus, welcher Spieler die Entscheidungen trifft. Dabei wird häufig eine einfache Heuristik verwendet, indem der Spieler mit der kleinsten Spielernummer, der aktiv auf dem Feld spielt, gewählt wird. Häufig ist das der Torwart. Dieser hat eine relativ feste Position und kann einen Großteil des Spielfeldes überblicken. Wird der aktuelle Entscheider aus dem Spiel genommen, z.B. aufgrund eines Hard- oder Softwarefehlers, oder eines begangenen Fouls, wird ein neuer Entscheider ermittelt bzw. festgelegt. Vorteil einer zentralen Entscheidungsinstanz ist, dass für jeden aktiven Spieler klar ist, wer die Befehle für eine neue Aktion gibt. Dabei sollte beachtet werden, auf welcher Ebene die Entscheidungen getroffen werden. Kurzfristig zu treffende Entscheidungen sollten von dem einzelnen Spieler getroffen werden. Will ein Spieler an den Ball gehen, sollte dieser nicht erst auf einen entsprechenden Befehl vom Entscheider warten müssen. Stattdessen legt der Entscheider die Taktik bzgl. der aktuellen Spielsituation fest und kann damit die Aufstellung oder das Vorgehen beim Offensivspiel beeinflussen. Ein weiterer Vorteil ist, dass jeder Spieler weiß, was zu tun ist. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass der Entscheider alle Informationen für die jeweilige Entscheidung braucht, um dann diese an die Mitspieler zu kommunizieren. Damit hängt die Geschwindigkeit mit der Entscheidungen getroffen werden können stark von der Qualität der Kommu-

nikationsverbindung ab. Bei einer schlechten Verbindung kann sich die Entscheidung entsprechend lang hinziehen bis alle Spieler wissen, was zu tun ist. Außerdem kann durch Ausfall des aktuellen Entscheiders eine neue notwendige Entscheidung zusätzlich verzögert werden, dabei muss klar sein, ab wann der aktuelle Entscheider „ausgefallen“ ist. Bei schlechter Kommunikationsverbindung kann es passieren, dass der aktuelle Entscheider als ausgefallen angenommen wird, obwohl seine Nachrichten schlicht nicht ankommen. Solche Fälle müssen ebenfalls bedacht und abgefangen werden.

Im Gegensatz dazu wird in der dezentralen Form die Entscheidung von jedem Spieler selbst getroffen. Dabei können sich ein oder auch mehrere Spieler zusätzlich explizit absprechen, z.B. welcher Spieler an den Ball geht und wer passbereit sein sollte. Eine explizite Absprache ist jedoch nicht notwendig und verzögert nur die Entscheidungsfindung. In der SPL kommunizieren die Spieler in festgelegten Intervallen miteinander. Dabei können alle notwendigen Informationen an alle Spieler übertragen werden, mit denen wiederum jeder Spieler eine Entscheidung treffen kann. Unter der Annahme, dass allen Spielern die gleichen Informationen zu Verfügung stehen, sollten alle Spieler zur gleichen Entscheidung gelangen und damit als Team zusammen agieren. Damit diese Variante funktioniert, ist es notwendig, dass der verwendete Entscheidungsalgorithmus für alle Spieler gleich ist, bzw. zumindest zu dem gleichen Ergebnis führt. In einem Team ist die Codebasis für alle Spieler gleich und die Voraussetzung leicht zu erfüllen. Sollen aber Spieler unterschiedlicher Teams zusammenspielen, müssen die Entscheidungsalgorithmen angepasst und es muss sichergestellt werden, dass alle Spieler zur gleichen Entscheidung gelangen.

Der Vorteil der dezentralen Koordinierung liegt in der schnelleren Entscheidungsfindung und dem reduzierten Kommunikationsaufwand. Damit können Spieler dynamischer auf bestimmte (lokale) Spielsituationen reagieren und sind anpassungsfähiger. Sollte sich doch einmal zwischen zwei (oder mehr) Spielern explizit abgesprochen werden müssen, so reicht es, dass nur diese Spieler sich absprechen und es muss nicht das gesamte Team einbezogen werden. Ein weiterer Vorteil kann darin gesehen werden, dass sich überhaupt nicht abgesprochen werden muss, sondern dass sich alle benötigten Informationen aus den eigenen Beobachtungen ermitteln lassen. Damit kann der Kommunikationsaufwand nochmals drastisch reduziert werden.

Von Nachteil ist hingegen, dass allen Spielern die gleichen Informationen zur Verfügung stehen müssen, damit sie die gleiche Entscheidung treffen. Ist das nicht der Fall, oder nur mit großer Verzögerung, kommen die Spieler zu unterschiedlichen Entscheidungen und agieren entsprechend nicht mehr gemeinsam. Insbesondere wenn die Spieler sich auf ihre eigenen Beobachtungen verlassen müssen, kann es zu Informationsasymmetrien

kommen, da der einzelne Spieler nur schwer das gesamte Spielfeld und das Spielgeschehen überschauen kann. Ein weiterer Nachteil liegt in der Verwendung gleicher Entscheidungsalgorithmen. So können Spieler aus unterschiedlichen Teams nur mit erhöhtem koordinatorischen Aufwand miteinander zusammenspielen. Einschränkend lässt sich hinzufügen, dass auch bei einer zentralisierten Variante für das Zusammenspiel von Spielern unterschiedlicher Teams Änderungen notwendig werden, um einen Entscheider zu wählen und die kommunizierte Entscheidung korrekt zu interpretieren.

Vergleicht man die beiden Varianten, zentral und dezentral, mit dem Verhalten menschlicher Spieler, so würde die dezentrale Variante mehr dem menschlichen Verhalten entsprechen. Innerhalb einer Mannschaft ist festgelegt, nach welcher Strategie das Team spielt. Das heißt, jeder Spieler weiß anhand der verfügbaren Informationen, welche Entscheidung er treffen sollte. Dabei nehmen die Spieler an, dass der Mitspieler eine ähnliche Entscheidung trifft wie man selbst. Liegen dem Mitspieler andere Informationen vor (z.B. durch einen verdeckten Ball oder Mitspieler) bzw. entscheidet sich der Mitspieler trotz gleicher Informationslage doch anders, kommt es zum Missverständnis und zu einem fehlerhaftem Zusammenspiel, ähnlich wie bei der dezentralen Robotervariante mit unterschiedlicher Informationslage bzw. Entscheidungsalgorithmus. Im Gegensatz zu den Robotern können menschliche Spieler hingegen ihre Fehlentscheidung schneller erkennen und korrigieren sowie aus der Spielsituation lernen. Die Roboter sind für diese Transferleistung noch nicht bereit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die dezentrale Entscheidungsfindung zu bevorzugen ist. Sie kann unabhängiger von der Kommunikationsqualität sein und schneller auf sich ändernde Spielsituationen reagieren. Ziel sollte es sein, dass der Roboter generalisierte Entscheidungsalgorithmen entwickelt, die für das eigene Team spezialisiert werden, gleichzeitig jedoch auch im Zusammenspiel mit Robotern anderer Teams angewandt werden können. Neben der expliziten Modellierung von Entscheidungsalgorithmen können auch Simulationen helfen Spielsituationen einzuschätzen. Dabei kann der Roboter ausgehend von seinem eigenen Verhalten bzw. Entscheidungsalgorithmus seine Mit- bzw. Gegenspieler anhand von der aktuellen Spielsituation vorwärts simulieren und mithilfe der simulierten Spielsituation eine aktuelle Entscheidung treffen. Damit nähert sich der Roboter dem menschlichen Verhalten an und ermöglicht zusätzlich die Anpassung für fehlerhafte Entscheidungen.

2.2.3 Spezialisierung – Generalisierung

Neben der Frage wie die Koordination definiert wird und wer die Koordinationsentscheidungen trifft, kann auch nach der Form der Spezialisierung bzw. Generalisierung unterschieden werden. Beim menschlichen Fußball werden die einzelnen Spieler anhand ihrer individuellen Fähigkeiten für bestimmte Aufgaben oder Positionen eingesetzt. Beim Roboterfußball, insbesondere in der SPL, sind die Spieler hingegen gleich, da sie sich in ihrer physischen Erscheinung, Sensor- und Aktionsmöglichkeiten nicht unterscheiden. Daher kann jeder Roboter für jede Aufgabe und Position eingesetzt werden. Auch für eine Position oder Rolle spezialisiertes Verhalten kann von jedem Roboter ausgeführt werden.

In der Humanoid Liga hingegen werden die Roboter von den Teams selbst gebaut. Damit können einzelne Spieler bestimmte Fähigkeit erlangen, die eine Spezialisierung im Verhalten ermöglichen und eine angepasste Strategie notwendig machen.

Aber auch in der SPL kann in spezialisiertes und generalisiertes Verhalten unterschieden und eine entsprechend angepasste Koordinierung eingesetzt werden. Das ist insbesondere in den Mixed-Team Wettkämpfen der Fall. Dort spielen Roboter unterschiedlicher Teams zusammen. Die Roboter der Teams haben verschiedene Stärken und Schwächen und sollten entsprechend unterschiedlich eingesetzt werden. Die Herausforderung dabei ist, dass die Spieler trotzdem miteinander zusammenspielen müssen. Demzufolge gibt es auch in der SPL spezialisierte Spieler, die generell aber zusammen spielen.

2.2.4 Teamkommunikation

Die Kommunikation ist ein wichtiger Bestandteil im Fußball. Im echten Fußballspiel kann ohne direkte Kommunikation gespielt werden. Die Spieler wissen aus Erfahrung und indirekten Hinweisen, wie sich Mitspieler verhalten werden und können ihr Spiel darauf anpassen. Dabei kann es aber immer wieder zu Situationen kommen, in denen die Intention des Mitspielers nicht eindeutig ist, wodurch es notwendig wird, direkt miteinander zu kommunizieren. Das kann durch visuelle Kommunikation (z.B. Handzeichen), Sprache oder Laute erfolgen. Die dabei vermittelte Information wird vom Mitspieler in jedem Fall unmittelbar wahrgenommen und steht diesem für seine Entscheidung zur Verfügung.

Im Roboterfußball funktioniert ein kommunikationsloses Spiel nicht. Dazu sind die Algorithmen zur Erkennung der Umwelt, die Interpretation davon und die Antizipation der Mit- und Gegenspieler noch nicht ausgereift. So wird ein Roboter nicht erkennen,

ob der ballführende Mitspieler schießen, passen oder doch lieber dribbeln will. Daher ist eine Absprache zwischen den Spielern in jedem Fall essentiell.

In den Regeln der SPL ist dafür die Kommunikation über WLAN in einem definierten Format festgelegt. Jeder Spieler eines Teams darf nur bestimmte Datenmengen und in bestimmten Zeitintervallen kommunizieren. Im Jahr 2019 wurden die Regeln geändert und ein Spieler darf nur noch einmal pro Sekunde eine neue Nachricht senden. Entsprechend herausfordernder ist es, kurzfristige Absprachen untereinander zu treffen.

Zusätzlich zu den begrenzten Sendeintervallen kommen noch technisch bedingte Verzögerungen und Übertragungsschwankungen im WLAN-Netzwerk hinzu. Diese sind zudem nicht konstant und können sich im Laufe des Spiels ändern.

Damit ist eine explizite Absprache in kurzer Zeit nicht möglich und ein Informationsaustausch in Echtzeit, ähnlich den menschlichen Spielern, kann so nicht eingehalten werden. Stattdessen müssen die Roboter einplanen, dass die kommunizierten Informationen mindestens eine Sekunde und älter sein können. Auch für die implizite Kommunikation benötigen die Roboter einige grundlegende Informationen, z.B. die Position der Mitspieler auf dem Feld. Diese können aktuell noch nicht aus Beobachtungen gefolgert und müssen kommuniziert werden.

Damit die Roboter abschätzen können, wie alt empfangene Informationen sind, gibt es bereits etablierte Techniken in der Netzwerksynchronisation. Dabei werden die Uhren der Teilnehmer mit einer Referenzuhr synchronisiert. Außerdem wird an alle kommunizierten Nachrichten die Sendezeit des Roboters angefügt. Mit diesen Informationen (synchronisierte Uhren und Sendezeit), kann der Empfänger ermitteln, wie lang es gedauert hat, bis die Nachricht empfangen wurde. Das wiederum ermöglicht die Entscheidungen des Roboters entsprechend anzupassen.

2.3 Ziele der Teamkoordination

Das Ziel einer guten Teamstrategie und Teamkoordination ist in erster Linie Tore zu schießen und den Gegner daran zu hindern, selbst Tore zu erzielen. Es können aber auch weitere Aspekte des Roboterfußballspiels betrachtet und optimiert werden.

Fußball ist per Definition ein Teamspiel, entsprechend können nicht fünf einzelne Roboter jeweils für sich spielen. Stattdessen müssen entweder Regeln definiert werden, wie die Roboter sich koordinieren („Locker-Room Agreement“), oder die Roboter müssen sich untereinander absprechen und sich anhand der Absprache entsprechend aufzustellen. Daher ist ein Ziel der Teamkoordination festzulegen, wie sich die Spieler positionieren und wie sie sich gezielt in bestimmten Situationen absprechen können

(siehe Abschnitt 2.2.1). Da sich im Roboterfußball über WLAN miteinander abgesprochen wird, müssen auch die technischen Beschränkungen beachtet und in der Teamkoordination einbezogen werden (Synchronisierung).

Ein weiterer Punkt bzgl. Teamstrategie und -koordination betrifft die Belastung der Spieler. Im Roboterfußball besteht die Belastung hauptsächlich aus den zurückgelegten Laufwegen der Spieler. Je mehr ein Spieler laufen muss, umso höher ist sein Energieverbrauch und umso mehr erwärmen sich seine Gelenke. Damit kann es im schlimmsten Fall dazu kommen, dass die Akkuleistung nicht für ein Spiel ausreicht und der Spieler ausgewechselt werden muss. Jeder Wechsel dauert einige Minuten, in denen die restlichen Spieler in Unterzahl spielen müssen.

Die Gelenkerwärmung hingegen führt dazu, dass der Roboter instabil wird und nicht mehr gut laufen kann. Das äußert sich in vermehrtem Hinfallen und häufigeren Pausen, in denen sich der Roboter stabilisieren muss. Daher ist ein Ziel der Teamkoordination, die Laufleistung auf das gesamte Team zu verteilen, damit einzelne Roboter nicht überbelastet werden und im Spiel ausfallen. Dies kann durch gute Absprachen und Aufstellungen erreicht werden. Dabei können Spieler ihre Positionen dynamisch wechseln und sich darüber absprechen, welcher Spieler an den Ball geht. Je besser die Absprache ist, umso weniger unnötige Laufwege müssen die Spieler zurücklegen.

Damit ein Zusammenspiel überhaupt zustande kommt, sollten die Spieler das gleiche Ziel haben. Im Roboterfußball sieht jeder Spieler zunächst aus seiner Sicht einen Ball. Durch Fehlwahrnehmung und fehlerhafte Ballerkennung kann es vorkommen, dass das Team glaubt mehrere unterschiedliche Bälle zu erkennen. Für ein Zusammenspiel muss sich daher auf einen Ball geeinigt werden, an dem die Teamstrategie ausgerichtet wird (Teamball).

Der Teamball kann auch bei der Ballsuche verwendet werden. Jeder Spieler versucht für sich den Ball zu finden. Da ein Spieler aber nicht das gesamte Spielfeld überblicken kann, muss er sich darauf verlassen, dass andere Spieler den Ball sehen. Sieht keiner der Spieler einen Ball, sucht das gesamte Team nach diesem. Damit sich die Spieler nicht gegenseitig behindern und Feldbereiche mehrfach absuchen, sollte sich das Team absprechen, wer in welchem Bereich nach dem Ball sucht. Damit kann die Zeit, in der das Team den Ball nicht sieht, stark reduziert werden. Außerdem werden die Laufwege auf das Team verteilt und die Belastung des Einzelnen reduziert.

Ein weiteres Ziel der Teamkoordination ist die Aufstellung im offensiven und defensiven Spiel. Dabei können bereits durch einfache Aufstellungen in Set-Plays Vorteile geschaffen werden und durch vorausschauende Positionierung Laufwege reduziert werden.

In der Offensive ist es einfacher, durch gute Positionierung als Team, den Gegner auszuspielen, als allein zu versuchen, sich gegen zwei oder mehrere gegnerische Spieler durchzusetzen. Durch gemeinsames Passspiel lassen sich die Gegner ausspielen und gleichzeitig den Ball schneller vortragen.

Auch im defensivem Spiel hilft eine gute Aufstellung. Dabei ist das Ziel, den Gegner beim Ballvortrag zu stören oder gar den Ball abzunehmen. In jedem Fall soll ein gegnerisches Tor verhindert werden. Die einfachste Variante dafür ist, wenn sich die Spieler auf direkter Linie zwischen Ball und Tor stellen, um damit einen direkten Torschuss abzuwehren. Dabei können sich nicht alle Spieler auf die gleiche Position stellen und es muss sich entsprechend koordiniert werden.

Insbesondere im Roboterfußball spielt der Ausfall einzelner Spieler eine große Rolle. Zum einen können die Roboter wegen eines Software- bzw. Hardwarefehlers ausfallen und zum anderen gibt es Zeitstrafen, wenn ein Regelverstoß begangen wurde. In dieser Zeit spielen die restlichen Spieler in Unterzahl und sind damit im Nachteil. Um diesen Nachteil teilweise zu kompensieren, kann eine entsprechende Teamstrategie so angepasst werden, dass sich die Spieler neu positionieren und so weiterhin das Feld gut abdecken bzw. offensiv und defensiv gut aufgestellt sind.

Neben der Anwendung einer Teamstrategie sollte diese auch bewertbar sein. Dabei ist ein grundlegendes Problem, dass eine Auswertung häufig auf statistischen Maßen beruht und dafür eine größere Anzahl von auszuwertenden Spielen vorliegen müssen. Im Roboterfußball ist das nicht in ausreichendem Maß möglich. Zum Beispiel hat das Nao-Team Humboldt während der GermanOpen 2019 gerade einmal vier Wettkampfs Spiele absolviert. Über das Jahr hinweg werden durchschnittlich 23 Spiele durchgeführt (2016: 27, 2017: 22, 2018: 20). Neben der geringen Spielanzahl ist auch die Vergleichbarkeit zwischen den Veranstaltungen nur bedingt möglich, da die äußeren Umstände (Beleuchtung, Untergrund, Sichtbarkeit der Linien) einen starken Einfluss auf die Handlungen der Roboter haben. Überdies entwickeln andere Teams ihr Spiel ebenfalls laufend weiter, was wiederum eine vergleichbare Auswertung erschwert.

Zusätzlich zu den regulären Wettkampfspielen führen die Teams häufig auch Testspiele durch. Diese dienen allerdings vorwiegend dem Testen der grundlegenden Algorithmen. Außerdem wird versucht, den Schaden durch Zusammenstöße und Hinfallen so klein wie möglich zu halten, weswegen entsprechend häufig eingegriffen wird. Damit kommt allerdings kein richtiges Zusammenspiel zustande und die Strategie kann nicht in allen Situationen getestet werden. Stattdessen werden nur ausgewählte Situationen durchgeführt und nach Bauchgefühl bewertet. Hinzu kommt, dass Testspiele außerhalb von Wettkämpfen nur gegen das eigene Team, mit weniger Spielern oder gegen ein leeres

Feld gespielt werden. Damit lässt sich nur schwer beurteilen, wie sich eine Strategie gegen andere Teams durchsetzt.

Neben den genannten Vorteilen einer Teamstrategie gibt es auch Nachteile. Insbesondere der höhere Kommunikationsaufwand und die notwendige Synchronisierung erschweren eine Entscheidungsfindung. Dazu kommt die höhere Komplexität, die eine Strategie mitbringt, wenn viele Situationen abgedeckt werden sollen sowie ein entsprechend komplexeres Verhalten. Auch der Koordinationsaufwand steigt und muss vor jedem Spiel eingeplant werden.

Im Nao-Team Humboldt können bestimmte Aspekte einer Teamstrategie aktuell nicht umgesetzt werden. Das betrifft zum einen die Einbindung von gegnerischen Spielern in die strategische Ausrichtung und zum anderen das Passspiel.

Aufgrund einer fehlenden Gegnererkennung kann das Team diese nicht in seinen Entscheidungen beachten und die Strategie entsprechend anpassen. So weiß das Team nicht, ob der ballführende Spieler gerade offensiv spielen sollte oder, weil das gegnerische Team gerade in Ballbesitz ist, defensiv. Stattdessen sollte immer davon ausgegangen werden, dass der Gegner in Ballnähe ist und eine entsprechend defensive Aufstellung eingenommen werden sollte.

Ein echtes Passspiel ist zur Zeit auch nicht möglich, weshalb eine offensive Aufstellung nur opportunistisch erfolgen kann, in der Hoffnung dass der Ball mit größerer Wahrscheinlichkeit auf die entsprechende Position gespielt wird.

Abgesehen von diesen Einschränkungen lassen sich die anderen genannten Ziele auch im Nao-Team Humboldt umsetzen und damit eine erfolgreiche Teamstrategie und -koordination erreichen.

2.4 Verwandte Arbeiten

Das Feld der Kooperation und Zusammenarbeit von verschiedenen autonomen Systemen („Multi-Agenten-Systemen“ [MAS]) ist sehr groß und in der Anwendung vielfältig. So gibt es Anwendungen im Softwarebereich, die die Verwendung geteilter Ressourcen optimieren, die im Netzwerkbereich die Last verteilen, in Computerspielen und im Internet allgemein allgegenwärtig sind (Suchmaschinen, Vergleichsportale, Verkaufsplattformen, usw.). Darüber hinaus finden sich Anwendungen in Industrie, Logistik und im relativ neuen Bereich des „Internet of Things“ (IoT), bis hin zu kleinen und großen Robotern (Schwarmverhalten, autonome selbstfahrende Autos, etc.).

Insbesondere Roboterfußball bietet sich als Test- und Evaluierungsumgebung für kooperierende, autonome Roboter an. Es gibt festgelegte Regeln und ein definiertes

Ziel: Tore schießen. Andererseits ist das Fußballspiel so dynamisch, dass klassische Probleme der Zusammenarbeit und gemeinsamen Zielerreichung getestet werden können. Unsicherheit und verrauschte Sensordaten sowie unvorhersagbare Aktionen des Gegners sind die Herausforderungen, die es zu lösen gilt.

Dazu hat sich bereits 1997 die international RoboCup-Vereinigung gegründet, in der sich verschiedene Universitäten und Forschungseinrichtungen organisieren, Erfahrungen austauschen und gegeneinander im Wettkampf antreten. Dazu findet in einem jährlich wechselnden Ausrichterland die Weltmeisterschaft mit angeschlossenem Symposium statt.

Die Fußballligen des RoboCups werden wie folgt unterteilt:

- **Simulations Liga:** Roboteragenten agieren in einer 2D bzw. 3D simulierten Umwelt, wobei die Sensoren und Aktuatoren nur bis zu einem gewissen Grad simuliert werden.
- **Small-Size Liga:** Es treten 15cm große, fahrende Roboterteams gegeneinander an, wobei die Kameraauswertung und Berechnung der Steuerbefehle von einer zentralen Instanz ausgeführt werden.
- **Standard-Platform Liga:** Alle Teams verwenden standardisierte, humanoide Roboter; der Fokus liegt auf der Erforschung effizienter Algorithmen mit eingeschränkter Rechenleistung.
- **Middle-Size Liga:** Von den Teams selbst gebaute, 80cm hohe, fahrende Roboter mit eigenen Sensoren und Rechenleistung.
- **Humanoid Liga:** Annähernd menschengroße, humanoide Roboter, die von den Teams selbst entwickelt und gebaut werden.

In jeder dieser Ligen ist die Koordination der Roboter ein wichtiger Bestandteil. Arbeiten die Roboter nicht zusammen, können verschiedene Probleme auftreten, wie beispielsweise das Phänomen des „Kiddie Soccer“. Dabei versuchen alle Spieler gleichzeitig den Ball zu spielen und behindern sich dadurch gegenseitig. Außerdem können bei fehlender Koordination Bereiche des Feldes unabgedeckt bleiben, so dass die Verteidigung geschwächt wird, oder Bereiche nicht in die Ballsuche einbezogen werden.

Die Simulationsliga hat ihren Schwerpunkt in der Entwicklung möglicher Teamstrategien und Agentkoordinierung. Entsprechend wurden dort bereits viele Arbeiten zu Themen veröffentlicht.

In [2], wurde mittels „Reinforcement Learning“ das Verhalten der Roboter im Fußballspiel erlernt. Dazu wurde das Verhalten in „Sub-Tasks“ unterteilt und die Anwendung dieser Tasks in Abhängigkeit der sich präsentierenden Umgebung versucht mit „Q-Learning“ zu lernen. Im Weiteren wurde versucht die gelernten Aktionen zu kombinieren. Dieser Ansatz setzt eine Instanz voraus, die für alle Agenten das koordinierende Verhalten lernt und anschließend die Steuerung an die einzelnen Agenten überträgt.

Andere Ansätze in der Simulationsliga haben sich mit der Entwicklung kooperativen Verhaltens mittels „Gentic Programming“ (GP) beschäftigt ([5]). Hier hat insbesondere Luke et al. in mehreren Arbeiten [10, 8, 9] dessen Anwendung ausgehend von einer „Predator-Prey-Simulation“ in Fußballsimulationen untersucht. Dabei wurden zuvor atomare Aktionen, die die Agenten durchführen können, definiert. Diese Aktionen wurden anschließend mittels GP kombiniert und weiterentwickelt. Die Bewertungsfunktion betrachtet dabei nur die erzielten Tore. Komplexere Bewertungsfunktionen führten zu unerwünschten Verhalten. Beispielsweise führte die Bewertung anhand des Ballbesitzes zum Phänomen des „Kiddie Soccer“ bzw. „ewigen Passspiels“. Neben der Beschränkung auf ausgewählte Aktionen wurde das Team von einer zentralen Instanz trainiert, der alle benötigten Informationen zur Verfügung gestellt wurden. Insbesondere wurde hierbei auf Kommunikation zwischen den Agenten verzichtet, da die Instanz alle notwendigen Informationen hatte und das Team als ganzes „trainieren“ sollte. Damit die Spieler nicht alle homogen in ihren Aktionen sind, wurden die Spieler in Gruppen unterteilt. Innerhalb der Gruppe wurden die gleichen Aktionskombinationen durchgeführt. Die Gruppen wurden anschließend in den Evolutionsschritten miteinander kombiniert.

Ein situationsbasierter Ansatz wird in [21] beschrieben. Dabei wurde sich auf Pässe mit Gegnerinteraktion konzentriert. Für diesen Ansatz wurden bestimmte Situationen auf dem Spielfeld und die notwendigen Aktionen zur erfolgreichen Lösung gespeichert. Der Algorithmus bewertet nun in Spielen die aktuelle Situation und wählt einen zuvor gespeicherten Fall aus. Die mit diesem Fall verknüpften Positionen werden von den Spielern eingenommen und die entsprechenden Aktionen ausgeführt. Für ein erfolgreiches Zusammenspiel sollte jeder Mitspieler wissen, was der jeweils andere tut. Mit dem untersuchten fallbasierten Ansatz ist genau dies möglich und erlaubt kooperatives Verhalten zwischen den einzelnen Agenten.

Bereits in Zeiten, als noch der AIBO-Roboter in der Standard-Plattform Liga verwendet wurde, wurden Verfahren zum Teamverhalten und -koordination entwickelt ([27, 18, 17, 6]). Eine viel beachtete Arbeit ist [1]. Darin wird die Verwendung mehrerer Rollen für die Spieler und der Wechsel der Spielerrolle beschrieben. Für die Rollenentscheidung eines Spielers wird die eigene Position, die Ballposition, die „Kosten“

eines Rollenwechsels und die vergangene Entscheidung einbezogen. Die Rolle mit dem größten Nutzen für den Spieler, wird von diesem verwendet und an seine Mitspieler kommuniziert. Außerdem wird jeder Rolle ein individuelles Verhalten zugeordnet.

Generell wurde sich mehrfach mit dem Rollenkonzept beschäftigt und im Kontext des RoboCups evaluiert. So hat sich [3] bereits vor Agüero et al. mit der Rollenzuordnung auseinandergesetzt. Ausgehend von einem ähnlichen Problem, des „Optimal Assignment Problem“ (OAP) aus dem Operational Research, wurde ein Formalismus und Algorithmus für eine „greedy“ Rollenzuordnung präsentiert.

Mehrere Veröffentlichung von Veloso und Stone beschäftigen sich mit der Koordination von Agenten im Roboterfußball ([26, 22, 23, 25]). Dabei beschreiben sie, wie sich das Rollenkonzept im Roboterfußball einsetzen lässt und was die Vorteile dynamischer Rollenwechsel und vom Formationsspiel sind. Ebenso werden die Nachteile in der realen Welt im Vergleich zur Simulation betrachtet. Wobei sich wiederum nur auf die Small-Size Liga bezogen wird. Neben dem Formationsspiel wird auch untersucht, wie eine Abstimmung über eine bestimmte Formation erfolgen bzw. wie eine solche Formation vor Spielbeginn festgelegt werden kann („Locker-Room Agreement“). Darüber hinaus wird untersucht in welchen Formen und Varianten ein Zusammenspiel bzw. die Erreichung eines gemeinsamen Ziels erfolgen kann.

Die neuesten Arbeiten auf dem Gebiet der Koordination und des Zusammenspiels im Roboterfußball zeigen, dass Teamkoordination, -zusammenarbeit und -strategie auch in der SPL immer wichtiger werden ([4]). So wurde bereits im Nao-Team HTWK Leipzig eine Arbeit [15] zur dynamischen Strategie veröffentlicht, die zum Ergebnis gelangt, dass eine dynamische Strategie einer Statischen überlegen ist. Aktuell hebt Röfer et al. in [19] heraus, dass unter den besten Teams kaum noch Unterschiede bestehen und die Herausforderung darin liegt, besser als Team zusammenzuspielen und eine erfolgreiche Taktik zu verwenden.

Die meisten Arbeiten beziehen sich auf Verfahren, die in ihrer beschriebenen Form nicht auf die SPL angewendet werden können. Das lässt sich auf zwei Aspekte zurückführen. Zum einen kann die Simulation die reale Welt nur eingeschränkt abbilden. Das äußert sich nicht nur in unterschiedlichen Parametern für die Konfiguration der Agenten, sondern durch teilweise vollständig unterschiedliche Reaktionen der physischen Objekte. Außerdem spielt das Rauschen der Sensoren bzw. die Ungenauigkeit in der Motoransteuerung eine sehr viel größere Rolle und erschwert es, genaue Aussagen zu treffen. Beispielsweise kann ein realer Roboter den Ball nicht so gut kontrollieren wie in einer Simulation. Andererseits stehen den Agenten Informationen zur Verfügung, die in der SPL gar nicht erhebbbar sind. So sind in der Simulation und der Small-Size

Liga nicht nur die Informationen der eigenen Mitspieler, sondern auch die Position der Gegner bekannt. Solche Informationen stehen einem Agent der SPL nur in sehr eingeschränktem Maße zur Verfügung.

Der zweite Unterschied liegt in der Verwendung einer zentralen Instanz. Dabei wird in der Simulationsliga zum Lernen einer Teamstrategie eine zentrale Instanz verwendet, der entsprechend alle Informationen zur Verfügung stehen. Oder das Spielfeld wird von einer zentralen Instanz ausgewertet und an die Steuerungsinstanz der Teams weitergeleitet (Small-Size-Liga). Entsprechend stehen alle Informationen der beteiligten Spieler bei der Auswahl der Strategie bzw. Koordination der Spieler zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu agiert in der SPL jeder Spieler für sich. Das heißt insbesondere, dass dem Spieler nur die Informationen zur Verfügung stehen, die er selbst wahrnehmen kann. Zusätzlich können die Spieler zwar Informationen kommunizieren, dabei können jedoch nur beschränkt viele Informationen geteilt werden und dies auch nur in bestimmten Zeitintervallen. Entsprechend stehen jedem Spieler zu jedem Zeitpunkt verschiedene Informationen zur Verfügung, anhand dieser eine Entscheidung treffen muss. Auch die Entscheidung über die verwendete Strategie muss abgesprochen sein und kann nicht durch eine zentrale Instanz entschieden werden.

Daher wurde sich in der SPL nur beschränkt mit Strategie und Koordination beschäftigt. Hier standen zunächst die Lösung grundlegenderer Probleme im Fokus. Die Arbeit Röfer et al. ([19]) zeigt allerdings auf, dass das Thema auch in der SPL an Bedeutung gewinnt und in den nächsten Jahren den Unterschied zwischen Sieg und Niederlage bedeuten kann.

Im Nao-Team Humboldt wurden bisher nur sehr einfache Strategien und statische Koordination verwendet. Zusätzlich wird eine Anwendung der beschriebenen Verfahren erschwert, da keine Gegnererkennung und kein Passspiel vorhanden ist, welche als Voraussetzung in den Arbeiten gesehen werden.

3 Werkzeuge

Zur Konfiguration und Analyse einzelner Roboter wurden im Nao-Team Humboldt bereits umfangreiche Werkzeuge entwickelt. Mit der Einführung komplexer Teamstrategien wird es allerdings notwendig, diese Werkzeuge derart anzupassen, dass nicht nur ein einzelner Roboter konfiguriert werden kann, sondern das gesamte Team.

Zusätzlich werden neue Auswertungsmethoden und -werkzeuge benötigt, um den Erfolg oder Misserfolg einer Strategie und des Teams zu erfassen und zu bewerten.

Im Folgenden werden die im Nao-Team Humboldt verwendeten und im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten Werkzeuge vorgestellt.

3.1 RobotControl

RobotControl ist das Hauptwerkzeug zur Konfiguration, Steuerung und Fehleranalyse im Nao-Team Humboldt. Mit ihm ist es möglich, einen Roboter zu kalibrieren, zu konfigurieren, Parameter einzustellen, das Verhalten des Roboters zu ändern und aufgezeichnete Logdaten auszuwerten. Die einzelnen Funktionen sind dazu in Dialoge unterteilt. Die wichtigsten Dialoge zur Konfiguration eines Roboters sind:

- **ModuleConfigurationViewer:** Hier lassen sich Module ein- und ausschalten sowie die benötigten bzw. bereitgestellten Repräsentationen anzeigen.
- **ParameterPanel:** Erlaubt die Anpassung von Parametern der einzelnen Module.
- **DebugRequests:** Damit lassen sich Debugfunktionen (de-)aktivieren und ermöglichen die Analyse von bestimmten Modulen bzw. bestimmten Funktionen.

Neben der Konfiguration des Roboters, ist die Analyse und Auswertung der Berechnungen zur Fehleranalyse und Bewertung der eingesetzten Module wichtig. Dazu werden hauptsächlich die folgenden zwei Dialoge verwendet:

- **BehaviorViewer:** Zeigt das aktuell ausgeführte Verhalten und die dort verwendeten Daten an.
- **RepresentationInspector:** Zeigt die durch die Module berechneten Werte und erlaubt damit die Kontrolle der Berechnung und ermöglicht es das Verhalten des Roboters nachzuvollziehen.

Für die Auswertung und Bewertung der Teamstrategie stehen der TeamCommViewer und der FieldViewer zur Verfügung. Dabei werden die von den Spielern kommunizierten Entscheidungen angezeigt.

- **TeamCommViewer:** Zeigt die von den Robotern kommunizierten Informationen tabellarisch an und erlaubt einen schnellen Überblick über diese.
- **FieldViewer:** Visualisiert bestimmte, kommunizierte Informationen des Roboters auf dem Spielfeld (Position, Ball, Striker, Teamball, usw.); außerdem können mittels DebugRequests zusätzliche Informationen angezeigt werden.

RobotControl wurde so entwickelt, dass es nur möglich ist, die Informationen eines Roboters anzuzeigen – abgesehen vom TeamCommViewer, der die Teamkommunikation des gesamten Teams anzeigt. Zur Informationsanzeige und Konfiguration mehrerer Roboter musste ein neuer Dialog implementiert werden.

3.2 MultiAgent-Dialog

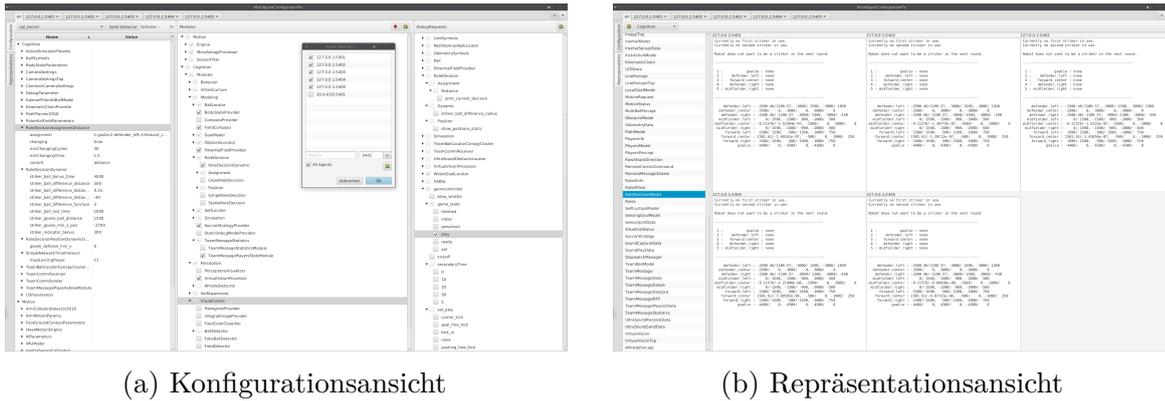
Mit der Einführung einer komplexeren Teamstrategie wird es notwendig, das Team als Ganzes zu konfigurieren und das Teamverhalten zu bewerten. Aus diesem Grund wurde der „MultiagentConfiguration“-Dialog vollständig neu entwickelt. Dieser Dialog bietet die Möglichkeit, sich mit mehreren Robotern gleichzeitig zu verbinden und diese einheitlich zu konfigurieren.

Dazu wurden die Funktionen der zuvor beschriebenen Dialoge (Module, Parameter, DebugRequests, RepresentationInspector) in einer Oberfläche zusammengefasst. Die Anpassung der Konfiguration wird an alle verbundenen Roboter weitergeleitet und ermöglicht damit eine einheitliche Konfiguration. Außerdem werden die von den Modulen berechneten Repräsentationen in einer Ansicht nebeneinander angezeigt und ermöglicht damit die Kontrolle, ob das Team zu einheitlichen Entscheidungen kommt (Teamball, Rollenentscheidung, verwendete Taktik).

3.3 Datensammlung

Neben der Analyse und Auswertung eines Teams von Robotern und dessen Verhalten während eines (Test-)Spiels, ist die anschließende Auswertung aufgezeichneter Daten von großer Bedeutung, wenn es um die Bewertung der eingesetzten Algorithmen geht. Diese aufgezeichneten Daten geben einen Einblick, was die Roboter zu jedem Zeitpunkt dachten und welches Verhalten sie daraufhin ausgeführt haben.

Während des Spiels muss auf verschiedene Aspekte der Roboter geachtet werden, dabei können nicht zu jedem Zeitpunkt alle Roboter bzw. dessen Entscheidungen bewertet werden. Anhand der aufgezeichneten Daten können die Aktionen der Roboter



(a) Konfigurationsansicht

(b) Repräsentationsansicht

Abbildung 1: Zeigt den MultiAgentConfiguration-Dialog mit fünf verbundenen Robotern in der Konfigurationsansicht (a) und der Repräsentationsansicht (b). In der Repräsentationsansicht wird die Rollenentscheidung aller Roboter angezeigt.

auch im Nachhinein noch einmal abgespielt, analysiert und bewertet werden. Im Nao-Team Humboldt existiert dazu bereits eine Infrastruktur zur Aufnahme von Logdateien. In diesen werden Sensordaten und insbesondere das Verhalten der Spieler aufgezeichnet. Nach einem Spiel oder Test werden die Logdateien eingesammelt und auf einem Server gespeichert. Entsprechend gibt es ein seit Jahren gesammeltes Archiv an Logdateien.

Zusätzlich wird vom GameController die Kommunikation zwischen den Robotern und der Zustandswechsel des Spiels aufgezeichnet. Der GameController ist die zentrale Instanz, die die Anweisungen des Schiedsrichters übersetzt und an die Roboter kommuniziert.

Damit im Nachhinein die Spielsituation nicht nur aus Sicht der Roboter analysiert werden kann, zeichnet das Nao-Team Humboldt auch seit einigen Jahren manuell Videos mit einer GoPro auf. Anhand dieser Videos lassen Spielsituationen genauer betrachten und Fehlwahrnehmungen der Roboter feststellen. Ein großer Nachteil der manuellen Aufnahmen liegt in der anschließenden Aufbereitung. Die Videos und Logdateien müssen synchronisiert werden, um sie gemeinsam auswerten zu können. Dazu wurde in der Arbeit [24] ein System zur synchronen Videoaufnahme entwickelt und implementiert. Mit diesem ist es möglich, die Aufnahme zum gleichen Zeitpunkt wie der GameController und die Roboter zu starten. Anschließend lassen sich alle aufgezeichneten Daten einfach durch Synchronisierung des Startzeitpunktes auswerten.

Die Daten werden nach Datum, Veranstaltung, Uhrzeit und Gegner sortiert und für eine systematische Analyse aufbereitet. Die Analyse einzelner Logdateien erfolgt beispielsweise mit dem LogSimulator, RobotControl oder speziellen Pythonskripten.

In [14] wurde das automatische Aufnahmesystem weiterentwickelt und um weitere Aufbereitungsschritte ergänzt. So können bestimmte Informationen aus dem Video extrahiert werden und als „Ground Truth“ für die Auswertung und Vergleich der Roboterdaten verwendet werden. Dazu wird die Position der Roboter und des Balls im Video erkannt und auf das Feld projiziert und damit die tatsächliche Feldposition der Spieler ermittelt. Diese kann anschließend mit der Position verglichen werden, die der Roboter dachte, wo er ist.

Mit dem Aufnahmesystem wurden alle Spiele der GermanOpen 2018, des RoboCups 2018 und der GermanOpen 2019 aufgezeichnet. Aufgrund unvorhergesehener, technischer Probleme konnten einige Spieler beim RoboCup 2018 nicht vollständig aufgezeichnet werden.

Diese können nun aufbereitet und systematisch ausgewertet werden. Im folgenden Abschnitt wird ein Tool beschrieben, das auf den aufgezeichneten Daten aufbaut.

3.4 RoboCup Data Explorer

Das „RoboCup Data Explorer“-Tool¹ entstand im Rahmen der Forschungsarbeit „Simulation Based Selection of Actions for a Humanoid Soccer-Robot“ von Mellmann, Schlotter & Blum[12] und ermöglicht die Annotation von zuvor extrahierten Spielereignissen eines (oder mehrerer) Roboters.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Tool weiterentwickelt. Nun ist es möglich, weitere Spielereignisse („Events“) zu extrahieren und die einzelnen Logdateien zu synchronisieren.

Insbesondere wird die „Striker“-Rolle (First & Second) extrahiert und ermöglicht damit die Kontrolle und Bewertung der Absprache, wer zum Ball geht. Zusätzlich lassen sich weitere Rollenentscheidungen extrahieren und der Rollenwechsel im zeitlichen Verlauf visualisieren. Dies ermöglicht nach einem Spiel konkrete Spielsituationen nachzuvollziehen und bei Problemen entsprechende Anpassungen der Strategie bzw. Konfiguration vorzunehmen.

Für eine sinnvolle Visualisierung müssen die Logdateien synchronisiert werden, um Events, die zur selben Zeit eingetreten sind, auch in der Darstellung synchron anzuzeigen. In Abbildung 2 sind die synchronisierten Logdateien gut an dem ersten „READY“-Zustand erkennbar – er endet für alle Logdateien zum gleichen Zeitpunkt auf der

¹<https://www2.informatik.hu-berlin.de/~naoth/videolabeling/> (zu letzt abgerufen am 22.03.2019)

Zeitachse. Entsprechend sind auch alle nachfolgenden Events synchronisiert und es lässt sich einfacher eine Aussage über Rollenwechsel treffen.

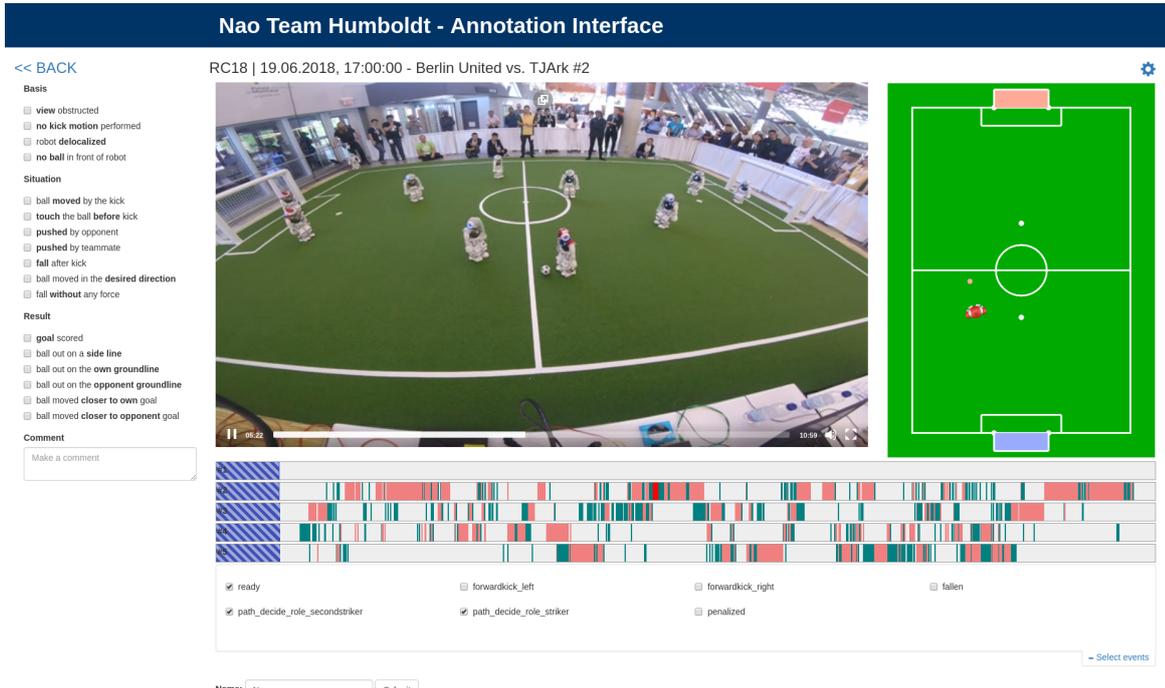


Abbildung 2: Das „RoboCup Data Explorer“-Tool mit der zweiten Halbzeit des Spiels Berlin United gegen TJArk vom RoboCup 2018. Die Logdateien (fünf Zeilen im unteren Bildteil) sind synchronisiert (erkennbar an den blauen Balken) und zeigen die „Firststriker“ (rot) und „Secondstriker“-Entscheidung (grün) im Spielverlauf.

Die Synchronisierung der Logdateien wurde in Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt. Eine solche Synchronisierung der Logdateien kann auf zwei Arten erfolgen:

- anhand der GameController-Logdateien (wenn vorhanden),
- anhand der Teamkommunikation aus den Logdateien der Spieler.

Die Synchronisierung läuft dabei in beiden Varianten ähnlich ab. Es wird eine Logdatei als Synchronisationslogdatei ausgewählt. In dieser Logdatei wird ein Zeitpunkt als Synchronisationszeitpunkt festgelegt (der erste „READY“-Zustand, wenn vorhanden). Anschließend wird versucht, die anderen Logdateien an diesem Synchronisationszeitpunkt auszurichten, indem die gespeicherten Nachrichten der anderen Spieler in der Synchronisationslogdatei gesucht werden.

Für die Synchronisierung wird die Logdatei des GameControllers, wenn vorhanden, bevorzugt.

Synchronisierung mit der GameController-Logdatei

Der GameController ist im Spiel die zentrale Instanz, die Änderungen des Spielzustands an alle Spieler kommuniziert sowie alle kommunizierten Nachrichten der Teams empfängt und speichert. Als Synchronisationspunkt wird der Zeitpunkt des ersten „READY“-Zustands, der in der Logdatei des GameControllers gefunden werden kann, verwendet. Kann kein solcher Zustand gefunden werden, wird einfach der Zeitpunkt des ersten Eintrags („Frame“) der GameController-Logdatei verwendet. An diesem Synchronisationspunkt werden alle anderen Logdateien ausgerichtet, d.h. alle Informationen der Logdateien werden um genau den Zeitversatz (Offset) verschoben, den sie vom Synchronisationspunkt abweichen.

Da der GameController alle empfangenen Nachrichten der einzelnen Spieler speichert, wird dies genutzt, um jeweils eine Nachricht jedes Spielers in der Logdatei zu finden. Dafür wird der Zeitversatz zwischen dem Synchronisationspunkt und der gefundenen Nachricht ermittelt und für diese Logdatei gespeichert. Um diesen Schritt durchführen zu können, muss ein Zeitstempel in jedem Frame der Logdatei vorhanden sein. Im Nao-Team Humboldt werden alle Logdateien mit einem Zeitstempel der einzelnen Frames gespeichert.

Synchronisierung anhand der Teamkommunikation

Ist keine GameController-Logdatei vorhanden, gibt es die Möglichkeit, die Synchronisierung der einzelnen Logdateien mittels der aufgezeichneten Teamkommunikation durchzuführen. Dazu wird zufällig eine Logdatei ausgewählt, an der die weiteren Logdateien synchronisiert werden.

Auch hier wird erneut der Zeitpunkt des ersten „READY“-Zustands als Synchronisationspunkt verwendet. Wenn dieser nicht gefunden werden kann, wird der Zeitpunkt des ersten Frames der Logdatei verwendet. Um die anderen Logdateien zu synchronisieren, werden die aufgezeichneten Nachrichten der Referenzlogdatei durchlaufen. Dabei wird der Zeitstempel der Nachrichten verwendet, um die selbe Nachricht in der Logdatei des unsynchronisierten Spielers zu finden.

Wurde eine Nachricht der Referenzlogdatei in einer unsynchronisierten Logdatei gefunden, kann wiederum der Zeitversatz zwischen Synchronisationspunkt und Zeitstempel der Nachricht ermittelt und als Offset gespeichert werden. Die Logdatei wird als synchronisiert markiert und kann in der weiteren Suche ignoriert werden. Die Suche wird solange durchgeführt, wie noch unsynchronisierte Logdateien vorhanden sind.

Ein Fehler in der Speicherung der gesendeten Nachrichten einer Logdatei des Nao-Team Humboldts führte dazu, dass nicht nach genau einem Zeitstempel gesucht werden

konnte. Stattdessen sind die Zeitstempel von den versendeten Nachrichten und den entsprechend gespeicherten Nachrichten bei älteren Logdateien um bis zu 5ms versetzt.

Die gespeicherten Synchronisationspunkte werden vom „RoboCup Data Explorer“-Tool verwendet, um die aus den Logdateien extrahierten Events zueinander auszurichten und in der zeitlichen Reihenfolge korrekt darzustellen.

3.5 Simulation (Simspark)



Abbildung 3: Anstoß eines Simulationspiels in Simspark; links in blau die Spieler mit der neuen dynamischen Strategie; rechts in rot die Spieler mit der statischen Strategie

Eine neue Strategie zu testen und zu bewerten, ist nicht so einfach wie andere Probleme im Roboterfußball. Grundlegende Fragestellungen können einfach mit Daten überprüft werden und es existieren Kennzahlen, mit denen die entsprechende Lösung bewertet werden kann. Zum Beispiel muss die Pfeifenerkennung alle Pfliffe richtig erkennen und darf nicht bei Hintergrundgeräuschen anspringen. Oder die Ballerkennung sollte entsprechend den Ball gut „sehen“ und die Lokalisierung sollte zu jederzeit ermitteln können, wo der Roboter sich auf dem Feld befindet. Dem gegenüber steht die Evaluation der Teamstrategie. Eine erfolgreiche Strategie führt nicht automatisch zu mehr Toren – die bisher gebräuchlichste Kennzahl wenn es um die Auswertung und Bewertung der Strategie geht. Darüber hinaus ist eine Strategie nicht einfach durch kleine Experimente zu testen. Stattdessen muss mindestens ein ganzes Spiel durchgeführt werden. Wobei ein Spiel auch nur eine Tendenz angeben kann. Der Einfluss

des Zufalls und die Aktionen der Gegner ist zu groß, um Erfolg oder Misserfolg allein auf die Strategie zurückführen zu können.

Entsprechend müssen viele Spiele, am besten gegen den selben Gegner, durchgeführt werden, um eine statistische Bewertung der Strategie vornehmen zu können. Eine Erweiterung wäre, dass nicht nur gegen den selben Gegner, sondern gegen unterschiedliche Gegner gespielt wird, um die Strategie gegen unterschiedliche Vorgehensweisen zu testen.

Ein Spiel mit echten Robotern dauert zu lange, um die nötige Anzahl an Wiederholungen durchführen zu können. Auch verschleißten die Roboter je öfter sie eingesetzt werden, was wiederum in Mehrkosten für Wartung und Reparatur resultiert.

Als Lösung der genannten Probleme bietet sich an, die Spiele in einer Simulation durchzuführen. Dies ermöglicht es, viele Spiele gleichzeitig und hintereinander zu spielen. Dabei lassen sich die verschiedenen Umwelteinflüsse einfacher kontrollieren und es ist weiterhin Unsicherheit und Zufall vorhanden, so dass es vergleichbar mit der realen Welt bleibt. Zusätzlich lassen sich die Spiele sowohl automatisiert durchführen als auch auswerten und ermöglichen dadurch eine Bewertung der eingesetzten Strategie.

Im Nao-Team Humboldt wird schon seit langem „Simspark“ als Simulationslösung verwendet. Diese Simulationsanwendung wird in der 3D-Liga des RoboCups verwendet und damit entsprechende Wettkämpfe durchgeführt. Um die Ergebnisse aus der Simulation auf den realen Roboter übertragen zu können, wurde die Simulation dahingehend angepasst, dass fehlende Sensoren und Aktoren hinzugefügt wurden und die SPL-Regeln angewandt werden. Die Bemühungen resultierten in der erfolgreichen Teilnahme verschiedener Wettkämpfe in 2010 und 2011 sowohl in der 3D Simulationsliga als auch in der SPL mit der selben Codebasis [13].

In den darauffolgenden Jahren wurde die Simulationsanwendung nur noch für kleinere Experimente und prinzipielle Funktionstests verwendet.

4 Teamkoordination

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Anwendung einer Teamstrategie und -koordination gelegt. Sollen sich mehrere Roboter koordinieren, kommt man nicht umhin, miteinander zu kommunizieren. Technisch bedingt kommt es dabei zu Verzögerungen, die im Laufe des Spiels zusätzlich bestimmten Schwankungen unterliegen und in verschiedenen Spielen unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Daher wird zu Beginn auf die Zeitsynchronisierung und das implementierte Verfahren eingegangen. Der Teamball, als Dreh- und Angelpunkt einer gemeinsamen Teamstrategie, wird im Folgenden beschrieben und das neu implementierte Verfahren vorgestellt. Anschließend wird die aktuell im Nao-Team Humboldt verwendete statische Koordination beschrieben und diskutiert. Auf Grundlage dieser Diskussion werden neue Strategien und Verfahren zur Koordinierung entwickelt und implementiert.

4.1 Zeitsynchronisation

In diesem Abschnitt wird erläutert, warum Zeitsynchronisierung zwischen den Robotern notwendig ist. Dazu wird zunächst das Problem im Kontext des Roboterfußballs beschrieben, anschließend das „Network Time Protocol“ (NTP) zur allgemeinen Zeitsynchronisation in Netzwerken und im letzten Schritt das implementierte Verfahren zur Synchronisation zwischen den Robotern (Simple NTP).

4.1.1 Notwendigkeit der Zeitsynchronisierung

Die Kommunikation der Roboter untereinander erfolgt über WLAN mittels UDP. Das verwendete Nachrichtenformat ist in den Regeln der SPL festgelegt. Dabei gibt es zum einen bestimmte Informationen, die für alle Teams gleich sind, zum anderen gibt es einen benutzerdefinierten Teil, in dem jedes Team seine eigenen Informationen versenden kann. Insgesamt dürfen nur begrenzt viele Daten in bestimmten Sendeintervallen versendet werden. Aktuell darf jedes Teammitglied nur einmal pro Sekunde eine Nachricht mit neuen Informationen an seine Teammitglieder senden.

Neben der Beschränkung des Sendeintervalls kommt noch die Verzögerung (Latenz) durch die Übertragung im WLAN-Netzwerk hinzu. Unter Laborbedingungen ist diese Latenz gering, allerdings kann während der Wettkämpfe die Latenz stark zunehmen, dadurch die Übertragung von Informationen zusätzlich verzögern und so zu fehlerhaften Absprachen zwischen den Spielern führen.

Eine solche fehlerhafte Kommunikation aus dem Alltag wäre beispielsweise ein Telefongespräch, bei dem die Übertragung verzögert wird. Dabei passiert es häufiger, dass sich die Gesprächspartner gegenseitig ins Wort fallen, da sie aufgrund der Verzögerung annehmen, der Gesprächspartner antwortet nicht mehr.

Ähnlich geht es auch den Robotern, wenn die Kommunikation unterschiedlich lang dauert und technisch bedingt verzögert wird. Ein Spieler trifft eine Entscheidung und kommuniziert diese an seine Mitspieler. Bevor die Informationen den Mitspieler erreichen, trifft dieser ebenfalls eine Entscheidung, die eventuell der Entscheidung des ersten Spielers entgegensteht. Eine solche Entscheidung ist insbesondere bei der Abstimmung, wer an den Ball geht, kritisch. Im beschriebenen Fall können sich beide Spieler entscheiden, an den Ball zu gehen. Die Nachricht, dass der jeweils andere Spieler an den Ball geht, kommt verzögert an und beide haben sich bereits zum Ball bewegt. In der nächsten Situation erhalten beide Spieler die (verspätete) Nachricht und entscheiden wiederum, dass jeweils der andere an den Ball gehen sollte, mit dem Ergebnis, dass keiner der Spieler sich zum Ball bewegt. Empfangen die Spieler abermals diese Nachricht, geht die fehlerhafte Absprache solange weiter, bis beide Spieler am Ball angekommen sind und sich gegenseitig behindern. Eine solche fehlerhafte Absprache wird in Abbildung 18 gezeigt.

Um die Entscheidungen der Spieler zu verbessern und die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit zu minimieren, ist es notwendig, dass der einzelne Spieler abschätzen kann, wie alt eine empfangene Information ist. Dazu sollte die empfangene Information einem Zeitpunkt zugeordnet werden können. In der Netzwerktechnik hat sich dazu das „Network Time Protocol“ (NTP) etabliert.

4.1.2 Network Time Protocol (NTP)

Das „Network Time Protocol“ (RFC5905²) ist ein seit langem bestehender Standard zur Synchronisierung von Uhren in Computersystemen basierend auf dem UDP-Protokoll. Als Zeitformat wird dabei die „Coordinated Universal Time“ (UTC) verwendet. Dieses ist unabhängig von der geografischen Position und von Zeitzonen oder Zeitumstellungen.

NTP baut auf einer Hierarchie von Systemen auf, die sich zur jeweiligen höher gelegenen Schicht synchronisieren. Eine Ebene der Hierarchie wird „Stratum“ genannt und mit einer Nummer versehen. Je höher die Nummer, umso tiefer liegt die Hierarchieebene und umso weiter ist die Ebene von der Referenzuhr entfernt.

Die Referenzuhr kann eine Atomuhr oder Funkuhr sein und stellt das Stratum 0 dar.

²<https://tools.ietf.org/html/rfc5905>

Das direkt mit der Referenzuhr verbundene System ist Stratum 1 und alle weiteren darauf aufbauenden Systeme haben eine entsprechend höhere Nummer.

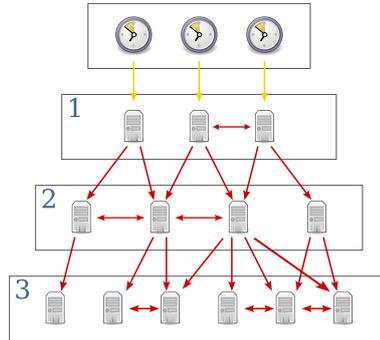


Abbildung 4: Hierarchie des NTP-Netzwerks (Wikipedia³)

Die Systeme synchronisieren sich mit der jeweils höheren Ebene und verwenden dazu einen 64 Bit Zeitstempel. Der „Client“ fragt dazu regelmäßig einen oder mehrere „Server“ an und berechnet aus der Antwort den Zeitversatz θ („Offset“) sowie die Zeitverzögerung δ („Round-trip delay“).

$$\delta = (t_3 - t_0) - (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{(t_1 - t_0) + (t_2 - t_3)}{2} \quad (2)$$

- | | | |
|-------|--------------------------------------|-----|
| t_0 | Zeitstempel des anfragenden Clients | |
| t_1 | Zeitstempel des empfangenden Servers | |
| t_2 | Zeitstempel des antwortenden Servers | (3) |
| t_3 | Zeitstempel des empfangenden Clients | |

Die berechneten Werte werden anschließend gefiltert und einer statistischen Analyse unterzogen. Damit werden Ausreißer verworfen und der Zeitversatz mit jeder weiteren Anfrage stückweise reduziert.

Anwendung auf dem Roboter

Die für die Synchronisierung notwendigen Programme sind bereits auf den Robotern vorhanden und können für die Zeitsynchronisierung verwendet werden. Allerdings

³https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Network_Time_Protocol_servers_and_clients.svg (16.06.2019)

ergeben sich daraus zwei mögliche Nachteile. Zum einen muss sichergestellt werden, dass diese Programme konfiguriert und gestartet sind, zum anderen sollte sich zu Beginn jedes Spiels vergewissert werden, dass die Uhren auch tatsächlich synchronisiert sind. Besonders in Wettkampfsituationen wird der letzte Punkt schnell vernachlässigt.

Zusätzlich ist es in der Vergangenheit häufiger vorgekommen, dass die BIOS-Batterie des Roboters verbraucht war und dieser sich nicht mehr die Zeit „merken“ konnte. Nach jedem Neustart ist die Zeit falsch eingestellt und muss neu synchronisiert werden. Dies ist insofern problematisch, da es während eines Wettkampfspiels vorkommen kann, dass ein Roboter neugestartet werden muss. Jede zusätzliche Synchronisierung verzögert dann den schnellen Einsatz des Roboters und stellt eine weitere Fehlerquelle dar.

Für einen jederzeit einsatzbereiten und selbst in Wettkampfsituationen funktionierenden Ablauf ist das NTP-Protokoll ungeeignet und wird daher nicht im Nao-Team Humboldt verwendet.

4.1.3 Simple Network Time Protocol (SNTP)

Das „Simple Network Time Protocol“ (RFC4330⁴) ist eine vereinfachte Variante des NTP. Dabei beziehen die Clients ihre Zeit von einem Zeitserver und verwenden einen einfacheren Algorithmus zur Berechnung der Zeitunterschiede. Ein Synchronisierungsdurchlauf funktioniert dabei wie folgt:

- der Client schickt einen Zeitstempel (t_0) zum Server,
- der Server speichert sich den Empfangszeitpunkt (t_1) der Anfrage,
- als Antwort schickt der Server den Zeitstempel des Clients (t_0), den Empfangszeitstempel (t_1) und den aktuellen (Sende-)Zeitstempel (t_2),
- der Client speichert sich die Antwort und zusätzlich den Empfangszeitstempel (t_3) der Antwort.

Aus diesen vier Zeitstempeln lässt sich die Übertragungszeit und die Zeitdifferenz, wie bereits im NTP-Protokoll gezeigt, berechnen (Gleichung (1) und Gleichung (2)). Mit diesem Verfahren ist es möglich, eine Genauigkeit zwischen 1-50ms zu erreichen.

4.1.4 Synchronisierung im Nao-Team Humboldt

Die Implementierung für die Roboter orientiert sich am SNTP-Protokoll und nutzt dafür die Formeln (1) und (2). Statt allerdings einen separaten Übertragungskanal

⁴<https://tools.ietf.org/html/rfc4330>

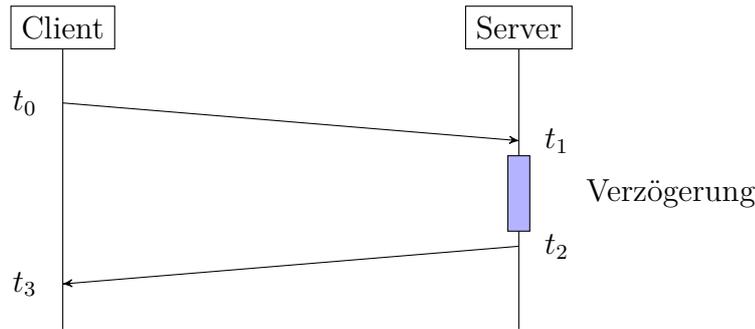


Abbildung 5: Kommunikationsdiagramm für SNTP

zu benutzen und spezielle UDP-Pakete zu versenden, wird die Zeitsynchronisierung in die kommunizierte Nachricht eingebettet. Zudem wird sich nicht mit genau einem Zeitserver synchronisiert, sondern jeder Roboter synchronisiert sich mit jedem anderen Mitspieler und speichert sich den Zeitversatz („Offset“) zu diesem. Mit welchen Mitspielern sich ein Roboter synchronisiert, wird zufällig mit jeder Nachricht ausgewählt. Damit wird sichergestellt, dass sich mit jedem Mitspieler synchronisiert wird und fehleranfällige Übertragung bzw. Paketverluste nicht dazu führen, dass sich mit einem Spieler überhaupt nicht synchronisiert wird.

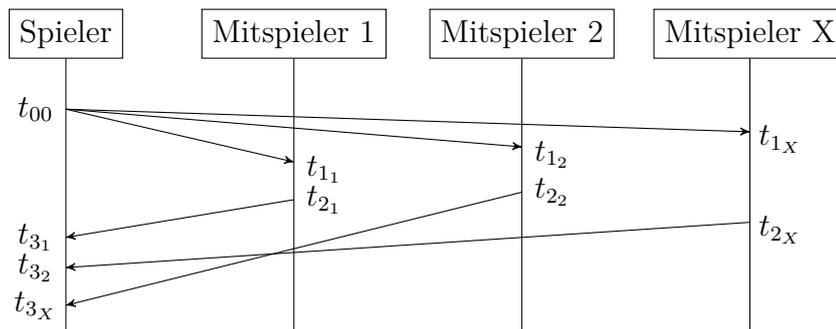


Abbildung 6: Kommunikationsdiagramm für Zeitsynchronisierung im Nao-Team Humboldt

Mit der implementierten Synchronisierung erhalten die Spieler auch gleichzeitig eine Information über die Netzwerkqualität und Zuverlässigkeit. Damit lassen sich wiederum Abschätzungen vornehmen, wann mit einer neuen Nachricht von einem Mitspieler zu rechnen ist. Das verwendete Verfahren ist ausreichend genau und ermöglicht die Zeitunterschiede der einzelnen Spieler auf unter 10ms (je nach Netzwerkqualität) zu korrigieren.

Eine alternative Synchronisierungsmethode wäre, die Synchronisierung zentral durchzuführen. Das heißt, es gibt einen Spieler, an dem sich alle anderen synchronisieren.

Das kann der „Kapitän“ sein oder einfach nur der Spieler mit der kleinsten oder größten Nummer. Dieses Vorgehen birgt das Risiko, dass bei einem Ausfall dieses Spielers, ein neuer Spieler zur Synchronisierung gewählt werden muss. Da eine Synchronisierung viel Zeit benötigt, um optimale Ergebnisse zu liefern, wird während dieser Zeit die Zeitunterschiede mit einer größeren Streuung geschätzt, was wiederum zur Folge hat, dass die empfangenen Informationen dem falschen Zeitpunkt zugeordnet werden und damit in fehlerhaften Entscheidungen resultieren.

Die Variante sich mit allen Robotern zu synchronisieren wurde gewählt, um frei von einer bestimmten Instanz (Server/Kapitän) zu sein und um Fehlerquellen zu minimieren. Die Synchronisierung läuft unabhängig, jederzeit, ohne zusätzliche Eingriffe. Darüber hinaus ist sie robust gegen Ausfälle einzelner Spieler und vermeidet das Problem bei leerer BIOS-Batterie einen Roboter unsynchronisiert spielen zu lassen.

4.2 Teamball

Der Teamball stellt die Grundlage dar, an der sich die Strategie und die Teamkoordination ausrichtet.

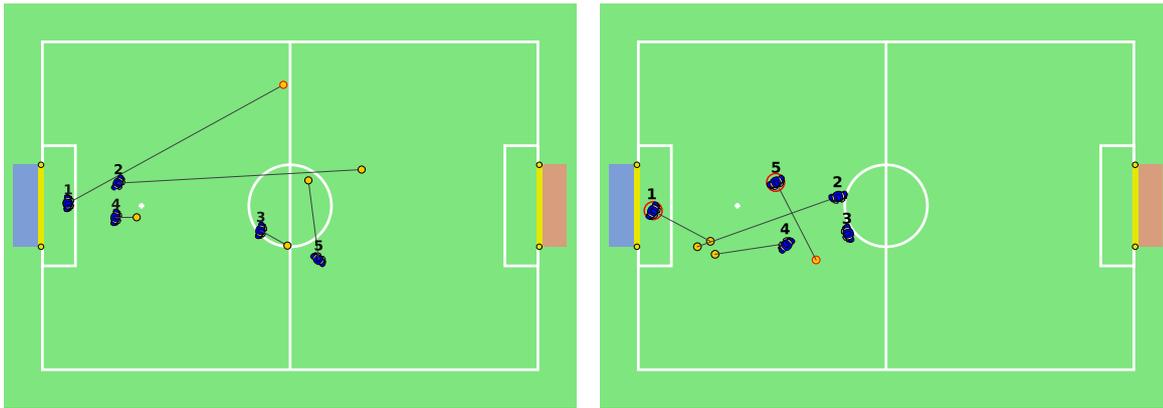
4.2.1 Es dreht sich alles um einen Ball

Soll ein Team von autonomen Robotern zusammenspielen, braucht es ein gemeinsames Ziel. Ohne ein gemeinsames Ziel agiert jeder Roboter für sich und eine erfolgreiche Zusammenarbeit findet nur implizit statt.

Das gemeinsame Ziel im Roboterfußball ist das Schießen von Toren und das gleichzeitige Verhindern von gegnerischen Toren. Jeder Spieler nimmt dazu das Spielgeschehen aus seiner Sicht wahr. Aufgrund von verrauschter und fehlerhafter Wahrnehmung (Sensordaten und Kamerabilder) kommt es häufiger zu Fehlentscheidungen. Insbesondere fehlerhafte Ballerkennung und falsche Lokalisierung kann das Zusammenspiel stark stören.

Es kommt vor, dass ein Roboter in einem anderen Spieler oder in einer Feldlinie einen Ball zu erkennen glaubt und diesen „falschen Ball“ an seine Teammitglieder kommuniziert. Aber nicht nur fehlerhaft erkannte Bälle führen zu widersprüchlich kommunizierten Informationen. Auch eine fehlerhafte Lokalisierung führt, trotz richtig erkannten Ball, zur fehlerhaften Einschätzung der Ballposition. Damit glaubt das Team als Ganzes mehrere Bälle zu sehen.

Jeder Spieler kann nun sein Verhalten nach dem Ball ausrichten, den er selbst wahrnimmt. Was aber sollen die anderen Mitspieler machen, die keinen Ball oder den



(a) Jeder Roboter sieht einen anderen Ball (RC18, gegen Austin Villa, 1. Halbzeit) (b) Der Spieler 5 ist delokalisiert, sieht aber den richtigen Ball (GO19, gegen B-Human, 2. Halbzeit)

Abbildung 7: Fehlerhafte Ballerkennung

gleichen Ball sehen? Wenn alle Spieler versuchen an den gesehenen Ball zu gehen, kommt es zum bereits erwähnten „Kiddie Soccer“, bei dem sich alle Spieler um den Ball sammeln und sich gegenseitig behindern.

Stattdessen sollten sich die Spieler „absprechen“ bzw. implizit selbst wissen, wie sie sich verhalten sollten. Dazu muss klar sein, an welchen Ball das Zusammenspiel ausgerichtet wird. Dafür muss ermittelt werden, welche Spieler den selben Ball sehen und an welchem der gesehenen Bälle das Zusammenspiel ausgerichtet wird.

All das soll der Teamball ermöglichen. Im Teamball werden die selben Bälle zu einem Ball zusammengefasst und es wird entschieden welcher der zusammengefassten Bälle der „echte“ Ball ist bzw. an welchem Ball die Teamstrategie und das Verhalten der passiven Spieler ausgerichtet wird. Dabei ist leicht nachvollziehbar, dass die Wahrscheinlichkeit einen Ball korrekt zu erkennen steigt, wenn mehrere Spieler den selben Ball erkennen.

Neben der Teamstrategie kann auch das individuelle Verhalten der einzelnen Roboter vom Teamball beeinflusst werden. So kann beispielsweise ein Spieler, der den Ball nicht findet, bei der Ballsuche einmal zur Position des Teamballs „schauen“, um dort vielleicht den Ball zu entdecken. Oder er schaut bei guter Ballerkennung die ganze Zeit Richtung Teamball und nur, wenn keiner der Mitspieler einen Ball sieht, sucht er entsprechend nach diesem. In einer weiterführenden Variante können sich passive Spieler zu dem Teamball positionieren und damit für die Verteidigung oder für ein Passspiel bereit sein – ohne den Ball selbst sehen zu müssen.

Im Folgenden wird der bisherige Ansatz zum Ermitteln des Teamballs im Nao-Team Humboldt und im Anschluss das neu implementierte Verfahren beschrieben.

4.2.2 Teamball als Durchschnitt

Das bisher verwendete Verfahren nutzt eine einfache Variante zur Berechnung. Dabei werden zunächst alle kommunizierten Bälle gesammelt. Ein Ball wird solange gespeichert, bis ein bestimmter „Altersgrenzwert“ überschritten wird. Aus den gesammelten Bällen wird in x- und y-Richtung der Median aller Bälle ermittelt und diese Position als Teamball gesetzt. Zusätzlich wird die Standardabweichung aller Bälle zum ermittelten Teamball berechnet, um ein Maß für den im Teamball enthaltenen „Fehler“ zu bestimmen. Der Teamball gilt als valide, solange neue Bälle zu den gesammelten Bällen hinzukommen. Sobald für eine bestimmte Zeit kein neuer Ball hinzugefügt wurde, wird der Teamball invalidiert.

Mit diesem Verfahren lässt sich auf einfache Weise ein Teamball ermitteln. Allerdings hat das Verfahren mehrere Nachteile. Zum einen werden alle „vergangenen“ Bälle gesammelt, die in einem bestimmten Zeitfenster gesehen wurden. Unter Verwendung des Medians wird damit im Durchschnitt der Ball gewählt, der in der Hälfte des Zeitfensters gesehen wurde. Entsprechend hängt der Teamball dem „echten“ Ball immer hinterher. Außerdem kann der Teamball zu völlig falschen Positionen kommen, wenn einzelne Spieler „falsche“ Bälle erkennen und ein solcher Ball in die Berechnung einfließt. Anhand der Fehlerberechnung kann eine große Abweichung der gesammelten Bälle erkannt werden, es wird aber dem Verhalten überlassen, entsprechend darauf zu reagieren und eine passende „Fehlerbehandlung“ zu implementieren. Aufgrund dieser Nachteile wurde der Teamball bisher effektiv nicht im Verhalten verwendet.

4.2.3 Teamball als Cluster

Das neu implementierte Verfahren verwendet dagegen ein Clusteringverfahren, um die selben Bälle zusammenzufassen und sich für den Ball mit den meisten beitragenden Spielern zu entscheiden. Für das Clustering wird der sogenannte „Canopy Clustering“-Algorithmus verwendet[11]. Dieser Algorithmus wird häufig zum „Vor-clustering“ von höherdimensionalen Daten mit K-Means bzw. anderen hierarchischen Clusteralgorithmen benutzt. Für die Berechnung eines Teamballs ist dieser Clusteringalgorithmus völlig ausreichend. Zum einen stehen nur eine Handvoll von Daten (Bällen) für das Clustering zur Verfügung, zum anderen kann ein Ball auch mehreren Clustern zugeordnet werden, so muss keine „harte“ Entscheidung für die Zuordnung getroffen werden. Für die Verwendung des Canopy-Clusterings sind zwei Distanzen T_1 („loose distance“) und T_2 („tight distance“) festzulegen, wobei $T_1 > T_2$ sein muss. Der Canopy-Algorithmus funktioniert nach folgendem Schema:

1. eine Menge B der zu clusterenden Bälle wird erstellt,
 - dabei werden nur Bälle betrachtet, die nicht älter als eine zuvor festgelegte Zeitspanne sind,
 - für das „Alter“ der Bälle wird auch die, durch die Zeitsynchronisierung (Abschnitt 4.1) ermittelte, Übertragungszeit der kommunizierten Bälle berücksichtigt,
2. nehme einen Ball aus B und verwende diesen als (Ersten) Cluster C_i ,
3. für jeden verbleibenden Ball aus B wird jeder Ball, dessen Distanz d kleiner als die „loose distance“ T_1 ist ($d < T_1$), dem Cluster C_i hinzugefügt,
 - ist die Distanz kleiner als die „tight distance“ ($d < T_2$), wird der Ball aus B entfernt (Bälle sind gleich),
 - damit können Bälle, dessen Distanz zwischen T_1 und T_2 liegen, mehreren Clustern zugeordnet werden,
4. wiederhole die Schritte ab Punkt 2 solange, wie noch Bälle in der Menge B enthalten sind.

Während dieser Iteration wird der Cluster mit den meisten Bällen gespeichert und anschließend der Clustermittelpunkt (Durchschnitt aller enthaltenen Bälle) als Teamball verwendet. Durch die Verwendung einer „weichen“ Grenze ($[T_2, T_1]$), muss für einen Ball, der nicht eindeutig zuordenbar ist, keine „harte“ Entscheidung getroffen werden. Stattdessen wird angenommen, dass der Ball entweder zum einen oder zum anderen Cluster zugezählt werden kann.

Werden keine neuen Bälle gesehen oder kommuniziert, wird der so berechnete Teamball nur für eine festgelegte Zeit als valide betrachtet.

Mit diesem Verfahren wird ein eindeutiger Teamball ermittelt, der nur die zum Zeitpunkt bekannten Informationen verwendet. Außerdem muss das darauf basierende Verhalten keine weitere Fehlerbehandlung vornehmen, sondern kann sich voll auf den ermittelten Teamball verlassen – sofern er valide ist.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Ermittlung eines Teamballs. Dazu werden die Bälle die nah beieinanderliegen zusammengefasst. Fehlerkennungen werden durch den Cluster mit drei zusammengefassten Bällen überstimmt. Der aus dem Durchschnitt resultierende Ball wird vom Team als Teamball verwendet.

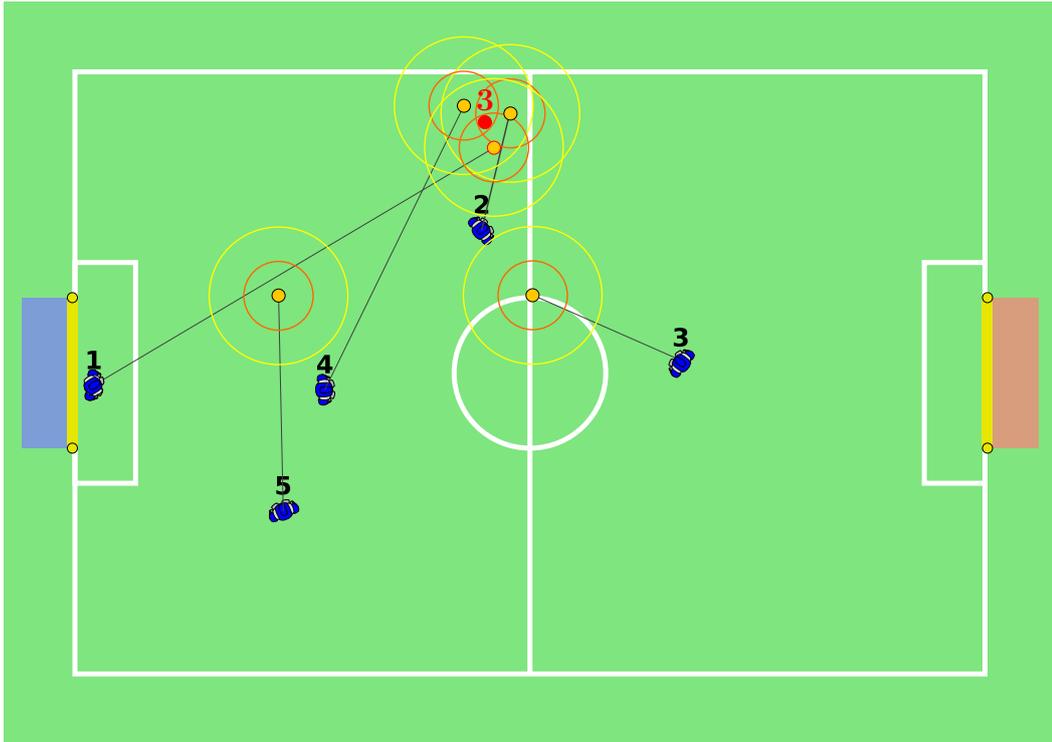


Abbildung 8: Visualisierung der Teamballermittlung; die gelben Kreise zeigen die T_1 -Distanz und die roten Kreise die T_2 -Distanz; der Teamball (rot) wird aus dem Durchschnitt des Clusters mit den meisten beitragenden Bällen bestimmt (3)

4.2.4 Zukünftige Optimierungen

Für eine statistische Auswertung und Bewertung des oben beschriebenen Teamballs wird die tatsächliche Position des Balls benötigt. Im Nao-Team Humboldt wird aktuell an einer Möglichkeit gearbeitet, die tatsächliche Ballposition aus den aufgezeichneten Videos zu extrahieren[14]. Entsprechend sollte in zukünftigen Arbeiten diese Möglichkeit genutzt werden und der Teamball gegenüber der „Ground Truth“ evaluiert werden.

Der beschriebene Teamball konnte bereits in mehreren Wettkämpfen eingesetzt werden und sich dort bewähren. Auch Analysen aufgezeichneter Daten zeigen, dass der Teamball ein gutes Maß, im Vergleich zum vom Roboter gesehenen Ball, darstellt. Es lassen sich auch schnell weitere Optimierungsmöglichkeiten finden, zum Beispiel kann der zuvor berechnete Teamball in die aktuelle Berechnung einfließen. Zur Zeit kann es vorkommen, dass der Teamball stark springt, wenn einzelne Spieler verschiedene Bälle sehen und keine Mehrheit für einen Ball zustande kommt. Unter Berücksichtigung des vorherigen Balls können solche Sprünge vermieden werden.

Alternativ können auch die ermittelten Cluster gespeichert und im Verlaufe der Zeit

aktualisiert werden. Entsprechend wird der Cluster zum Teamball, der am längsten „lebt“ bzw. am „ältesten“ ist.

Außerdem können andere Abstimmungsverfahren verwendet werden. So muss nicht die Mehrheit der Spieler den Ausschlag geben, sondern es könnten Spieler, die am häufigsten den „richtigen“ Ball gesehen haben, die Entscheidung beeinflussen.

4.3 Statische Koordination

Bisher wurde im Nao-Team Humboldt eine statische Strategie mit festen Spielerpositionen und explizitem Verhalten verwendet. Dazu wird vor Spielbeginn die Position für jede Spielernummer („Homeposition“) festgelegt und jedem Roboter eine Spielernummer zugewiesen. Mit dieser Zuweisung wird zum einen das Verhalten des Roboters festgelegt und zum anderen die Position festgelegt, zu der der Spieler zurückkehrt sobald er nicht mehr aktiv den Ball spielt. Damit sind alle Entscheidungen an die Spielernummer gebunden und ein Wechsel der Position bzw. des entsprechenden Verhaltens kann nur durch wechseln der Spielernummer erfolgen. Das hat insbesondere zu der Situation geführt, dass beim Auswechseln eines Spielers, der neue Spieler die Nummer des Auszuwechselnden übernehmen und die Trikots der Roboter getauscht werden mussten.

Neben dieser statischen Zuordnung gibt es noch den dynamischen Teil, bei dem sich die Spieler untereinander absprechen, welcher Spieler an den Ball geht und versucht ein Tor zu schießen. Die Absprache soll sicherstellen, dass immer nur ein Spieler an den Ball geht, um sich nicht gegenseitig zu behindern und um das „Kiddie Soccer“-Phänomen zu vermeiden. Darüber hinaus bestand die Strategie darin, dass jeder Spieler für sich nach dem Ball sucht und sobald er den Ball gefunden hat, entscheidet, ob er nur beobachtet oder ob er Striker werden soll. Ist ein Spieler Striker, d.h. ist er der aktive Spieler am Ball, bleibt er dies solange, wie er den Ball sieht bzw. er am schnellsten den Ball erreichen kann, oder bis er ein Tor geschossen hat. Einzige Ausnahme ist der Torwart („Goalie“), der nur in seinem Bereich, zwischen den Auslinien und dem „Penalty“-Punkt (Elfmeterpunkt) aktiv wird und versucht, den Ball wieder weit genug vom eigenen Tor weg ins Feld zu schießen.

Die Entscheidung, wer an den Ball geht, wurde anhand der kommunizierten Informationen getroffen. Dazu kommuniziert jeder Spieler, ob er den Ball gesehen hat und wie lange die Sichtung her ist sowie die Zeit die er zum Ball brauchen würde. Die Berechnung der Zeit wurde mittels der Distanz zum Ball und der aktuellen Aus-

richtung vorgenommen. Dabei wurden feste Werte für die angenommene Lauf- und Rotationsgeschwindigkeit verwendet.

Mithilfe dieser kommunizierten Informationen kann jeder Spieler ermitteln, welcher (Mit-)Spieler am schnellsten zum Ball gehen kann und dieser Spieler hat den Mitspielern kommuniziert, dass er Striker werden möchte. Tatsächlich Striker kann der Spieler erst im nächsten Zyklus werden, wenn es entweder keinen aktiven Striker gibt, oder wenn der aktive Striker inklusive einem Zeitbonus nicht schneller zum Ball kommt als ein anderer Spieler. Der Zeitbonus wird dem aktuellen Striker gegeben, um Oszillationen zwischen zwei oder mehr Spielern, aufgrund der Übertragungslatenz, zu vermeiden. Eine besondere Rolle in der Striker-Abstimmung nimmt hier wiederum der Torwart ein. Wenn der Torwart entscheidet, dass er Striker werden sollte, d.h. wenn der Ball in seinen Einflussbereich kommt, dann wird er sofort Striker und versucht den Ball wegzuschießen. Diese Striker-Entscheidung kommuniziert er auch allen anderen Spielern, die daraufhin nicht mehr Striker sein und den Ball nur noch beobachten dürfen.



Abbildung 9: Wenn nur ein Striker erlaubt ist, blockiert die blaue 3 die Striker-Rolle; mit einem Secondstriker kann die 5 den echten Ball spielen

Diese Absprache wurde zwischenzeitlich dahingehend angepasst, dass zusätzlich überprüft wird, ob zwei Spieler den selben Ball sehen, oder ob ein Spieler einen fehlerhaften Ball wahrnimmt. Dafür wurde ein „Secondstriker“ eingeführt, der zu dem Ball geht, den er sieht, der aber unterschiedlich vom Ball des „Firststriker“ sein muss. Damit wurde das Problem behoben, dass nur ein Spieler an den Ball gehen darf und Fehlwahrnehmung des Balls zum Stillstand im Spielablauf führte, da ein Spieler die Striker-Rolle blockierte. Auch wenn der Torwart Striker ist, können Spieler, die einen anderen Ball sehen wiederum Secondstriker sein. In der Vergangenheit kam es vor, dass der Torwart im „Penalty“-Kreuz glaubte einen Ball zu erkennen, damit Striker wurde und der tatsächliche Striker seine Striker-Rolle aufgab, obwohl er mit dem Ball kurz

vor dem gegnerischen Tor war. In Abbildung 9 ist eine ähnliche Situation abgebildet. Die blaue 3 glaubt im Kreuzungspunkt des Mittelkreises einen Ball zu erkennen. Die blaue 5 sieht hingegen den richtigen Ball und hat sich bereits gegen die gegnerische Verteidigung durchgesetzt. Ist nur ein Striker erlaubt, wird in dieser Situation die 3 zum Striker (roter Kreis), da dieser Spieler näher am Ball ist im Vergleich zur 5. Mit dem Secondstriker wird die 5 ebenfalls Striker, da die wahrgenommenen Bälle unterschiedlich sind.

Zusätzlich wurde das Torwartverhalten dahingehend leicht modifiziert, dass er sich innerhalb des Strafraums so positioniert, dass er immer auf gerader Linie zwischen dem Ball und der Tormitte steht. Die Verteidigungsposition wurde immer dann eingenommen, sobald der Ball sich in der eigenen Hälfte befindet und der Torwart selbst den Ball sieht. Damit sollte ermöglicht werden, dass der Torwart frühzeitig aktiv wird und insbesondere Schüsse von der Seite in die Torecken blockiert.

Die letzte hier zu erwähnende Anpassung betrifft die individuelle Ballsuche. Mit Einführung des Teamballs (siehe Abschnitt 4.2) wurde die Ballsuche dahingehend angepasst, dass zu Beginn jeder Suchrunde einmal ein Blick auf die Teamballposition geworfen wird, in der Annahme dort den Ball zu finden.

4.3.1 Diskussion

Die folgenden Nachteile werden bei der Verwendung der statischen Strategie gesehen, die die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Strategie und eines neuen Roboterverhalten in dieser Arbeit bilden.

Statische Spielerposition

Die Position der Spieler wird nicht an die aktuelle Spielsituation angepasst. Damit lässt sich weder ein Vorteil in der Offensive durch geschickte Positionierung ausnutzen, noch den Nachteil in der Defensive durch ungünstige Positionierung vermeiden. Eine von der Ballposition abhängige Strategie sollte die Defensive zusammenziehen, sobald der Ball in die eigene Hälfte gelangt und die Offensive sich so positionieren, dass ein Passspiel möglich wird. Zusätzlich kann eine ballorientierte Positionierung besser auf lange Schüsse reagieren und den Gegner beim Ballvortrag stören.

Unbesetzte Spielerposition bzw. Rolle

Ein weiteres häufig auftretendes Problem ist, dass Roboter ausfallen können. Der Ausfall kann durch einen Hardwareausfall (etwas am Roboter geht kaputt), durch einen Softwarefehler (das Programm stürzt ab und muss manuell neugestartet werden), oder

durch ein Foul des Spielers eintreten. Bei einem Regelverstoß, wird der Roboter für eine bestimmte Zeit aus dem Spiel genommen. Diese Zeit verlängert sich zusätzlich mit jedem weiteren begangenen Regelverstoß.

Während der Ausfallzeit ist bei einer statischen Positionierung bzw. Rollenverteilung die Position des ausgefallenen Spielers unbesetzt. Das ist insbesondere in der Defensive schwerwiegend, da damit die Verteidigung in der Unterzahl ist und der Gegner beim Ballvortrag nicht gestört werden kann oder ihm gar ein freier Torschuss ermöglicht wird. Besonders gefährlich wird es, wenn die Position der restlichen Spieler nicht geändert wird und zwei Spieler sich in der gegnerischen Hälfte bzw. im Mittelfeld aufhalten, während der Ball kurz vor dem eigenen Tor liegt.

Eine bessere Strategie ist, wenn die Spielerposition der verbleibenden Spieler geändert werden kann und damit ausgefallene Spieler wenigstens teilweise kompensiert werden können. Es sollten zumindest die wichtigsten Positionen während eines Spiels besetzt werden.

Schlechte defensive und offensive Aufstellung

Das bisherige Passivverhalten legt fest, dass ein Spieler, der den Ball sieht, stehen bleibt und den Ball solange beobachtet, bis er entweder Striker wird oder den Ball nicht mehr sieht. In dieser Zeit ändert er seine Position nicht. Das führt insbesondere zu gegenseitigem Blockieren, wenn der aktuelle Striker und der Ball sich in relativer Nähe zum passiven Spieler aufhalten. Dadurch, dass der passive Spieler seine Position nicht ändert, kann es dazu kommen, dass er den Striker blockiert oder darin behindert zum Ball zu gelangen. Mit verbesserter Ballerkennung kann es außerdem passieren, dass der Spieler den Ball über das gesamte Spielfeld sieht und entsprechend erst wieder auf seine Passivposition zurück läuft, wenn der Ball verdeckt wird.

Das Stehenbleiben verhindert effektiv, dass sich Spieler besser positionieren können – sowohl für eine bessere defensive Stellung (blockieren direkter Torschüsse des Gegners) als auch für eine optimale offensive Stellung (Passspiel).

Entsprechend sollte die Strategie sein, dass, wenn der Spieler nicht Striker ist, er sich passend zur aktuellen Spielsituation entweder defensiv aufstellt oder für ein Passspiel anbietet. Damit verbessert er nicht nur seinen eigenen Nutzen, sondern behindert auch nicht mehr den aktuellen Striker.

Lange Laufwege

Bisher wird derjenige Spieler Striker, der am schnellsten am Ball ist und er bleibt Striker, solange er entweder am schnellsten am Ball ist, er ein Tor geschossen hat oder bis der Ball im Aus landet. Damit kommt es vor, dass ein Verteidiger den Ball erobert,

den Ball aus der eigenen Hälfte bis zum Tor des Gegners dribbelt und dort ein Tor schießt. Anschließend muss dieser Spieler den gesamten Weg bis zu seiner statischen „Homeposition“ zurücklaufen. Damit geht eine schnellere Erhitzung der Gelenke und ein höherer Batterieverbrauch einher.

Ein bessere Strategie, die es erlaubt die Position bzw. die Rolle zu tauschen, verringert den Laufweg, den ein Spieler zurücklaufen muss und damit Energie und Gelenkerwärmung einspart. So kann das Team als Ganzes die Summe der zurückgelegten Wege minimieren und dadurch die Last (Energie und Gelenkerwärmung) auf alle Spieler besser verteilen. Der Striker muss demnach nur zur vordersten Position zurücklaufen. Das restliche Team füllt die verbleibenden Positionen entsprechend der kürzesten Teamdistanz auf.

Statisches Torwartverhalten

Der Torwart wird immer dann zum Striker, wenn der Ball in seinen Einflussbereich gelangt. Alle anderen Spieler bleiben stehen und beobachten nur noch den Ball oder suchen nach diesem, wenn sie ihn selbst nicht sehen. Dieses Verhalten ist in zweierlei Hinsicht problematisch. Zum einen kann der Torwart einem anderen Spieler die Striker-Rolle wegnehmen, obwohl dieser gerade in einer guten Position ist, den Ball wegzuspielen. Zum anderen können Spieler in der Nähe des Torwarts diesen, aufgrund ihres statischen Passivverhaltens, blockieren bzw. beim „Klären“ der Situation behindern.

Die Strategie des Torwarts sollte sein, dass er andere Spieler bzw. deren Position in seine Entscheidung mit einfließen lässt und dass die Passivspieler sich so positionieren, dass sie den Torwart nicht behindern.

4.4 Dynamische Koordination

Die entwickelte Strategie wird in die Rollenabstimmung, die Spielerpositionierung und das Rollenverhalten unterteilt. Die Rollenabstimmung wird zusätzlich in eine statische Rolle und eine dynamische Rolle unterschieden. Die statische Rolle bezieht sich dabei immer auf eine Feldposition und kann ein spezielles, auf die Rolle angepasstes, Verhalten zugewiesen bekommen. Die dynamischen Rollen sollen auf kurzfristige Änderungen reagieren und sich nicht auf bestimmte Feldpositionen beziehen. Damit ist es auch möglich, das Verhalten weiter in aktives und passives Verhalten zu differenzieren. Die statische Rolle legt dabei das passive Verhalten fest, das angewandt wird, wenn der Spieler nicht eine dynamische Rolle einnimmt. Die dynamischen Rollen repräsentieren das aktive Verhalten. Aktives Verhalten kann dabei direkt am Ball erfolgen oder

indirekt, indem einem Spieler beim Ballvortrag bzw. bei der Verteidigung geholfen wird.

Im Folgenden wird als Erstes die Rollenabstimmung bzw. -zuordnungsvarianten der statischen Rollen beschrieben. Anschließend werden die unterschiedlichen Positionierungsvarianten erläutert und darauffolgend die dynamischen Rollen sowie das Verhalten beschrieben.

4.4.1 Rollenabstimmung (Assignment)

In der Rollenabstimmung soll entschieden werden, welcher Spieler welche Rolle einnimmt. Jeder Rolle ist eine Homeposition zugeordnet, an die der Spieler zurückkehren soll, sobald er nicht mehr Striker ist. Mit jeder Rolle kann ein anderes Verhalten implementiert und damit auf die Besonderheiten der jeweiligen Rolle eingegangen werden. Die definierten Rollen sind in Tabelle 1 beschrieben und deren mögliche Position ist beispielhaft in Abbildung 10 visualisiert.

Gruppe	Rolle	Beschreibung
Goalie	goalie	Der Torwart ist der Spieler mit der Nummer 1. Diese Rolle bleibt immer fest und wechselt nur, wenn der Torwart vollständig ausfällt.
Defender	defender_left defender_center defender_right	Der Verteidiger stellt die Abwehrlinie vor dem eigenen Tor dar.
Midfielder	midfielder_left midfielder_center midfielder_right	Der Mittelfeldspieler steht zwischen der Verteidigung und den Stürmern. Er soll zum einen bei der Verteidigung des eigenen Tores unterstützen, wenn der Gegner mit Ball in der eigenen Hälfte ist, gleichzeitig soll er als Anspielstation für einen Schnellangriff nach Balleroberung bereitstehen und dem Stürmer helfen, wenn dieser den Ball verliert.
Forward	forward_left forward_center forward_right	Der Stürmer hält sich nach dem Anstoß vorwiegend in der gegnerischen Hälfte auf, er soll Tore schießen und den Gegner beim Ballvortrag hindern.

Tabelle 1: Rollen und deren Beschreibung

Der Torwart ist in der gesamten weiteren Betrachtung gesondert zu behandeln. Nach den Regeln ist der Torwart der Spieler mit der Nummer 1. Nur dieser Spieler darf den Ball absichtlich mit den Händen berühren. Das wiederum auch nur in seinem eigenen Strafraum. Damit ist es von Nachteil, wenn der Torwart seine Rolle an einen anderen



Abbildung 10: Rollen und dessen mögliche Feldposition

Spieler abgeben würde. Diesem Spieler wäre es dann nicht mehr erlaubt den Ball mit den Händen zu berühren.

Ziel einer Rollenabstimmung bzw. eines Rollenwechsels liegt darin, die Lauflistung einzelner Spieler zu reduzieren und auf das gesamte Team zu verteilen. Außerdem ermöglicht es, dass das Team eine gewünschte Aufstellung schneller einnimmt und nicht durch unnötige Laufwege verzögert wird. Zusätzlich können ausgefallene Spieler kompensiert und unbesetzte Positionen aufgefüllt werden.

Für einen Rollenwechsel können verschiedene Kriterien festgelegt werden, wann und wie dieser zu erfolgen hat. Im Folgenden werden verschiedene Varianten und die Idee dahinter beschrieben.

Statische Zuordnung

In der statischen Zuordnung bekommt jeder Spieler vor dem Spiel eine Rolle und die entsprechende Feldposition zugeordnet. Sowohl Rolle als auch die Position ändern sich im Laufe des Spiels nicht. Diese Variante setzt die bisherige Strategie in dem Rollenkonzept um und dient als Rückfalllösung bzw. Vergleichsgrundlage. Die für die statische Strategie besprochenen Vor- und Nachteile gelten entsprechend (Abschnitt 4.3). Ein Vorteil gegenüber der bisherigen Zuordnung gibt es in dem Sinne, dass der Ersatzspieler

nicht mehr die Trikot-/Spielernummer wechseln muss, sondern einfach nur noch die Rolle des zu ersetzenden Spielers einnimmt. Damit kann der Ersatzspieler schneller eingesetzt werden.

Dynamische Zuordnung nach Rollenpriorität

Die Rollenpriorität nimmt die Idee auf, dass verschiedene Rollen einen unterschiedlichen Nutzen bzw. je nach übergeordneter Strategie unterschiedlich wichtig sind. Zum Beispiel sollte für eine defensive Strategie die Verteidigerrolle/-position als Erstes besetzt werden. Im Gegensatz dazu sollte bei einer offensiven Strategie der Stürmer zuerst besetzt werden. Für eine ausgeglichene und gute Feldabdeckung sollten die Rollen abwechselnd besetzt werden. In der praktischen Anwendung (siehe Abschnitt 5) wurde die Reihenfolge Verteidiger, Stürmer, Mittelfeldspieler gewählt (siehe auch Abbildung 11).

In der Umsetzung wird die jeweils am höchsten priorisierte Rolle von dem Spieler besetzt, dessen Abstand zur Rollenposition am kleinsten ist. Die weiteren Spieler nehmen entsprechend die verbleibenden Rollen ein. Damit wird sichergestellt, dass die höherpriorisierten Rollen immer besetzt sind und Ausfälle einzelner Spieler die übergeordnete Strategie nicht gefährden.

Von Nachteil bei dieser Variante ist, dass unter Umständen ein Spieler weite Wege zurücklegen muss, um auf die Rollenposition zu gelangen, da alle anderen Rollen bereits von Spielern besetzt sind, die näher an der jeweiligen Rollenposition sind.

Vorteilhaft ist hingegen, dass wichtige Rollen auf jeden Fall besetzt werden und das schlechte defensive oder offensive Aufstellung soweit möglich vermieden werden.

Dynamische Zuordnung anhand des Nutzens

Die Zuordnung der Rolle zu einem Spieler kann auch anhand einer bestimmten Nutzenfunktion erfolgen. Dabei bekommt der Spieler mit dem größten Nutzen die Rolle zugeordnet. Neben dem individuellen Nutzen der Spieler kann stattdessen auch der Nutzen für das gesamte Team ermittelt werden. So kommt es immer wieder zu Situationen, dass ein Spieler stark benachteiligt wird, weil alle anderen Spieler nur ihren eigenen Nutzen maximieren wollen. Bei Betrachtung des Teams als Ganzes kann die Last auf alle Spieler verteilt werden und damit effizienter auf bestimmte Spielsituationen reagiert werden.

Das Problem wird gut durch die zurückzulegende Distanz der Spieler veranschaulicht. Wird die Distanz zur Rollenposition als Nutzenfunktion verwendet, bekommt der Spieler mit der kleinsten Distanz die entsprechende Rolle zugeordnet. Wenn ein Spieler den Ball vordribbelt und ein Tor schießt, muss er anschließend auf seine Rollenposition zurückkehren. Alle anderen Spieler sind bereits in der Nähe einer Rollenposition und



Abbildung 11: Darstellung der Rollenposition mit Priorität; die Goalie-Rolle wird als Erstes besetzt und die Position des zentralen Mittelfeld Spielers als letztes

die letzte verbleibende Position ist die eines Verteidigers. Dann muss der Torschütze das gesamte Spielfeld überqueren, um die verbleibende Rollenposition zu besetzen. Unter Betrachtung des teambasierten Nutzens würde der Torschütze die vorderste Rollenposition einnehmen und das restliche Team verschiebt sich entsprechend und füllt die Positionen nach hinten auf (siehe Abb. 12).

Eine andere Variante zur Berechnung des Nutzens ist die Verwendung der Zeit, die ein Spieler zu einer bestimmten Position benötigt. Wird nur die Distanz von der aktuellen Feldposition zur Rollenposition betrachtet, wird die Ausrichtung des Spielers missachtet. Je nachdem wie der Spieler rotiert ist, muss er unterschiedliche Bewegungen durchführen. Dabei läuft jede Bewegung unterschiedlich schnell ab, so ist beispielsweise einfaches geradeaus Laufen schneller als eine 180°-Drehung und anschließendem Laufen.

Von Nachteil bei der alleinigen Verwendung der Distanz oder der benötigten Zeit als Nutzenfunktion ist, dass unter Umständen wichtige Rollen nicht besetzt werden, wenn ein (oder mehr) Spieler ausfallen. So kann es beispielsweise vorkommen, dass sich das Team im offensiven Spiel weit nach vorn verschiebt. Fällt in dieser Situation der Torwart aus, ist die Distanz bzw. benötigte Zeit, um die Torwartposition durch einen anderen Spieler zu ersetzen, größer als für jede andere Rolle. Entsprechend würde das Team als Erstes die näherliegenden Rollen besetzen und die Torwartrolle frei lassen.

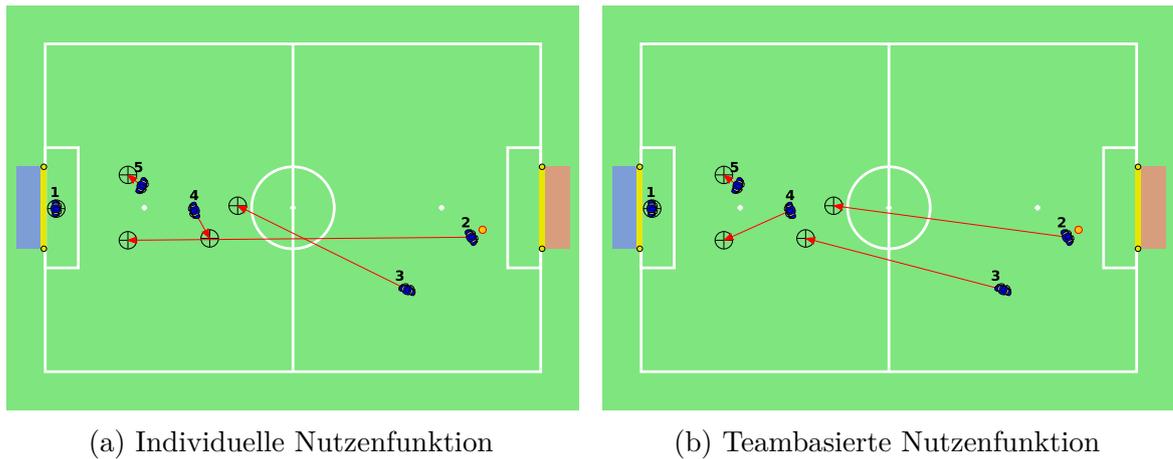


Abbildung 12: Individuelle und teambasierte Nutzenfunktion im direkten Vergleich; Situation aus dem Spiel gegen das Team Bembelbots während der GermanOpen 2019

Die Vorteile sind hingegen eine bessere Verteilung der Laufdistanz auf das gesamte Team und damit insgesamt weniger instabile Roboter aufgrund der Gelenkerwärmung.

Optimale Zuordnung mit der ungarischen Methode

Die optimale Zuordnung von n Spielern zu m Rollen, wobei jeder Spieler nur eine Rolle einnehmen darf und jede Rolle mit Kosten für den Spieler verbunden ist, stellt ein Optimierungsproblem dar und wird häufig auch als Hochzeits- oder Heiratsproblem bezeichnet.

Insbesondere der Nutzen des Teams soll maximiert und die Kosten des Teams minimiert werden. Beispielhaft wird die Distanz als Kostenfunktion des Teams betrachtet, die minimiert werden soll. Das heißt die Distanz, die das gesamte Team zurücklegen muss, damit jeder Spieler eine Rollenposition besetzt, soll minimal sein. Das oben beschriebene Problem, dass ein Spieler das gesamte Feld überqueren muss, um auf seine Rollenposition zu gelangen, soll damit vermieden werden. Die zu lösende Problematik ist, welcher Spieler welche Rolle einnimmt und damit auf welche Position er laufen muss, damit sich das Team als Ganzes so wenig wie möglich bewegt bzw. die kleinste Distanz zurücklegen muss.

Zur Lösung dieses Problems wird die sogenannte „Ungarische Methode“ verwendet. Die Idee wurde von Kuhn[7] entwickelt und von Munkres[16] verbessert. Diese Methode nutzt den Fakt aus, dass jede Zuordnung eindeutig sein muss und dass ein konstanter Wert in der Kostenmatrix von allen Kosten in einer Zeile bzw. Spalte addiert oder subtrahiert werden kann, ohne die optimale Zuordnung zu ändern. Im Gegensatz zu

einer „Brute-Force“-Variante mit Komplexität $\mathcal{O}(n!)$ kann diese mit der von Munkres entwickelte Variante auf $\mathcal{O}(n^3)$ reduziert werden.

Zur Lösung des beschriebenen Problems werden die Kosten eines Spielers bzgl. jeder aktiven Rolle (Distanz zur Rollenposition) in eine Kostenmatrix eingetragen. Wobei die Zeilen die Spieler und die Spalten die jeweilige Rolle darstellen. Als Voraussetzung für die Berechnung der optimalen Zuordnung muss die Anzahl der Spieler und die Anzahl der (aktiven) Rollen gleich sein. Ist das nicht der Fall, müssen die restlichen Zeilen bzw. Spalten mit „Platzhaltern“ (beispielsweise dem größten Wert der Matrix) aufgefüllt werden, um letztlich eine quadratische Matrix zu erhalten.

Von jedem Wert einer Zeile der Kostenmatrix wird der jeweils kleinste Wert subtrahiert und anschließend wird von jedem Wert einer Spalte jeweils dessen kleinster Wert subtrahiert. Bereits jetzt kann eine optimale Zuordnung ermittelt werden, wenn in jeder Spalte und Zeile eine Null steht. Jede Null markiert eine Spieler-Rollen-Zuordnung. Präsentiert sich keine optimale Zuordnung, kann durch weitere Subtraktionen der jeweils kleinsten Werte eine Lösung gefunden werden.

Ziel ist es, die Gesamtkosten zu minimieren:

$$\min C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

wobei

c_{ij} die Kosten für die Zuordnung von Spieler i zur Rolle j sind

und

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn Spieler } i \text{ die Rolle } j \text{ zugeordnet wird} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (5)$$

Unter der Bedingung, dass in jeder Spalte bzw. Zeile der Kostenmatrix nur jeweils eine Null steht:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in [1, n] \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in [1, n] \quad (7)$$

Dieser Algorithmus kann sogar auf dem Roboter mit seiner beschränkten Rechenleistung ausgeführt werden und führt selbst bei der Zuordnung aller Spieler zu allen möglichen Rollen zu einer worst-case Komplexität von $\mathcal{O}(11^3) = 1331$ im Gegensatz zur

Brute-force Komplexität von $\mathcal{O}(11!) = 39.916.800$. Im realen Einsatz spielen nur fünf Roboter, wobei der Torwart seine Rolle behält und nicht wechselt. Zusätzlich können die zur auswahlstehenden Rollen eingeschränkt werden, da es selten sinnvoll ist, alle möglichen Kombinationen zu betrachten.

Rollenwechsel

Neben der eigentlichen Zuordnung von Rolle zu Spieler, stellt der Wechsel der Rolle ein zusätzliches Problem dar. Zum einen sollen alle Spieler zur gleichen Entscheidung gelangen, da ansonsten eine Rolle zwei- oder mehrfach eingenommen wird. Zum anderen soll Oszillation zwischen zwei Spielern vermieden werden. Diese tritt auf, wenn die Kosten bzw. der Nutzen zweier (oder mehr) Spieler dicht beieinander liegen und in jeweils aufeinanderfolgenden Berechnungen zu jeweils unterschiedlichen Entscheidungen führt. Aufgrund der verzögerten und schwankenden Kommunikation kommt es vor, dass sich die Spieler mit jeder neu erhaltenen Nachricht umentscheiden und damit zu keiner stabilen Lösung gelangen.

Zur Lösung des Problems wurden zwei Varianten umgesetzt und getestet. Beide Varianten legen als Entscheidungskriterium zugrunde, wie oft hintereinander die gleiche Entscheidung getroffen wurde.

In der ersten Variante muss der Spieler eine bestimmte Anzahl von gleichen Rollenentscheidungen treffen, bevor er diese Rolle annehmen darf. In der zweiten Variante muss der Spieler für eine bestimmte Zeit die gleiche Rollenentscheidung treffen, bevor er die Rolle wechseln darf. Insbesondere in der zweiten Variante kann das durchschnittliche Nachrichtenintervall als Mindestzeit verwendet werden. Damit wäre sichergestellt, dass im Durchschnitt von allen Spielern neue Informationen eingegangen sind. Wenn die Entscheidung selbst dann noch besteht, dann kann sich der Spieler sicher sein, dass auch alle anderen Mitspieler entsprechend entscheiden.

Zuordnung mit Priorität und Nutzen

Um die beschriebenen Nachteile der Zuordnungsvarianten Rollenpriorität und Nutzen zu vermeiden, wurden beide Varianten kombiniert. Dazu wird jeder Rolle eine Priorität zugeordnet und gleichzeitig werden nur die am höchsten priorisierten Rollen zur Berechnung des Nutzens verwendet. Damit werden wichtige Rollen immer besetzt und zugleich wird der Nutzen zwischen diesen Rollen maximiert bzw. der Aufwand minimiert. Das bedeutet, das Team minimiert die insgesamt zurückzulegende Distanz aller Spieler über die am höchsten priorisierten Rollen. Fällt ein Spieler aus, werden entsprechend die zur auswahlstehenden Rollen reduziert.

In der oben beschriebenen Situation, in der der Torwart ausfällt, würde mindestens

ein Feldspieler auf jeden Fall die Torwartrolle einnehmen – sofern die Rolle am höchsten priorisiert ist.

Sonstige Varianten (zukünftig)

Neben den hier beschriebenen Varianten zu Rollenzuordnung und zum Rollenwechsel können in zukünftigen Arbeiten weitere Methoden implementiert werden. Empfehlenswert ist beispielsweise, die Abhängigkeit von der Übertragungszeit zu reduzieren. Diese Abhängigkeit verhindert im Moment kurzfristige Rollenwechsel. Eine Simulation der eigenen Teammitglieder bzw. Antizipation des Verhaltens der Mit- und Gegenspieler könnte hier von Vorteil sein.

4.4.2 Positionierung

Eng mit der Rolle ist deren Position verbunden. Im Roboterfußball läuft praktisch die gesamte Teamstrategie über die Positionierung der einzelnen Roboter. Solange die Spieler gleichartig sind und keine besonderen Fähigkeiten für bestimmte Rollen mitbringen, wird dies auf längere Sicht auch so bleiben.

In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie sich die Spieler, die eine bestimmte Rolle eingenommen haben, positionieren können. Dabei wird nur die Feldposition der Rollen betrachtet, die die passiven Spieler einnehmen, wenn sie gerade kein aktives Verhalten ausführen.

Statische Positionierung

Die statische Positionierung setzt die bisherige Positionierungsstrategie in der neuen Implementierung um, d.h. die Position der Rollen bleibt das gesamte Spiel über bestehen und ändert sich nicht. Damit lassen sich die unterschiedlichen Varianten besser vergleichen und es steht eine etablierte Variante als Rückfalloption zur Verfügung.

Positionierung in Formation bzgl. des Teamballs

Die Erweiterung der statischen Positionierung ist, diese als Formation aufzufassen. In einer Formation hat jeder Spieler eine Position, die sich aus der relativen Distanz zu seinem Nachbarn ergibt. Die Formation kann dabei frei ohne einen Bezugspunkt sein oder aber gebunden an eine feste Position. Im Fußball ist eines der Ziele den Gegner daran zu hindern, ein Tor zu schießen. Entsprechend sollte das eigene Tor verteidigt werden. Daher ist es sinnvoll das eigene Tor als Bezugspunkt für eine Formationsaufstellung zu wählen. Eine Formationsaufstellung bietet dabei nur dann einen Vorteil gegenüber der statischen Aufstellung, wenn die Position auch geändert werden kann. Dabei verschiebt sich die gesamte Formation indem die relativen Distanzen der Spieler zueinander skaliert

werden. In der implementierten Variante wird sich dabei am Teamball orientiert, wobei der Skalierungsfaktor abhängig von der relativen Distanz des Teamballs zur eigenen Grundlinie ist. In der Ausgangssituation befindet sich der Ball in der Spielfeldmitte und die Spieler nehmen ihre vordefinierte Position ein (Abbildung 13a). Bewegt sich der Ball zum gegnerischen Tor, wird die relative Distanz der Spieler zueinander vergrößert und die gesamte Formation schiebt sich nach vorn Richtung gegnerisches Tor. Bewegt sich der Ball hingegen in der eigenen Hälfte, wird die relative Distanz der Spieler zueinander verkleinert und die Formation zieht sich zusammen. Zusätzlich dreht sich die Formation in Abhängigkeit der Ballposition in y-Richtung, um stets gut zum Ball ausgerichtet zu sein. Durch die Skalierung der relativen Distanzen der Spieler untereinander wird sichergestellt, dass die Formation jederzeit eingehalten wird. Außerdem passt sich das Team abhängig von der Spielsituation entsprechend an. Damit die Positionen nicht außerhalb des Spielfeldes landen, müssen zusätzliche Beschränkungen bezüglich der Auswirkung der Skalierung eingeführt werden. Außerdem kann die Skalierung nur bis zu einem bestimmten Maß verkleinert werden, da sonst die Feldspieler zu dicht zusammenstehen. Entsprechend wurde eine Begrenzung für jede Rollengruppe eingeführt. Die Unterscheidung wird je Gruppe vorgenommen, da jede Gruppe unterschiedlich weit rotieren bzw. die Skalierung bzgl. des Bezugspunktes unterschiedlich angepasst werden kann. In Abbildung 13c ist gut zu erkennen, dass die Gruppe der Verteidiger und Mittelfeldspieler sich gut zum Ball drehen können, im Gegensatz zu den Stürmern, bei denen der rechte Stürmer das Feld verlassen würde, würde er im gleichen Maße wie die beiden anderen Gruppen rotieren. Entsprechend geht die Verteidigung nicht weiter zurück, wenn der Ball sich der Grundlinie nähert (siehe Abbildung 13b).

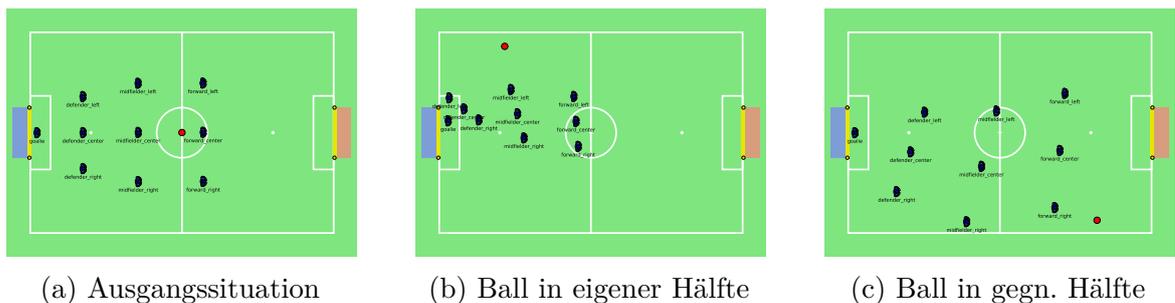


Abbildung 13: Visualisierung der Formation in Abhängigkeit des Teamballs (rote Punkt)

Positionierung mittels Kraft- oder Potentialfeld

Eine weitere dynamische Positionierungsstrategie bzgl. des Teamballs wird durch die Modellierung von Kräften zwischen den Spielern, dem Teamball und den Feldgrenzen

realisiert. Das Ziel bei dieser Variante ist, dass sich die Spieler abhängig von der Spielsituation selbst organisieren und keine feste Formation vorgegeben wird. Dabei sollen die Spieler vom Ball angezogen werden, sich aber untereinander abstoßen und gleichzeitig nicht das Feld verlassen. Zusätzlich soll vermieden werden, dass durch die Ballanziehung das gesamte Team im schlechtesten Fall vollständig auf die gegnerische Hälfte „gezogen“ wird. Um all diese Bedingungen zu erfüllen, wurden verschiedene Kräftefunktionen implementiert, die zusätzlich individuell parametrisiert werden können.

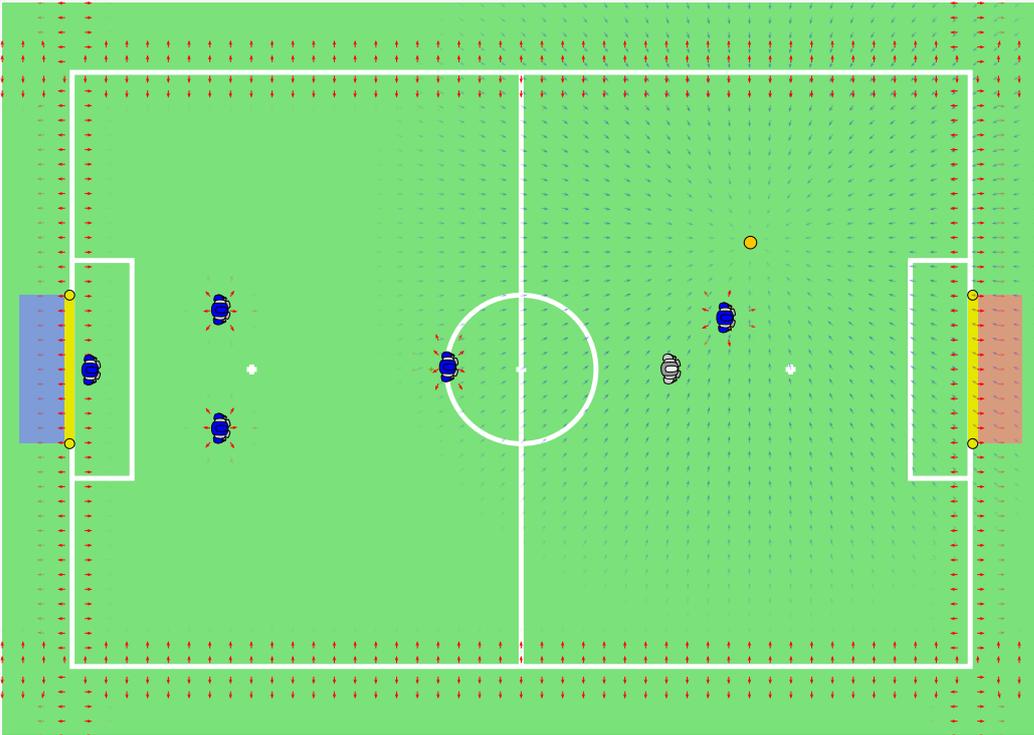


Abbildung 14: Visualisierung der Kräfte aus Sicht des Torwarts; der vorderste Spieler wird vom Ball angezogen und verschiebt seine Homeposition (grau zu blau)

Entsprechend wurde dem Ball eine anziehende Wirkung gegeben, die linear mit der Distanz abfällt und damit nur Spieler wirkt, die näher am Ball sind. Entsprechend wird die Verteidigung nicht vom Ball angezogen, wenn dieser in der gegnerischen Hälfte ist.

Damit die Spieler durch die Ballanziehung nicht alle auf die gleiche Position laufen und sich dadurch gegenseitig behindern, bekommt jeder Spieler eine abstoßende Kraft in seiner unmittelbaren Umgebung. Diese abstoßende Kraft fällt exponentiell mit der Distanz ab und verhindert, dass die Mitspieler über das gesamte Feld abgeschoben werden.

Die Feldlinien haben ebenfalls eine abstoßende Wirkung. Dabei soll ihr Einfluss stark

abfallen und nicht weit ins Feld hineinreichen. Ziel ist es, dass die Spielerpositionen immer innerhalb des Feldes liegen und dieses auch nicht verlassen, wenn der Ball auf der Linie liegt, außerhalb des Feldes gesehen wird oder die abstoßende Wirkung eines Mitspielers den Spieler nach außen drückt.

Schlussendlich bekommen die Ausgangspositionen eine konstant schwach anziehende Wirkung je Spieler. Dies verhindert, dass die Spielerposition mit der Zeit aufgrund unterschiedlicher Kräfte abdriftet und am Ende in einer schlechten Aufstellung endet. Die konstante Anziehung ist dafür notwendig, dass ein Spieler, dessen Position aufgrund der Ballanziehung bis in die gegnerische Hälfte gezogen wurde, nach einiger Zeit auch wieder zurück findet. Abbildung 14 zeigt beispielhaft die wirkenden Kräfte aus Sicht des Torwarts.

Eine ähnliche Form der Positionierung kann mittels eines Potentialfeldes erreicht werden. Dabei wirken die Attraktoren und Repeller wiederum auf die Position des Spielers. Es wurden dazu erneut für die Seitenlinien, Mitspieler und den Ball abstoßende und anziehende Kräfte mit unterschiedlichem Einflussbereich definiert. Im Unterschied zum Kraftfeld, indem die Kräfte zur jeweiligen Position hin oder davon weg wirken, kann ein Potentialfeld beliebig geformte Vektorfelder ausbilden, von geradlinigen über kreisförmige bis hin zu vollständig zufälligen (siehe Abbildung 15).

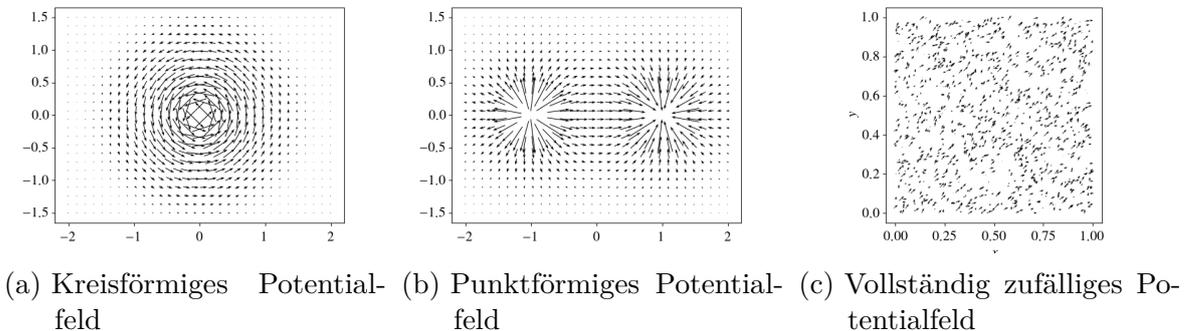


Abbildung 15: Verschiedene Formen von Potentialfelder

Zukünftige Entwicklungen können die verwendeten anziehenden und abstoßenden Kräfte je nach Spielsituation anpassen. So kann beispielsweise der Striker eine größere abstoßende Kraft auf die Mitspieler haben und damit für sich Platz schaffen. Oder der Ball erhält, je nach Position, eine unterschiedlich starke Anziehung. Aktuell gibt es im Nao-Team Humboldt noch keine Gegnererkennung. Ist eine solche implementiert, können die Gegner leicht in das Modell integriert werden, in dem diese ebenfalls eine anziehende bzw. abstoßende Kraft erhalten.

Diese Form der Positionierung kann leicht um weitere Elemente erweitert und leicht angepasst werden. Daneben reagiert das Team aktiv auf die aktuelle Situation, ohne dass zuvor explizite Vorgaben gemacht werden müssen. Allerdings kann es damit auch zu nachteiligen Aufstellungen kommen, die sich von außen nur schwer nachvollziehen lassen. Hier muss die Anwendung zeigen, ob und wie häufig das zu einem Problem werden kann.

Torwartpositionierung

In der gesamten Betrachtung der Spielerpositionierung wurde der Torwart bisher immer ausgelassen. Stattdessen wurde nur die Position der Feldspieler angepasst. Der Torwart ist besonders zu behandeln, da er die letzte Verteidigung ist, außerdem ist es nur ihm erlaubt den Ball mit den Händen zu berühren. Es ist daher nicht sinnvoll, dass der Torwart den Strafraum verlässt, wenn der Ball weit weg ist – lange Schüsse sind weiterhin gefährlich, erst recht wenn der Torwart nicht im Tor steht. Stattdessen sollte der Torwart versuchen, sich immer innerhalb des Strafraums zwischen Ball und eigenem Tor zu positionieren. Da der Torwart selbst nicht immer den Ball sieht, aber seine Mitspieler ihm kommunizieren, wo der Ball gerade ist, kann er anhand dieser Informationen eine besser Verteidigungsposition einnehmen. Dazu wird der Teamball verwendet, um eine Position auf einer Ellipse, die innerhalb des Strafraums zwischen den beiden Pfosten aufgespannt wird, zu ermitteln. Das stellt sicher, dass der Torwart den Strafraum nicht verlässt, wenn der Ball weit entfernt ist und sich dennoch auf gerader Linie zwischen Ball und Tor stellt. Da der Teamball verwendet wird, positioniert sich der Torwart selbst dann korrekt, wenn er den Ball selbst gar nicht sieht.

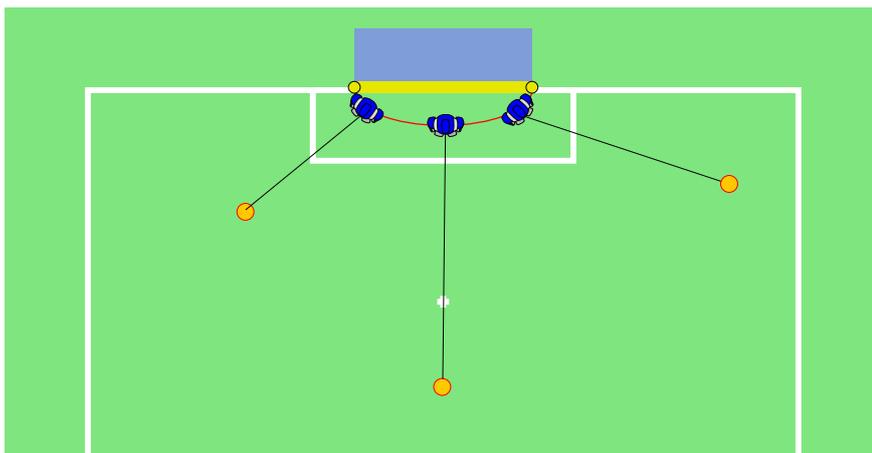


Abbildung 16: Verteidigungspositionen des Torwarts in Abhängigkeit von der Teamballposition

Sobald der Ball in den Einflussbereich des Torwarts gelangt, geht der Torwart an den Ball und versucht ihn wegzuschießen. Dabei sollte wiederum darauf geachtet werden, ob nicht bereits ein anderer Spieler am Ball steht und entsprechend besser positioniert ist, um die Situation zu klären (siehe folgenden Abschnitt).

4.4.3 Dynamische Rollen

Neben den statischen Rollen, die sich immer auf eine bestimmte Feldposition beziehen, können die Spieler auch sogenannte dynamische Rollen einnehmen. Diese Rollen haben ein spezielles Verhalten und dienen dazu, auf kurzfristige Änderungen und Situationen zu reagieren. Sie können auch als aktives Verhalten aufgefasst werden, im Gegensatz zu den statischen Rollen, deren Verhalten die passiven Entscheidungen darstellen. Folgende dynamische Rollen wurden für diese Arbeit definiert:

- **Striker:** Ein aktiver Spieler, der direkt am Ball agiert oder zum Ball geht.
- **Supporter:** Spieler, der den Striker aktiv unterstützen soll.
- **Goaliesupporter:** Spieler, der den Torwart in gefährlichen Situationen unterstützen soll.

Alle drei dynamischen Rollen sind dabei exklusiv, d.h. nur ein Spieler kann die jeweilige Rolle einnehmen.

Striker

Der Striker hat keine feste Position und jeder Spieler kann zum Striker werden. Ziel des Strikers ist es, den Ball nach vorne zu spielen und wenn möglich ein Tor zu schießen. Die Entscheidung, welcher Spieler Striker wird, kann von verschiedenen Faktoren abhängen. In der statischen Strategie hat jeder Spieler die Zeit, die er zum Ball brauchen würde, selbst berechnet und an seine Mitspieler kommuniziert (siehe Abschnitt 4.3). Die Abstimmung über die Strikerrolle erfolgte damit explizit.

In der neuen dynamischen Variante wird die Zeit, die ein Spieler benötigt, nicht mehr kommuniziert. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass jeder Spieler diese Information für seine Mitspieler selbst berechnen kann, da ihm bereits die Position und der Ball von den Mitspielern kommuniziert wurde und damit alle benötigten Informationen für die Berechnung zur Verfügung stehen. Die Abstimmung über die Strikerrolle erfolgt damit implizit und könnte auch durch eigene Beobachtungen realisiert werden.

Statt einen Zeitwert zu berechnen, der die tatsächliche Lauf- bzw. Rotationsgeschwindigkeit mit einbezieht, wurde die Distanz der Spieler zum Ball als Maß gewählt, um zu

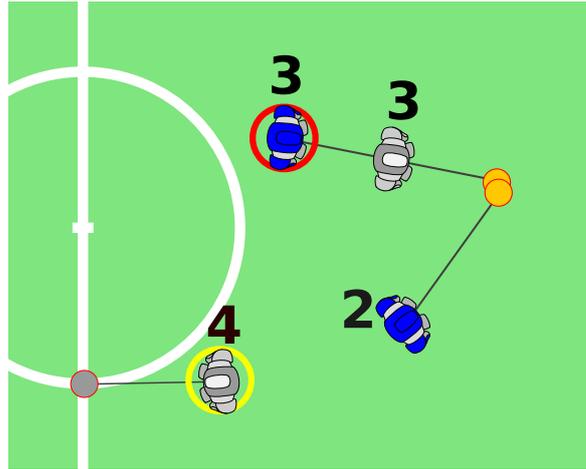


Abbildung 17: Visualisierung der Strikerabstimmung

ermitteln, welcher Spieler Striker werden soll. Ähnlich wie bei der statischen Strategie werden wiederum nur die Spieler als mögliche Striker betrachtet, die aktiv auf dem Spielfeld sind und den Ball sehen. Anschließend wird derjenige Striker, dessen Distanz zum Ball am kleinsten ist. Glauben zwei (oder mehr) Spieler unterschiedliche Bälle zu sehen (durch Fehlwahrnehmung oder Delokalisierung), werden beide Spieler zum Striker. Damit soll sichergestellt werden, dass mindestens ein Spieler den richtigen Ball spielt und nicht durch Fehlwahrnehmung anderer Mitspieler behindert wird. Um Oszillationen zu vermeiden, wenn zwei Spieler eine ähnliche Distanz zum Ball haben, wird dem aktuellen Striker ein bestimmter Vorsprung gewährt, mit dem er auf jeden Fall schneller am Ball sein sollte, als ein ähnlich weit entfernter Mitspieler. Abbildung 17 zeigt eine mögliche Situation, in der zwei Spieler ähnlich weit vom Ball entfernt sind, der Spieler 3 ist allerdings bereits Striker (roter Kreis) und erhält einen Bonus, der ihn dichter an den Ball schiebt (graue 3). Damit ist er näher am Ball und bleibt Striker. Die graue 4 glaubt im Kreuzungspunkt des Mittelkreises einen Ball zu erkennen und wird daraufhin Secondstriker.

Die Verwendung der Distanz zum Ball hat sich als robuster herausgestellt, als die Berechnung der benötigten Zeit. Damit die Zeit zum Ball genauer ist als die Distanz, muss die Lauf- und Drehgeschwindigkeit korrekt ermittelt werden und der Realität entsprechend. Sind die Spieler schneller als berechnet, kann es passieren, dass zwei Spieler zur gleichen Zeit zum Ball laufen, da aufgrund der Kommunikationslatenz die Spieler bereits weitergelaufen sind und dem Mitspieler bei der nächsten Möglichkeit damit „überraschen“, wie weit der Spieler bereits gekommen ist. Abbildung 18 zeigt eine solche Situation.

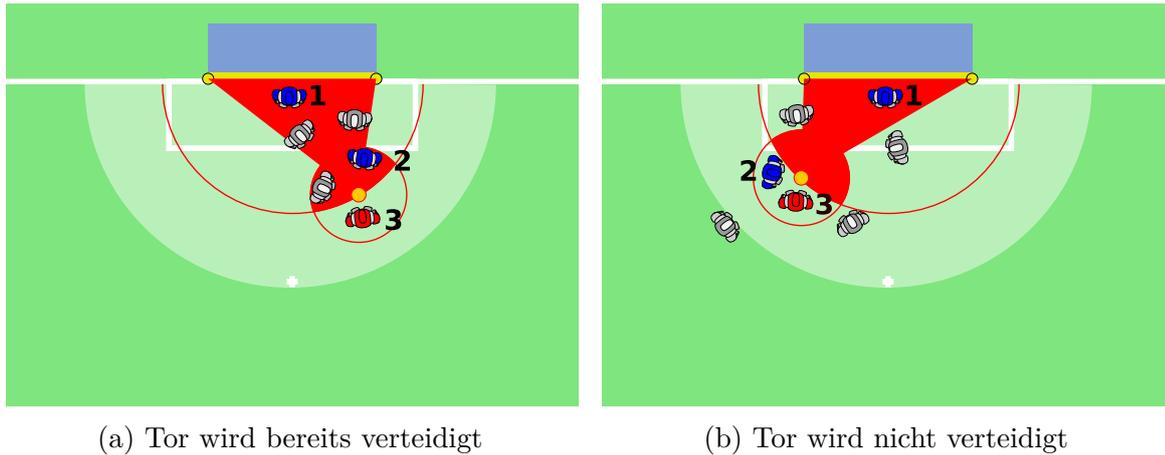


Abbildung 19: Einflussbereich des Torwarts bzw. Torwartentscheidung; graue Spieler stellen zusätzlich beispielhaft weitere Positionen dar, die zum gleichen Ergebnis führen wie die farbigen Positionen

steht und damit einen direkten Torschuss verhindern kann (siehe roter Bereich in Abb. 19). Die möglichen Situationen für den Torwart zur Strikerabstimmung sind in Abbildung 19 dargestellt. Der Ball befindet sich innerhalb des Einflussbereichs, entsprechend könnte der Torwart Striker werden. In Abbildung 19a befindet sich Spieler 2 in Ballnähe und verteidigt somit bereits das Tor und der Torwart muss den Torraum nicht verlassen. Weitere verteidigende Positionen sind durch die grauen Spieler dargestellt. Beispielsweise steht einer der grauen Spieler nicht zwischen Tor und Ball, befindet sich aber in direkter Nähe dazu und ist damit bereit den Ball wegzuspielen und das Tor zu verteidigen. Entsprechend wird er vom Torwart als bereits verteidigend eingestuft. Die anderen beiden grauen Spieler befinden sich nicht in Ballnähe, stehen aber zwischen Tor und Ball und werden vom Torwart ebenfalls als bereits verteidigend eingestuft. Im Gegensatz dazu werden die Spieler in Abbildung 19b nicht als verteidigend wahrgenommen und der Torwart wird zum Striker, aufgrund dessen er versucht den Ball wegzuschießen. Die grauen Spieler befinden sich in diesem Fall nicht in direkter Ballnähe oder auf direkter Linie zwischen Ball und Tor und verteidigen das Tor entsprechend nicht. Der Spieler 2 ist in diesem Fall zwar in Ballnähe, hat aber eine schlechte Verteidigerposition. Damit wird er vom Torwart als nicht verteidigend eingestuft.

Im statischen Verhalten ist der Torwart auf jeden Fall Striker geworden, sobald der Ball in seinen Einflussbereich gekommen ist. Damit kam es häufiger vor, dass der Torwart einem Spieler, der den Ball hätte wegschießen können, die Striker-Rolle abgenommen und damit eine bereits vorhandene Verteidigung blockierte.

Beispielsweise nahm der Torwart während des Spiels gegen UChile die Striker-Rolle

dem Spieler 4 weg, obwohl dieser bereits gut positioniert war und den Ball wegspielen wollte. Der Torwart hat allerdings in dem Spieler einen Ball gesehen und ist damit Striker geworden (siehe Abbildung 20).

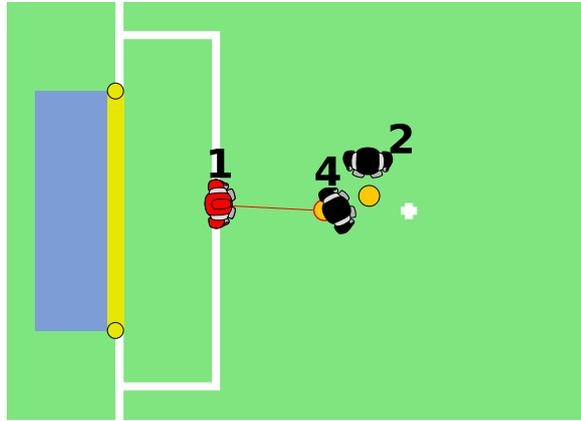


Abbildung 20: Der Torwart sieht in einem Mitspieler einen Ball und nimmt den bereits gut positionierten Spieler die Strikerrolle weg (Situation aus dem Spiel gegen das Team UChile, erste Halbzeit, vom RoboCup 2018)

Supporter

Der Supporter soll den Striker unterstützen. Das kann je nach Taktik oder Spielsituation auf unterschiedliche Weise erfolgen. Er kann unterstützend wirken, indem er sich offensiv aufstellt und als Anspielstation dient oder er kann sich defensiv positionieren und bei einem Ballverlust des Strikers den Ball schnell wieder zurückerobern.

Prinzipiell können alle passiven Spieler gleichzeitig zum Supporter werden. Das hätte aber zur Folge, dass die Verteidigung und optimale Feldabdeckung vernachlässigt wird, sodass insbesondere bei Teams mit langen Schüssen die Spieler dem Ball hinterherlaufen würden. Stattdessen sollten nur die Spieler Supporter werden, die sich in Ballnähe aufhalten und den Ball selbst sehen. Da in der SPL nur fünf Spieler pro Mannschaft spielen, wobei einer davon der Torwart und ein anderer Striker ist, verbleiben für die Supporterauswahl nur drei weitere Spieler. Um die Verteidigung nicht zu vernachlässigen, ist es sinnvoll, nur einem Spieler die Supporter-Rolle zu geben. Die Entscheidung, welcher der verbleibenden Spieler Supporter werden soll, wird ähnlich der Strikerentscheidung ermittelt. Dazu werden alle Spieler ausgewählt, die den selben Ball wie der Striker sehen und einen bestimmten Abstand zum Ball nicht überschreiten. Aus diesen Spielern wird wiederum jener ausgewählt, dessen Abstand am kleinsten ist. Je nach Strategie (offensiv/defensiv) kann dieser sich entsprechend seiner Rolle positionieren und verhalten (siehe Abschnitt 4.4.4).



Abbildung 21: Mögliche Aufstellung des Supporters; vor dem Striker für ein offensives Spiel, hinter dem Striker für ein defensives Spiel

In Abbildung 21 ist beispielhaft dargestellt wie beide Varianten aussehen könnten. In diesem Szenario ist der Spieler mit der Nummer 3 der aktuelle Striker und die 4 der Supporter. Die roten Spieler repräsentieren die gegnerischen Spieler. Bei einer offensiven Strategie kann jetzt die 4 näher zum gegnerischen Tor laufen und auf einen Pass warten. Im Gegensatz zur defensiven Variante, wo sich der Spieler hinter dem aktuellen Striker positioniert, um Ballverluste schnell abfangen zu können.

In der dargestellten Situation wäre die offensive Variante mit Passspiel zu bevorzugen, da der Striker bereits von der gegnerischen Verteidigung attackiert wird. Ein Freilaufen und ein entsprechender Pass würde der 4 einen ungehinderten Torschuss ermöglichen.

Im Nao-Team Humboldt sind noch keine gezielten Pässe möglich und eine sichere Gegnererkennung ist ebenfalls nicht vorhanden. Daher kann die dargestellte Situation nicht gut eingeschätzt werden und folglich wird nur die defensive Variante verwendet. Zukünftige Entwicklungen können hier mehr Spielraum für verschiedene Varianten ermöglichen.

Goaliesupporter

Der Goaliesupporter unterstützt den Goalie dabei das Tor zu verteidigen, solange dieser damit beschäftigt ist, den Ball aus seinem Einflussbereich zu schießen. Laut den Regeln darf sich nur ein weiterer Spieler, neben dem Goalie, im eigenen Strafraum aufhalten. Entsprechend können nicht mehrere Spieler Goaliesupporter sein und es muss, wie auch schon beim Striker und Supporter, klar sein, welcher der Spieler diese Rolle

auf die rote 3 einen freien Torschuss ermöglichen würde. Bewegt sich die blaue 2 zur Verteidigerposition, würde sie einen Pass oder direkten Torschuss zumindest erschweren.

Aufgrund der fehlenden Gegnererkennung im Nao-Team Humboldt, kann allerdings dieses Kriterium nicht in die Goaliesupporterentscheidung mit einfließen und bietet damit Verbesserungspotenzial für zukünftige Anpassungen.

4.4.4 Verhalten

Als Verhalten wird im Nao-Team Humboldt der Teil des Codes verstanden, der für die Entscheidung, was der Roboter machen soll, verwendet wird. Das kann beispielsweise einfach die Entscheidung sein, auf welche Position er läuft, wie die Ballsuche auszuführen ist oder was er in einer bestimmten Situation machen soll. Der Vorteil, das Verhalten von der Datenverarbeitung getrennt zu halten, ist, dass sich das Verhalten damit leicht ändern und austauschen lässt.

Für jede der in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen und in Tabelle 1 dargestellten Rollen kann ein separates Verhalten implementiert werden. Aktuell wurde für alle Spieler das gleiche Verhalten von der statischen Strategie kopiert und minimale Anpassungen für die Verwendung des Rollenkonzepts vorgenommen. Damit soll die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Varianten gewährleistet und eine Bewertung der dynamischen Strategievarianten ermöglicht werden.

Für jede Rolle spezialisiertes Verhalten zu implementieren, ermöglicht, dass beispielsweise Verteidiger andere Entscheidungen treffen, als Mittelfeldspieler oder Stürmer. So können Verteidiger den Ball eher passen, anstatt einfach nur nach vorne zu spielen, während die Stürmer eher versuchen, direkte Torschüsse durchzuführen. Mittelfeldspieler können je nach Spielsituation den Ball vor oder auch zurück passen.

Das rollenspezifische Verhalten wäre eine konkrete Implementierung einer bestimmten Teamstrategie, die die Besonderheiten der Rollen betrachtet.

Damit das beispielhaft beschriebene Verhalten umgesetzt werden kann, muss im Nao-Team Humboldt mindestens noch ein Passspiel entwickelt werden. Kleinere spezielle Verhaltensweisen für die jeweilige Rolle konnten aber bereits jetzt schon umgesetzt werden.

5 Experimentelle Auswertung

In diesem Kapitel werden als Erstes die Möglichkeiten von gut aufbereiteten Daten zur Auswertung gezeigt. Dazu werden beispielhaft einige Auswertungen durchgeführt und die Schlussfolgerungen, die sich daraus ziehen lassen, erläutert. Anschließend wird die praktische Anwendung der implementierten Strategien sowohl in der Simulation als auch auf dem realen Roboter beschrieben und empirisch ausgewertet.

5.1 Datenauswertung

In Abschnitt 3.3 wurde gezeigt wie und welche Daten gesammelt werden. Auf Basis dieser Datensammlung können systematisiert Analysen durchgeführt werden. So konnte im Nachhinein festgestellt werden, dass es Unterschiede zwischen den Spielfeldern beim RoboCup 2018 gab.

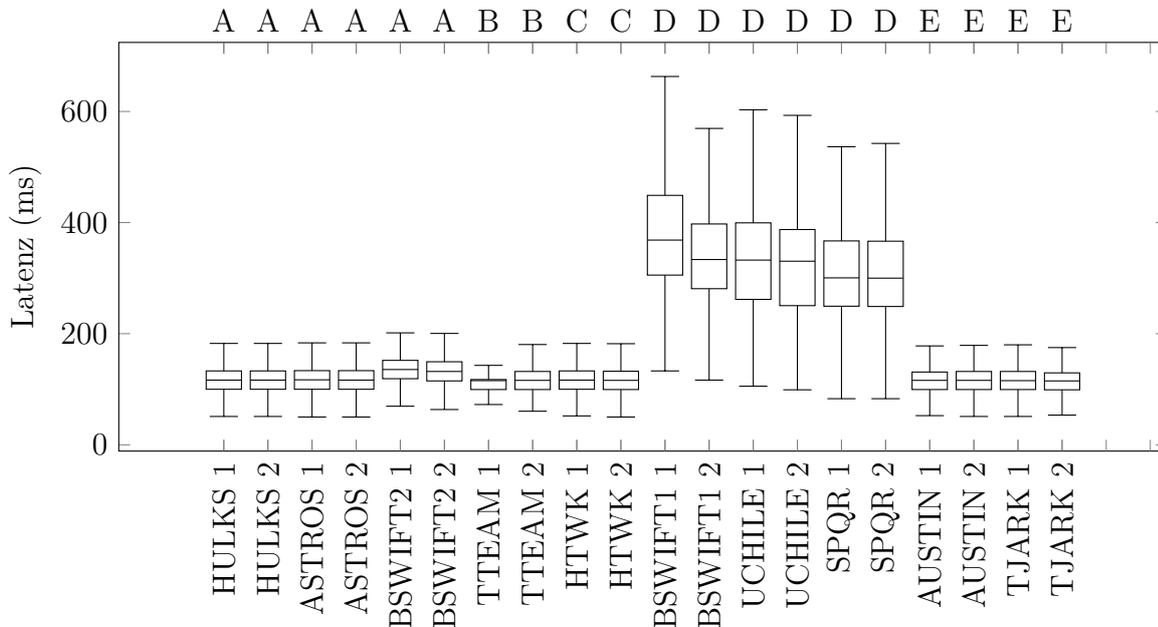


Abbildung 23: Latenzen je Spielfeld und Spielhälfte während des RoboCups 2018

Insgesamt wurde auf fünf Feldern gespielt. Das Nao-Team Humboldt hat auf jedem Feld mindestens ein Spiel bestritten, sodass eine Analyse der Teamkommunikation für jedes Feld durchgeführt werden konnte. Dabei fällt auf, dass die Latenz auf dem Feld D im Vergleich zu allen anderen Feldern mehr als dreimal so hoch war (siehe Abb. 23 und Tabelle 2). Somit wird auch ersichtlich, warum die Roboter sich synchronisieren und die Kommunikationsverzögerung in ihren Entscheidungen beachten sollten.

Spiel/Gegner	Feld	Median	Mittelwert	Stdabw.	min.	max.
HULKS1	A	116.5	117.0	24.0	49.5	467.0
HULKS2	A	116.5	115.8	23.4	45.5	250.0
ASTROS1	A	117.0	119.2	24.1	50.0	217.5
ASTROS2	A	116.5	119.1	24.0	50.0	316.5
BSWIFT2 1	A	135.5	136.0	24.7	67.0	359.0
BSWIFT2 2	A	132.0	127.7	26.7	54.0	266.5
TTEAM1	B	115.5	109.9	23.6	49.5	366.5
TTEAM2	B	116.0	111.7	22.0	48.5	350.0
HTWK1	C	116.5	118.2	23.0	48.0	335.0
HTWK2	C	116.0	112.9	22.3	48.0	331.5
BSWIFT1	D	368.5	388.5	126.7	133.0	1317.0
BSWIFT2	D	333.5	336.7	87.4	116.5	750.5
UCHILE1	D	332.5	333.5	108.3	105.5	1198.0
UCHILE2	D	330.5	325.8	95.7	99.0	848.5
SPQR1	D	300.5	310.4	91.8	83.0	750.0
SPQR2	D	300.0	306.0	89.4	83.0	697.5
AUSTIN1	E	116.0	112.6	23.5	48.0	398.5
AUSTIN2	E	116.0	111.5	22.2	49.0	219.0
TJARK1	E	115.5	111.8	24.0	32.5	251.5
TJARK2	E	115.0	110.7	23.3	42.0	251.0

Tabelle 2: Statistische Auswertung der Latenzen je Spielfeld und Spielhälfte vom RoboCup 2018

Auch der Blick auf den Latenzverlauf während eines Spiels zeigt die großen Verzögerungen, mit denen die kommunizierten Informationen beim Spieler teilweise ankommen. In Abbildung 24 wird die Latenz im Verlauf der zweiten Halbzeit im Spiel gegen UNSW während der GermanOpen 2019 gezeigt. Die rote Linie zeigt den Durchschnitt der Latenzen aller Spieler. In grau im Hintergrund wird die Latenz der einzelnen Spieler im zeitlichen Verlauf gezeigt.

Eine weitere Auswertung kann auch allgemeine Kennzahlen betrachten und eine Aussage über eingesetzten Algorithmen geben. Beispielsweise lassen sich so die Ausführungszeiten je Frame betrachten und Engpässe bei der Datenverarbeitung der Roboter erkennen. In Abbildung 25 sind die Ausführungszeiten aller Spieler aus dem Testspiel gegen das Team HULKS von der GermanOpen 2019 dargestellt. Dabei lässt sich folgendes erkennen:

- Der Torwart hat im Durchschnitt am wenigsten zu tun (erste Diagrammreihe);

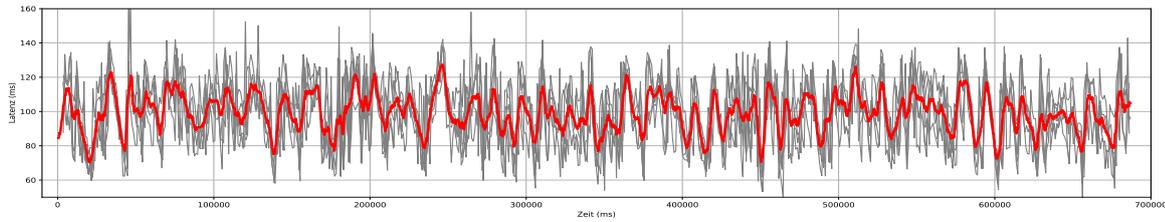


Abbildung 24: Latenz im Verlauf einer Halbzeit (UNSW, 2. Halbzeit, GermanOpen 2019); in rot der Durchschnitt aller Spieler ($\pm 2s$)

das Rauschen der Ausführungszeiten ist kleiner im Vergleich zu den anderen Spielern und im Histogramm ist zu erkennen, dass knapp 60% der Frames bei 33ms Ausführungszeit liegen.

- Die hohen Ausschläge zu Beginn jedes Roboters zeigen die Initialisierung der Pfeifenerkennung.
- Bei Frame 7500 des 5. Spielers ist das Rauschen der Ausführungszeiten relativ gering, das liegt daran, dass der Spieler in dieser Zeit eine Strafe absitzen musste („penalized“).

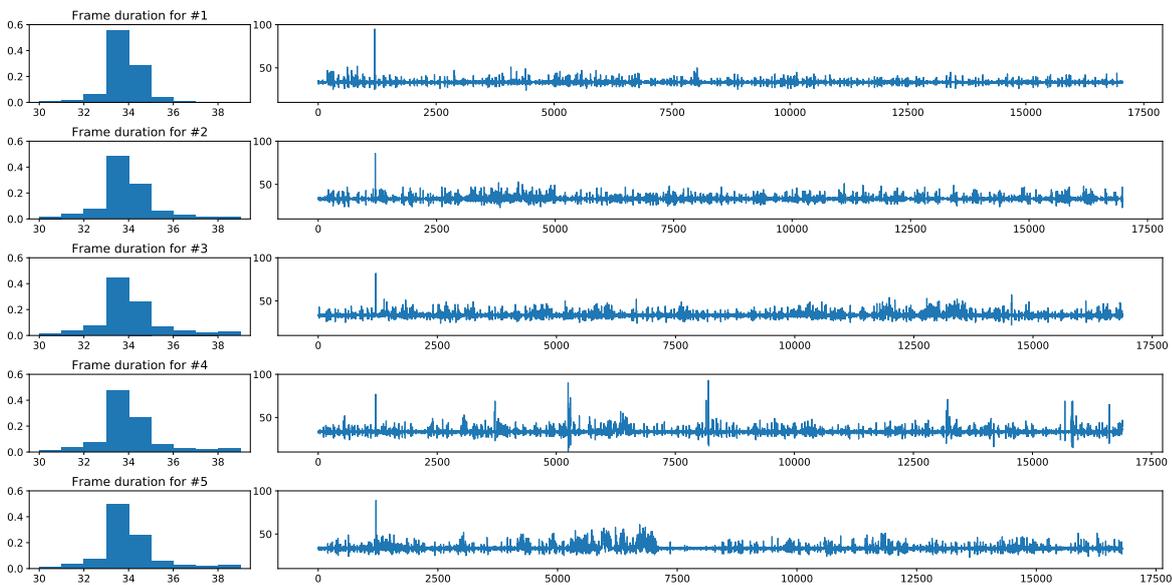


Abbildung 25: Ausführungszeiten der Roboter je Frame (Testspiel während der GermanOpen 2019 gegen das Team HULKS)

Solche und weitere ähnliche Auswertungen lassen sich mit dem eingeführten System einfacher erstellen und sollte in zukünftigen Arbeiten weiter genutzt und ausgebaut werden.

5.2 Simulationsergebnisse

Im Zuge dieser Arbeit wurde Simspark an die aktuellen SPL Regeln angepasst und auf den neusten Versionsstand gebracht. Zusätzlich wurden Versuche unternommen, die Simulation zu beschleunigen, um häufiger Spiele durchführen zu können. Letztendlich wurde ein Skript geschrieben, mit dem eine bestimmte Anzahl an Spielen zwischen zwei Teams durchgeführt werden kann. Die Teams müssen zuvor konfiguriert werden (Module aktivieren und Parameter entsprechend einstellen) und können anschließend gegeneinander antreten. Um systematische Fehler zu vermeiden, z.B. dass auf einer Hälfte ein Team häufiger gewinnt, werden die Seiten für jedes Team nach einem Durchgang getauscht.

Ein Nachteil der Simsparksimulation ist, dass nicht alle Regeln der SPL umgesetzt werden können. Insbesondere die vom Schiedsrichter getroffenen Entscheidung, ob ein Regelverstoß vorliegt (Pushing, Foul) kann nicht in der Simulation abgebildet werden. Entsprechend werden die Spieler nur in wenigen Fällen tatsächlich bestraft. Die Spieler werden aus dem Spiel genommen, wenn sie beim Anstoß des Gegners in den Mittelkreis laufen oder wenn sich neben dem Goalie ein weiterer Spieler im eigenen Strafraum aufhält. Da diese Verstöße sehr selten auftreten, spielen die Teams die meiste Zeit in voller Mannschaftsstärke.

In einem Spiel mit echten Robotern treten solche Regelverstöße hingegen häufig auf und haben damit einen großen Einfluss auf das Spiel. In der Simulation kann damit ein Teil der neuen Strategie nicht beurteilt werden. Insbesondere betrifft dies das Unterzahlspiel und eine entsprechende Rollenzuordnung bzw. Positionswechsel.

Für die Durchführung der Simulationsspiele wurde sich bewusst dafür entschieden, bestimmte Aspekte, die im Roboterfußball auftreten, zu vereinfachen, um damit die eigentliche Fragestellung, inwiefern die Strategie Einfluss auf ein Spiel hat, beantworten zu können.

Dazu wurde zum einen der simulierte Akkuverbrauch und die Gelenkerwärmung deaktiviert. Beides sind Einflussfaktoren, die die Strategie beeinflussen können und im ersten Schritt eine Beurteilung erschweren, wenn nicht erkennbar ist, welcher Umstand zu dem besseren oder schlechteren Ergebnis geführt hat. Außerdem ist es für die Roboter in einem echten Spiel kein Problem mit einer Akkuladung zu spielen und auch die Gelenkerwärmung wird selten innerhalb eines Spiels zu einem Problem.

Weitere Faktoren, die eine Simulation von einem echten Spiel unterscheiden, sind die Lokalisierung, die Ballerkennung und die Kommunikation. Auch hier wurde sich für eine bessere Bewertung und Auswertung der eingesetzten Strategie entschieden.

In der Simulation wissen die Roboter, wo sie sich auf dem Spielfeld befinden, ohne sich orientieren zu müssen (GPS). Außerdem können sie den Ball über das gesamte Spielfeld hinweg sehen, wenn sie in die entsprechende Richtung schauen. Des Weiteren dürfen die Spieler mehrmals pro Sekunde miteinander kommunizieren, im Gegensatz zu der aktuellen SPL-Regelung, in der die Spieler nur einmal pro Sekunde kommunizieren dürfen. Neben dem Sendeintervall existiert in der Simulation auch keine technisch bedingte Verzögerung, wie sie in einem SPL-Spiel auftreten würde. Die Anpassungen gelten für beide Teams und sollten im Vergleich der neuen mit der alten Strategie keine Auswirkung auf die Auswertung haben.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, hat die dynamische Teamstrategie und -koordination mit unterschiedlichen Konfigurationen gegen die statische Strategie des Nao-Teams Humboldt gespielt. Insgesamt wurden 48 verschiedene Varianten mit jeweils 140 Spielen simuliert (jeweils zwei Halbzeiten). Dabei dauerte ein Spiel durchschnittlich 38 Minuten. Um so viel Simulationsspiele wie möglich durchzuführen, wurden vier Simulationen gleichzeitig ausgeführt. Im Folgenden wird das Team mit der statischen Strategie des Nao-Team Humboldts als Basis bezeichnet und das Team mit dem neuen Rollenkonzept als NaoTH. Für die Auswertung wird die Summe der Siege (Siege NaoTH (S_N), Siege Basis (S_B) und Unentschieden (U)) sowie geschossenen Tore (Tore NaoTH (T_N), Tore Basis (T_B)) aller Spiele verwendet. Außerdem wird das Sieghverhältnis NaoTH zu Basis ($S_{N/B}$) und Torverhältnis NaoTH zu Basis ($T_{N/B}$) als Indikator genutzt, um zu zeigen, ob die neue Strategie der bisherigen Basis-Strategie überlegen ist oder nicht.

5.2.1 Auswertung der Simulationsvarianten

Basis vs. Basis

Um eine Vergleichsgrundlage zu haben, wurde als Erstes ein Simulationsdurchlauf mit zwei Teams durchgeführt, die beide die statische Strategie des Nao-Team Humboldts verwendeten (Basis vs. Basis). Damit sollten systematische Fehler aufgedeckt werden. Die Annahme ist, dass zwei Teams mit der gleichen Strategie in etwa gleich oft gewinnen. Dies hat sich im Ergebnis auch bestätigt (siehe Abb. 26a).

Statische Positionierung ohne Rollenwechsel

Der nächste Simulationsdurchlauf sollte die statische Rollenzuordnung mit statischer Positionierung testen. Dazu wurde jedem Spieler eine Rolle und dessen Position zugewiesen. Beides hat sich im Spielverlauf nicht geändert. Die Idee der statischen Rollenzuordnung ist, die statische Strategie des Nao-Team Humboldts in das Rollenkon-

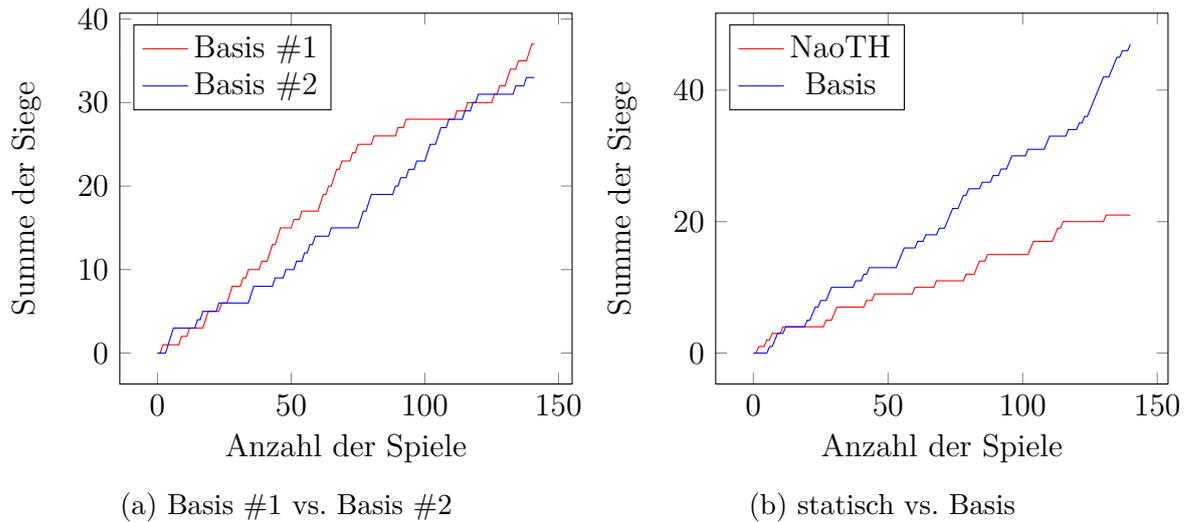


Abbildung 26: Kumulierte Siege nach Anzahl der durchgeführten Spiele

zept zu überführen. Entsprechend war die Annahme, dass ähnlich wie im ersten Fall die Siege-/Niederlagenbilanz ausgeglichen sein sollte. Das konnte sich in den durchgeführten Simulationen nicht bestätigen (Abb. 26b). Die Ursache konnte nicht abschließend festgestellt werden. Unter Umständen konnte das Verhalten nicht exakt im Rollenkonzept übertragen werden und leichte Änderungen haben somit zum schlechteren Ergebnis geführt.

Statische Positionierung mit Rollenwechsel

Als nächstes wurde mit statischer Positionierung und dynamischen Rollenwechsel gespielt. Jeder Rolle wurde eine Feldposition zugewiesen, die sich im Spielverlauf nicht änderte. Die zu Beginn zugewiesene Rolle konnte hingegen gewechselt werden. Dabei wurden verschiedene Parameterbelegungen für das implementierte Modul getestet. Zum einen wurde die Bewertungsfunktion, nach der ein Rollenwechsel durchgeführt wird (Priorität, Teamdistanz, Priorität und Teamdistanz), geändert und zum anderen wurde der Zeitpunkt des Wechsels angepasst (Zeit, Anzahl der Entscheidungen; siehe Abschnitt 4.4.1).

Im Ergebnis (Tabelle 3) hat die Variante mit Rollenpriorität und festgelegter Entscheidungsanzahl eine höhere Siegchance gegenüber der Basis-Strategie als die restlichen simulierten Varianten. Das ist nachvollziehbar, da in dieser Variante die wichtigsten Rollen besetzt sind. Dass die Variante mit Wechsel anhand der Entscheidungsanzahl in der Simulation besser ist, als anhand der Zeit, lässt sich damit erklären, dass in der Simulation die Entscheidungen schneller getroffen werden, als wenn für eine bestimmte Zeit gewartet werden muss. Damit ist die zeitliche Variante langsamer in ihrem

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	statisch	58	35	47	70	95	0.74	0.74
statisch	Priorität, Anzahl	54	51	35	109	78	1.46	1.40
statisch	Distanz, Anzahl	65	31	44	81	87	0.70	0.93
statisch	Priorität+Distanz, Anzahl	67	43	30	93	59	1.43	1.58
statisch	Priorität, Zeit	61	35	44	94	108	0.80	0.87
statisch	Distanz, Zeit	74	26	40	61	85	0.65	0.72
statisch	Priorität+Distanz, Zeit	52	42	46	85	83	0.91	1.02
Gesamt		431	263	286	593	595	0.92	1.00

Tabelle 3: Ergebnis der Simulationdurchläufe mit statischer Positionierung und dynamischen Rollenwechsel

Wechsel und Rollen bzw. Positionen werden später besetzt. Beim Einsatz auf dem realen Roboter sollte hingegen der zeitliche Wechsel bevorzugt werden. Zum einen sind die Ausführungszeiten auf jedem Roboter unterschiedlich, zum anderen kann der zeitliche Wechsel leichter auf Verzögerungen im Netzwerk reagieren und diese bei der Entscheidung berücksichtigen. Entsprechende Experimente und Auswertungen auf dem Roboter sollten in zukünftigen Arbeiten durchgeführt werden.

Dynamische Positionierung (Kraft) mit Rollenwechsel

Der nächste Simulationdurchlauf sollte die dynamische Positionierung mittels anziehender und abstoßender Kräfte testen. Dazu wurden experimentell ermittelte Parameter für die Kräfte verwendet und wiederum verschiedene Rollenwechsel getestet. Dabei sind die meisten simulierten Varianten durchweg besser im Vergleich zur Basis-Strategie (Tabelle 4). Im Fall von Distanzentscheidung und Wechsel nach Entscheidungsanzahl ist die Gewinnchance doppelt so hoch. Im Vergleich zur vorherigen Variante (statische Positionierung mit Rollenwechsel) werden in dieser Variante mehr Tore erzielt und weniger Tore zugelassen.

Dynamische Positionierung (Formation) mit Rollenwechsel

Anschließend wurde die dynamische Positionierung mittels Formation simuliert. Hier wurden ebenfalls die verwendeten Formationsparameter experimentell ermittelt und die verschiedenen Wechselvarianten getestet. Im Ergebnis gewinnen alle Varianten gegenüber der Basis-Strategie häufiger und der Rollenwechsel mit Teamdistanz und Entscheidungsanzahl hat die wenigsten Niederlagen aller getesteten Varianten. In der Summe hat dieser Simulationsblock die wenigsten Niederlagen und die wenigsten zugelassenen Gegentore im Vergleich zu den anderen simulierten Positionierungsvarianten.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
Kraft	statisch	63	39	38	78	84	1.03	0.93
Kraft	Priorität, Anzahl	58	52	30	113	76	1.73	1.49
Kraft	Distanz, Anzahl	66	50	24	104	62	2.08	1.68
Kraft	Priorität+Distanz, Anzahl	67	34	39	84	95	0.87	0.88
Kraft	Priorität, Zeit	51	51	38	101	80	1.34	1.26
Kraft	Distanz, Zeit	59	46	35	101	83	1.31	1.22
Kraft	Priorität+Distanz, Zeit	66	45	29	108	61	1.55	1.77
Gesamt		430	317	233	689	541	1.36	1.27

Tabelle 4: Ergebnis der Simulationsdurchläufe mit dynamischer Positionierung anhand anziehender und abstoßender Kräfte sowie dynamischen Rollenwechsel

Außerdem ist die Gesamtgewinnwahrscheinlichkeit über alle Simulationsläufe von allen getesteten Varianten am höchsten (Tabelle 5).

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
Formation	statisch	55	55	30	109	67	1.83	1.63
Formation	Priorität, Anzahl	64	49	27	102	58	1.81	1.76
Formation	Distanz, Anzahl	68	49	23	90	46	2.13	1.96
Formation	Priorität+Distanz, Anzahl	68	41	31	84	66	1.32	1.27
Formation	Priorität, Zeit	62	52	26	107	59	2.00	1.81
Formation	Distanz, Zeit	67	41	32	90	71	1.28	1.27
Formation	Priorität+Distanz, Zeit	71	41	28	84	54	1.46	1.56
Gesamt		455	328	197	666	421	1.66	1.58

Tabelle 5: Ergebnis der Simulationsdurchläufe mit dynamischer Formation und dynamischen Rollenwechsel

Dynamische Positionierung (Potentialfeld) mit Rollenwechsel

Der Simulationsblock mit dynamischer Positionierung anhand eines Potentialfeldes zeigt ebenfalls gute Ergebnisse. Die Parameterbelegungen wurden wiederum experimentell ermittelt. In dieser Variante wurden die meisten Tore aller Positionierungsvarianten erzielt, aber auch mehr Tore im Vergleich zur Formationsvariante zugelassen (Tabelle 6). Das Torverhältnis ist ähnlich gut wie die Formationsvariante, allerdings ist das Gewinnverhältnis leicht schlechter.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
Potentialfeld	statisch	48	56	36	123	73	1.56	1.68
Potentialfeld	Priorität, Anzahl	50	63	27	133	66	2.33	2.02
Potentialfeld	Distanz, Anzahl	50	57	33	120	72	1.73	1.67
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Anzahl	45	56	39	121	78	1.44	1.55
Potentialfeld	Priorität, Zeit	60	45	35	102	71	1.29	1.44
Potentialfeld	Distanz, Zeit	59	44	37	97	80	1.19	1.21
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Zeit	50	54	36	121	81	1.50	1.49
Gesamt		362	375	243	817	521	1.54	1.57

Tabelle 6: Ergebnis der Simulationsdurchläufe mit dynamischer Positionierung anhand eines Potentialfeldes und dynamischen Rollenwechsel

Auswertung der dynamischen Positionierungen ohne Rollenwechsel

Die Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse mit statischer Rollenzuordnung und dynamischer Positionierung. Hier wird der alleinige Einfluss der dynamischen Positionierung hervorgehoben. Dabei lässt sich zeigen, dass die dynamische Formation von allen am Besten abschneidet (Tabelle 7), das Gewinnverhältnis ist am höchsten und es werden die wenigsten Gegentore zugelassen. Kurz dahinter ordnet sich die Potentialfeldvariante ein. Dabei erzielte diese mehr Tore als die Formationsvariante, lässt aber gleichzeitig auch mehr Gegentore zu und verliert dadurch mehr Spiele.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	statisch	58	35	47	70	95	0.74	0.74
Kraft	statisch	63	39	38	78	84	1.03	0.93
Formation	statisch	55	55	30	109	67	1.83	1.63
Potentialfeld	statisch	48	56	36	123	73	1.56	1.68
Gesamt		224	185	151	380	319	1.23	1.19

Tabelle 7: Verschiedene Positionierungsvarianten mit statischer Rollenzuordnung

5.2.2 Auswertung nach Zeitpunkt des Rollenwechsel

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die bisher beschriebenen Simulationen mit unterschiedlichem Fokus auf die Module und verwendeten Parameter.

Rollenwechsel anhand der Entscheidungsanzahl

Tabelle 8 fasst alle Simulationsvarianten mit dynamischen Rollenwechsel nach Anzahl der Entscheidungen zusammen. Wie bereits beschrieben, ist diese Parameterbelegung für die Simulation besser geeignet im Vergleich zur der zeitlichen Variante, da Entscheidungen schneller getroffen werden können. Trotzdem gibt es einige Simulationsläufe, in denen auch diese Form des Rollenwechsels schlechter gegenüber der Basisvariante abschneidet.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	Priorität, Anzahl	54	51	35	109	78	1.46	1.40
statisch	Distanz, Anzahl	65	31	44	81	87	0.70	0.93
statisch	Priorität+Distanz, Anzahl	67	43	30	93	59	1.43	1.58
Kraft	Priorität, Anzahl	58	52	30	113	76	1.73	1.49
Kraft	Distanz, Anzahl	66	50	24	104	62	2.08	1.68
Kraft	Priorität+Distanz, Anzahl	67	34	39	84	95	0.87	0.88
Formation	Priorität, Anzahl	64	49	27	102	58	1.81	1.76
Formation	Distanz, Anzahl	68	49	23	90	46	2.13	1.96
Formation	Priorität+Distanz, Anzahl	68	41	31	84	66	1.32	1.27
Potentialfeld	Priorität, Anzahl	50	63	27	133	66	2.33	2.02
Potentialfeld	Distanz, Anzahl	50	57	33	120	72	1.73	1.67
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Anzahl	45	56	39	121	78	1.44	1.55
Gesamt		722	576	382	1234	843	1.51	1.46

Tabelle 8: Rollenwechsel nach Anzahl der hintereinander folgenden, gleichen Entscheidungen

Rollenwechsel anhand zeitlicher Entscheidung

Die Simulationsdurchläufe mit dynamischen Rollenwechsel nach Zeit schneiden im Vergleich zur Entscheidungsanzahl schlechter ab. Trotzdem ist die Gewinnwahrscheinlichkeit gegenüber der Basisvariante höher (Tabelle 9). Wie bereits erläutert, sollte diese Variante bevorzugt auf den Robotern eingesetzt werden, da sie besser mit unterschiedlichen Zeiten und Verzögerungen umgehen kann. Genauere Untersuchungen durch spätere Arbeiten sollten hier Klarheit schaffen.

5.2.3 Auswertung nach Rollenwechselbedingung

Als nächstes werden die Simulationsläufe nach der Bedingung des Rollenwechsel betrachtet.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	Priorität, Zeit	61	35	44	94	108	0.80	0.87
statisch	Distanz, Zeit	74	26	40	61	85	0.65	0.72
statisch	Priorität+Distanz, Zeit	52	42	46	85	83	0.91	1.02
Kraft	Priorität, Zeit	51	51	38	101	80	1.34	1.26
Kraft	Distanz, Zeit	59	46	35	101	83	1.31	1.22
Kraft	Priorität+Distanz, Zeit	66	45	29	108	61	1.55	1.77
Formation	Priorität, Zeit	62	52	26	107	59	2.00	1.81
Formation	Distanz, Zeit	67	41	32	90	71	1.28	1.27
Formation	Priorität+Distanz, Zeit	71	41	28	84	54	1.46	1.56
Potentialfeld	Priorität, Zeit	60	45	35	102	71	1.29	1.44
Potentialfeld	Distanz, Zeit	59	44	37	97	80	1.19	1.21
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Zeit	50	54	36	121	81	1.50	1.49
Gesamt		732	522	426	1151	916	1.23	1.26

Tabelle 9: Rollenwechsel nach bestimmter Zeit mit hintereinander folgenden, gleichen Entscheidungen

Rollenpriorität

Dazu wurden die Ergebnisse als Erstes nach der Prioritätsentscheidung gruppiert. Diese Version gewinnt bis auf einen Simulationslauf durchgängig häufiger im Vergleich zur Basisvariante (Tabelle 10). Dabei kommen die Nachteile in den durchgeführten Simulationen nicht zum tragen, da der Energieverbrauch und die Gelenkerwärmung deaktiviert wurde und so einzelne Spieler längere Laufwege ohne Einschränkungen zurücklegen können. In einem realen Spiel würden diese Roboter mehr Energie verbrauchen und ihre Gelenke schneller erhitzen. Im Vergleich zu den anderen beiden Wechselbedingungen hat diese in der Simulation ein besseres Gewinn- und Torverhältnis. Gleichzeitig werden aber auch mehr Gegentore zugelassen.

Teamdistanz

Im Vergleich dazu gewinnt die Variante mit Rollenwechsel anhand der Teamdistanz im Durchschnitt weniger häufig, ist aber trotzdem der Basisvariante insgesamt überlegen (Tabelle 11). Die Teamdistanz kann ihre Vorteile in der durchgeführten Simulation nicht ausspielen. So wird der Einfluss der Laufwege nicht berücksichtigt und der damit einhergehende Energieverbrauch und die Gelenkerwärmung missachtet. Ein Aktivieren eben dieser in der Simulation kann entsprechend zu anderen Ergebnissen führen und sollte in folgenden Arbeiten untersucht werden. Hingegen nachteilig können sich Bestrafungen durch Regelverstöße ausgewirkt haben. Sobald ein Spieler für einige Zeit aussitzen muss, wird eine Rolle nicht besetzt. Das kann sowohl in der Verteidigung als

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	Priorität, Anzahl	54	51	35	109	78	1.46	1.40
statisch	Priorität, Zeit	61	35	44	94	108	0.80	0.87
Kraft	Priorität, Anzahl	58	52	30	113	76	1.73	1.49
Kraft	Priorität, Zeit	51	51	38	101	80	1.34	1.26
Formation	Priorität, Anzahl	64	49	27	102	58	1.81	1.76
Formation	Priorität, Zeit	62	52	26	107	59	2.00	1.81
Potentialfeld	Priorität, Anzahl	50	63	27	133	66	2.33	2.02
Potentialfeld	Priorität, Zeit	60	45	35	102	71	1.29	1.44
Gesamt		460	398	262	861	596	1.52	1.44

Tabelle 10: Simulationsergebnis des Rollenwechsels mittels Prioritäten

auch im Angriff von Nachteil sein, da dadurch der Gegner leichter zum Tor gelangt und andererseits ein Spieler im Angriff fehlt.

Rollenpriorität und Teamdistanz

Die Auswertung anhand der Kombination von Priorität und Teamdistanz ergibt ebenfalls eine höhere Gewinnwahrscheinlichkeit gegenüber der Basisvariante. Dabei ist die Varianz in den Simulationsvarianten weniger stark im Vergleich zu den Einzelbedingungen. Auffällig ist weiterhin, dass in Summe weniger gegnerische Tore zugelassen wurden und gleichzeitig mehr Tore als die Variante mit Teamdistanz allein erzielt wurden. Insgesamt ordnet sich die Kombination zwischen beiden Einzelvarianten ein. Diese Variante sollte trotzdem in echten Spielen eingesetzt werden, da sie die Vorteile beider Varianten kombiniert und deren Nachteile kompensiert.

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	Distanz, Anzahl	65	31	44	81	87	0.70	0.93
statisch	Distanz, Zeit	74	26	40	61	85	0.65	0.72
Kraft	Distanz, Anzahl	66	50	24	104	62	2.08	1.68
Kraft	Distanz, Zeit	59	46	35	101	83	1.31	1.22
Formation	Distanz, Anzahl	68	49	23	90	46	2.13	1.96
Formation	Distanz, Zeit	67	41	32	90	71	1.28	1.27
Potentialfeld	Distanz, Anzahl	50	57	33	120	72	1.73	1.67
Potentialfeld	Distanz, Zeit	59	44	37	97	80	1.19	1.21
Gesamt		508	344	268	744	586	1.28	1.27

Tabelle 11: Ergebnis des Rollenwechsels mittels Teamdistanz

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
statisch	Priorität+Distanz, Anzahl	67	43	30	93	59	1.43	1.58
statisch	Priorität+Distanz, Zeit	52	42	46	85	83	0.91	1.02
Kraft	Priorität+Distanz, Anzahl	67	34	39	84	95	0.87	0.88
Kraft	Priorität+Distanz, Zeit	66	45	29	108	61	1.55	1.77
Formation	Priorität+Distanz, Anzahl	68	41	31	84	66	1.32	1.27
Formation	Priorität+Distanz, Zeit	71	41	28	84	54	1.46	1.56
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Anzahl	45	56	39	121	78	1.44	1.55
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Zeit	50	54	36	121	81	1.50	1.49
Gesamt		486	356	278	780	577	1.28	1.35

Tabelle 12: Ergebnis des Rollenwechsels mittels Prioritäten und Teamdistanz

5.2.4 Auswertung verschiedener Aufstellungen

In der Einführung wurden zehn verschiedene Rollen (inkl. Torwart) definiert. In der SPL wird zur Zeit allerdings nur mit fünf Spielern gespielt. Entsprechend können auch verschiedene Aufstellungen verwendet werden. Das wurde in den folgenden zwei Simulationsblöcken getestet. Die Aufstellung wird in der Reihenfolge Verteidiger, Mittelfeldspieler, Stürmer gekennzeichnet und die entsprechende Zahl gibt die Anzahl der eingesetzten Spieler an. Als Standardaufstellung in den vorhergehenden Simulationsläufen wurde 2-1-1 gespielt (zwei Verteidiger, ein Mittelfeldspieler und ein Stürmer).

Auswertung verschiedener Aufstellungen mit statischer Positionierung

Während der GermanOpen sollten erste Erfahrungen mit dem dynamischen Rollenwechsel gemacht werden. Daher wurden alle Aufstellungen mit statischer Positionierung, Wechsel nach Zeit sowie Priorität und Teamdistanz durchgeführt. Hierbei lässt sich festhalten, dass die Standardaufstellung (2-1-1) am besten gegenüber der Basisvariante abschneidet und entsprechend auch auf den Robotern eingesetzt werden sollte.

Auswertung verschiedener Aufstellungen mit dynamischer Positionierung

Für die Simulation verschiedener Aufstellungen mit dynamischer Positionierung wurde die Formationsvariante gewählt. Diese hat insgesamt über all ihre Durchläufe hinweg das beste Gewinnverhältnis im Vergleich zu den anderen dynamischen Positionierungsvarianten. Der Rollenwechsel wird anhand der Rollenpriorität und nach Zeit durchgeführt. Dies wurde gewählt, da die Priorität in der Simulation am besten abschnitt und der Wechsel nach Zeit auf dem Roboter eingesetzt werden soll.

Das Ergebnis (Tabelle 14) zeigt, dass die Aufstellungen, bei denen jede Position einmal besetzt ist, eine höhere Gewinnchance im Vergleich zu den Varianten hat, die eine

5 Experimentelle Auswertung

Aufstellung	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
2-1-1	61	46	33	95	75	1.39	1.27
1-2-1	57	41	42	101	100	0.98	1.01
1-1-2	52	44	44	111	107	1.00	1.04
2-2-0	73	30	37	56	74	0.81	0.76
0-2-2	47	40	53	97	115	0.75	0.84
2-0-2	61	41	38	90	100	1.08	0.90
1-3-0	61	34	45	68	98	0.76	0.69
0-3-1	53	35	52	84	110	0.67	0.76
3-0-1	59	41	40	75	76	1.02	0.99
3-1-0	65	38	37	69	64	1.03	1.08
Gesamt	589	390	421	846	919	0.93	0.92

Tabelle 13: Ergebnisse unterschiedlicher Aufstellungen (Verteidigung, Mittelfeld, Stürmer) mit statischer Positionierung und dynamischen Rollenwechsel anhand von Priorität und Teamdistanz sowie Wechsel nach Zeit

Rollengruppe nicht besetzen. Einzige Ausnahme ist die 0-3-1-Aufstellung, dabei wird häufiger Unentschieden gegen die Basisvariante gespielt und es werden die wenigsten Tore zugelassen. Andererseits wird auch deutlich seltener gewonnen, im Vergleich zu den ersten drei Aufstellungsvarianten.

Aufstellung	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
2-1-1	62	52	26	107	59	2.00	1.81
1-2-1	57	56	27	120	63	2.07	1.90
1-1-2	58	55	27	111	56	2.04	1.98
2-2-0	68	40	32	82	68	1.25	1.21
0-2-2	59	53	28	119	76	1.89	1.57
2-0-2	51	53	36	112	91	1.47	1.23
1-3-0	64	42	34	82	64	1.24	1.28
0-3-1	72	47	21	95	47	2.24	2.02
3-0-1	57	33	50	75	106	0.66	0.71
3-1-0	68	28	44	71	91	0.64	0.78
Gesamt	616	459	325	974	721	1.41	1.35

Tabelle 14: Ergebnisse unterschiedlicher Aufstellungen (Verteidigung, Mittelfeld, Stürmer) mit dynamischer Formation und dynamischen Rollenwechsel anhand von Rollenpriorität und Wechsel nach Zeit

5.2.5 Zusammenfassung

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Auswertung der verschiedenen Varianten nur einen kleinen Einblick in die Komplexität der Strategien geben kann. Einzelne Teile einer Strategie können dabei bereits häufiger gegenüber der Basisvariante gewinnen und die Kombination der einzelnen Varianten wiederum nochmals besser abschneiden. Dabei ist die Gewinnwahrscheinlichkeit nicht nur höher, indem mehr Tore erzielt, sondern gleichzeitig auch weniger Gegentore zugelassen werden.

Die Simulationen mit verschiedenen Aufstellungen hat gezeigt, dass es besser ist, jede Rollengruppe mit mindestens einem Spieler zu besetzen. Dabei kann insbesondere mit der dynamischen Positionierung entschieden werden, ob das Team defensiv (2 Verteidiger) oder offensiv (zwei Stürmer) spielen soll.

Für den Einsatz im Nao-Team Humboldt wird die dynamische Formation mit Standardaufstellung (2-1-1) empfohlen. Diese ist aktuell besser geeignet, da sie defensiv ausgerichtet ist und die fehlenden Gegnererkennung durch die zwei Verteidiger besser kompensieren kann.

Tabelle 15 fasst die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe im Ganzen zusammen. Neben der Anzahl der Siege, wird auch die Summe der geschossenen Tore je Team gezeigt. Die letzte Spalte zeigt das Verhältnis der Siege zum Vergleichsteam.

5 Experimentelle Auswertung

Position	Wechsel	U	S _N	S _B	T _N	T _B	S _{N/B}	T _{N/B}
Basis	Basis	71	33	37	82	72	0.89	1.14
statisch	statisch	58	35	47	70	95	0.74	0.74
statisch	Priorität, Anzahl	54	51	35	109	78	1.46	1.40
statisch	Distanz, Anzahl	65	31	44	81	87	0.70	0.93
statisch	Priorität+Distanz, Anzahl	67	43	30	93	59	1.43	1.58
statisch	Priorität, Zeit	61	35	44	94	108	0.80	0.87
statisch	Distanz, Zeit	74	26	40	61	85	0.65	0.72
statisch	Priorität+Distanz, Zeit	52	42	46	85	83	0.91	1.02
Kraft	statisch	63	39	38	78	84	1.03	0.93
Kraft	Priorität, Anzahl	58	52	30	113	76	1.73	1.49
Kraft	Distanz, Anzahl	66	50	24	104	62	2.08	1.68
Kraft	Priorität+Distanz, Anzahl	67	34	39	84	95	0.87	0.88
Kraft	Priorität, Zeit	51	51	38	101	80	1.34	1.26
Kraft	Distanz, Zeit	59	46	35	101	83	1.31	1.22
Kraft	Priorität+Distanz, Zeit	66	45	29	108	61	1.55	1.77
Formation	statisch	55	55	30	109	67	1.83	1.63
Formation	Priorität, Anzahl	64	49	27	102	58	1.81	1.76
Formation	Distanz, Anzahl	68	49	23	90	46	2.13	1.96
Formation	Priorität+Distanz, Anzahl	68	41	31	84	66	1.32	1.27
Formation	Priorität, Zeit	62	52	26	107	59	2.00	1.81
Formation	Distanz, Zeit	67	41	32	90	71	1.28	1.27
Formation	Priorität+Distanz, Zeit	71	41	28	84	54	1.46	1.56
Potentialfeld	statisch	48	56	36	123	73	1.56	1.68
Potentialfeld	Priorität, Anzahl	50	63	27	133	66	2.33	2.02
Potentialfeld	Distanz, Anzahl	50	57	33	120	72	1.73	1.67
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Anzahl	45	56	39	121	78	1.44	1.55
Potentialfeld	Priorität, Zeit	60	45	35	102	71	1.29	1.44
Potentialfeld	Distanz, Zeit	59	44	37	97	80	1.19	1.21
Potentialfeld	Priorität+Distanz, Zeit	50	54	36	121	81	1.50	1.49
statisch (2-1-1)	Priorität+Distanz, Zeit	61	46	33	95	75	1.39	1.27
statisch (1-2-1)	Priorität+Distanz, Zeit	57	41	42	101	100	0.98	1.01
statisch (1-1-2)	Priorität+Distanz, Zeit	52	44	44	111	107	1.00	1.04
statisch (2-2-0)	Priorität+Distanz, Zeit	73	30	37	56	74	0.81	0.76
statisch (0-2-2)	Priorität+Distanz, Zeit	47	40	53	97	115	0.75	0.84
statisch (2-0-2)	Priorität+Distanz, Zeit	61	41	38	90	100	1.08	0.90
statisch (1-3-0)	Priorität+Distanz, Zeit	61	34	45	68	98	0.76	0.69
statisch (0-3-1)	Priorität+Distanz, Zeit	53	35	52	84	110	0.67	0.76
statisch (3-0-1)	Priorität+Distanz, Zeit	59	41	40	75	76	1.02	0.99
statisch (3-1-0)	Priorität+Distanz, Zeit	65	38	37	69	64	1.03	1.08
Formation (1-2-1)	Priorität, Zeit	57	56	27	120	63	2.07	1.90
Formation (1-1-2)	Priorität, Zeit	58	55	27	111	56	2.04	1.98
Formation (2-2-0)	Priorität, Zeit	68	40	32	82	68	1.25	1.21
Formation (0-2-2)	Priorität, Zeit	59	53	28	119	76	1.89	1.57
Formation (2-0-2)	Priorität, Zeit	51	53	36	112	91	1.47	1.23
Formation (1-3-0)	Priorität, Zeit	64	42	34	82	64	1.24	1.28
Formation (0-3-1)	Priorität, Zeit	72	47	21	95	47	2.24	2.02
Formation (3-0-1)	Priorität, Zeit	57	33	50	75	106	0.66	0.71
Formation (3-1-0)	Priorität, Zeit	68	28	44	71	91	0.64	0.78

Tabelle 15: Ergebnis aller Simulationsdurchläufe insgesamt

5.3 GermanOpen 2019

Im Zuge der deutschen Meisterschaft in Magdeburg (GermanOpen 2019) kam der dynamische Rollenwechsel zum Einsatz. Dazu wurde den Rollen eine Priorität zugeordnet. Gleichzeitig sollte die Gesamtdistanz des Teams bei der Zuordnung minimiert werden. Für den Rollenwechsel müssen die Spieler für eine bestimmte Zeit zur selben Entscheidung gelangen, bevor sie den Wechsel durchführen (siehe Abschnitt 4.4.1). Die Position der Rollen blieb dabei statisch festgelegt. Ziel war es, erste Erfahrungen mit dem Einsatz der neuen Rollen zu sammeln und die Möglichkeiten auszutesten. Die Wahl „Priorität und Teamdistanz“ als Rollenwechselfunktion zu verwenden, wurde getroffen, da sie zum einen beide Vorteile vereint und zum anderen in der Simulation in jeder Variante die besten Ergebnisse gezeigt hat. Entsprechend wird mit dieser Konfiguration sichergestellt, dass wichtige Positionen als Erstes besetzt werden und die Last auf das gesamte Team verteilt wird. Insgesamt wurden vier Testspiele und vier Wettkampfspiele während der GermanOpen durchgeführt.

Eine quantitative Auswertung der Spiele ist aufgrund der geringen Anzahl an durchgeführten Spielen nicht möglich. Trotzdem lässt sich der erfolgreiche Einsatz anhand von drei beispielhaften Situationen beschreiben.

Im Spiel kommt es immer wieder zu Situationen, in der ein Spieler den Ball nach vorne spielt und seine Rollenposition damit verlässt. Wird der Abstand zu seiner Position zu groß, sollte ein anderer Spieler diese Position und damit die entsprechende Rolle besetzen. Das gesamte Team bzw. Teile davon rotieren entsprechend der geringsten Distanz. Damit wurde sichergestellt, dass jede Rolle bzw. dessen Position zu jeder Zeit besetzt war und unnötige Laufwege durch einzelne Spieler vermieden wurden. Insbesondere nach einem erfolgreichen Torschuss hat sich das Team darauf geeinigt, dass der Torschütze die vorderste Position in der Aufstellung bekam und damit für sich die kleinste Distanz zurücklegen musste.

Weiterhin konnte der Nutzen des Rollentauschs im Zusammenhang mit Strafen (Penalty) bei einem Regelverstoß gezeigt werden. In einer Situation im Spiel gegen die Bembelbots wurde der Torschütze beim Zurücklaufen wegen „Pushings“ bestraft und rausgenommen. Da der Torschütze die Position im bzw. am Mittelkreis zugewiesen bekommt, wäre in der Situation die vorderste Position unbesetzt gewesen. Durch die hohe Priorisierung der vordersten Rollenposition, bekam der nächst gelegene Spieler die vorderste Position neu zugewiesen. Er konnte sich so vor dem Anstoß am Mittelkreis positionieren und sorgte damit für eine bessere Aufstellung und Ausgangssituation.

Daneben konnte in jedem Spiel beobachtet werden, dass Spieler, die nach einer

5 Experimentelle Auswertung

Strafe neu vom Seitenrand einlaufen, eine Verteidigerrolle übernehmen, während der Verteidiger ins Mittelfeld aufrückte. Eine statische Rollenzuordnung führte in der Vergangenheit dazu, dass der eingesetzte Spieler das halbe Spielfeld überqueren musste, um auf seine Rollenposition zu gelangen.



(a) Standardaufstellung



(b) Aufstellung gegen UNSW



(c) Standardaufstellung für gegn. Anstoß



(d) Aufstellung für Anstoß von UNSW

Abbildung 27: Während der GermanOpen 2019 wurden verschiedene Aufstellungen für unterschiedliche Gegner verwendet. In (a) und (b) ist jeweils die Homeposition der Spieler in der Standardaufstellung und für das Spiel gegen UNSW dargestellt. In (c) und (d) sind jeweils die Aufstellungen für den gegnerischen Anstoß zu sehen.

Ein Versuch, den Ersatzspieler einzusetzen, konnte ebenso erfolgreich durchgeführt werden. Dazu wurde in einem Testspiel ein Feldspieler aus dem Spiel genommen und der Ersatzspieler konnte ohne zusätzliche Konfiguration eingesetzt werden – er übernahm eine Verteidigerrolle, während die anderen Spieler aufrückten. In der Vergangenheit musste dafür das Trikot und die Spielernummer des Ersatzspielers mit dem einzuwechselnden Spieler getauscht werden.

Im Spiel gegen das australische Team (UNSW) kam der Ersatzspieler aufgrund eines

frühzeitig ein Tor geschossen werden. Für das eigene Spiel gegen das australische Team, wurde die Verteidigung beim gegnerischen Anstoß weiter zurück gesetzt und so positioniert, dass sie den langen Pass des Gegners erkennen und frühzeitig verteidigen konnte (siehe Abbildung 28).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das neu implementierte Verfahren gut funktioniert hat. Zum einen konnte die Aufstellung leicht an den jeweiligen Gegner angepasst und damit bestimmte Taktiken des Gegner besser verteidigt werden. Zum anderen zeigten mehrere verschiedene Situationen, wann eine dynamische Rollenzuordnung helfen kann, Probleme zu vermeiden und Laufwege effizienter zu gestalten. Insbesondere kam es durch den Rollenwechsel zu keinem Zusammenstoß während die Spieler auf ihre passive Feldposition liefen und es wurde ein Kreuzen der Laufwege ausgeschlossen, da vorher ein Rollenwechsel stattfand. Das dynamische Verfahren wurde vollständig in den Code des Nao-Team Humboldts integriert und als Standardverfahren eingesetzt. Im nächsten Schritt sollte die dynamische Positionierung ebenfalls verwendet werden, um auch auf die jeweilige Spielsituation besser reagieren zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird die Arbeit und die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

6.1 Zusammenfassung

Zu Beginn wurden die Begriffe Strategie, Teamkoordination, Taktik, Set-Play, Formation, Rollen und weitere im Kontext des Roboterfußballs erläutert und eingeordnet.

Es wurde festgestellt, dass Teamspiel und Strategie in der SPL bisher wenig Beachtung fand. Dabei sind die grundlegenden Probleme von den führenden Teams gelöst und große Leistungssprünge sind dort nicht mehr möglich. Große Fortschritte lassen sich nur noch im Zusammenspiel als Team und mit einer gemeinsamen Teamstrategie erreichen.

Folgende Ziele der Teamkoordination wurden identifiziert:

- Verbesserung der Teamkommunikation, insbesondere die Synchronisierung und Absprachen zwischen den einzelnen Spielern,
- die Belastung (Laufwege) der Spieler minimieren und die Last besser auf das Team verteilen,
- Unterzahlspiel durch ausgefallene Spieler kompensieren,
- Einigung auf ein gemeinsames Ziel (Teamball) zur Ausrichtung der Strategie,
- Positionierung im defensiven und offensiven Spiel, um damit wiederum Passspiele zu ermöglichen.

Für den Umgang mit einem Team von Robotern wurden neue Werkzeuge implementiert. Bisher war es nur möglich jeweils einen Roboter zu konfigurieren, das ausgeführte Verhalten zu analysieren oder die aufgezeichneten Daten auszuwerten. Mit den neu entwickelten Werkzeugen ist das nun für mehrere Roboter möglich. Dabei können mit dem MultiAgent-Dialog mehrere Roboter konfiguriert und während eines Spiels die Algorithmen bewertet werden. Für eine Auswertung der Teamstrategie und des Rollenwechsels nach einem Spiel, wurde der „RoboCup Data Explorer“ erweitert. Es lassen sich nun die Entscheidungen aller Spieler synchronisiert anzeigen und aufgezeichnete Videos gleichzeitig abspielen. Des Weiteren wurden die Grundlagen geschaffen, simulierte Spiele in der Simsparksimulation automatisiert durchzuführen und die Ergebnisse auszuwerten.

Für die Bewertung komplexer Algorithmen, wie Teamkoordination und -strategie, werden umfangreiche Daten benötigt. In den letzten Jahren wurde ein synchronisiertes Aufnahmesystem entwickelt, das solche Daten bereitstellt. Die systematische Aufbereitung und Auswertung wurde beschrieben und durchgeführte Analysen vorgestellt. Insbesondere die Erkenntnis, dass die Kommunikationsqualität innerhalb einer Veranstaltung bzw. teilweise auch innerhalb eines Spiels stark schwanken kann und die Roboter darauf vorbereitet sein sollten, wurde aufgezeigt.

Für ein gutes Zusammenspiel sollten die Roboter miteinander kommunizieren und sich untereinander darüber absprechen, wer an den Ball geht. Aufgrund der technisch bedingten Verzögerung der Kommunikation ist es notwendig, dass die Roboter sich jeweils synchronisieren und damit zusätzliche Informationen über das Alter der empfangenen Nachrichten und über die Qualität der Übertragung erhalten. Es existieren bereits Protokolle, die Computersysteme synchronisieren können, die allerdings für die Anwendung auf den Robotern ungeeignet sind. Daher wurde ein Verfahren ähnlich dem „Simple Network Time Protocol“ implementiert, mit dem sich die Roboter unabhängig von einer zentralen Instanz synchronisieren können. Diese Informationen werden für den Teamball und den Rollenwechsel verwendet.

Jeder Roboter kommuniziert den aus seiner Sicht wahrgenommenen Ball. Entsprechend gibt es mehrere Bälle die im Team erkannt werden und es muss sich auf Einen geeinigt werden. Mittels des Canopy-Clustering-Verfahren wurde ein Algorithmus implementiert, der Bälle, die in relativer Nähe zueinander liegen, zusammenfasst. Anschließend wird der Durchschnitt aus dem resultierenden Cluster mit den meisten beitragenden Bällen als Teamball festgelegt. Daraufhin kann sich an diesem eine gemeinsame Strategie ausrichten.

Im Nao-Team Humboldt wurde bisher nur eine statische Strategie und statische Teamkoordination verwendet. Dabei haben die Spieler zu Beginn eine Feldposition zugeordnet bekommen. Diese Position blieb das gesamte Spiel hinweg unverändert bestehen. Außerdem konnten die Spieler untereinander ihre Position (Rolle) nicht tauschen, was bei Spielerausfall zum einen zu langen Laufwegen einzelner Spieler und zum anderen zu schlechten defensiven und offensiven Aufstellungen führte.

Die neu implementierten Verfahren führen das Konzept von Rollen im Nao-Team Humboldt ein. Dazu werden die Rollen Verteidiger, Mittelfeldspieler und Stürmer mit der jeweiligen Positionierung links, mitte, rechts definiert.

Je nach Konfiguration können die Spieler eine dieser Rollen statisch erhalten oder sie können ihre Rollen nach bestimmten Bedingungen wechseln. Insgesamt wurden drei Bedingungen implementiert: Rollenpriorität, Teamdistanz sowie Rollenpriorität und

Teamdistanz. Wird die Rollenpriorität als Bedingung verwendet, erhält jede Rolle eine Priorität entsprechend ihrer Wichtigkeit zugeordnet. Die am höchsten priorisierte Rolle wird als Erstes besetzt, die zweite als Zweites, usw. Dabei kann es von der Teamstrategie abhängen, welche Rolle am höchsten priorisiert wird. In dieser Arbeit wurde die Priorität Torwart, Verteidiger, Stürmer und Mittelfeldspieler festgelegt.

Alternativ kann ein Rollenwechsel anhand der Distanz, die das Team in Summe zurücklegen muss, erfolgen. Dazu wird geprüft, welche Rollenzuordnung die Gesamtdistanz minimiert. Stellt sich dabei heraus, dass die Spieler ihre Rollen wechseln sollten, wird der Wechsel durchgeführt. Der Zeitpunkt des Wechsels kann mithilfe der Anzahl der aufeinanderfolgenden gleichen Entscheidungen getroffen werden oder wenn die Entscheidung für eine definierte Zeit gleich ist. In der Simulation ist der Wechsel nach Anzahl der gleichen Entscheidungen besser geeignet, da diese schneller erfolgen können und der Wechsel damit schneller ist. Für den Roboter ist dagegen die Entscheidung anhand der Zeit von Vorteil, da dabei Verzögerungen in der Kommunikation und Ausführungszeit leichter mit einbezogen werden können.

Die Positionierung der Spieler ist ebenfalls Teil der Strategie und Koordination und kann sowohl statisch als auch sich dynamisch sein. In der statischen Variante ändert sich die Position der Rollen im Laufe des Spiels nicht. Hingegen richten sich in den dynamischen Varianten die Rollenpositionen am Teamball aus. Für die dynamische Positionierung wurden drei Varianten entwickelt: dynamische Formation, dynamische Positionierung anhand von Kräften oder anhand eines Potentialfeldes.

Die Simulationsauswertung hat gezeigt, dass sowohl die dynamischen Rollenwechsel als auch die dynamische Positionierung im Vergleich zu der statischen Basisvariante eine höhere Gewinnwahrscheinlichkeit haben. Die Kombination von Rollenwechsel und dynamischer Positionierung hat dabei eine bis zu doppelt so hohe Gewinnwahrscheinlichkeit wie die Vergleichsbasis.

Ebenso zeigten die ersten Erfahrungen im praktischen Einsatz während der German-Open2019 die Vorteile eines dynamischen Rollenwechsels.

Weiterhin wurde das Rollenkonzept um dynamische Rollen erweitert, die zusätzlich zu der bestehenden Rolle eingenommen werden können und spezialisiertes Verhalten verwenden. Dazu wurde der Striker, Supporter und Goaliesupporter definiert. Der Striker ist der Spieler, der direkt am Ball agiert. Dabei ist sicherzustellen, dass alle Spieler zur gleichen Striker-Entscheidung gelangen. Der Supporter soll den Striker unterstützen. Für das Nao-Team Humboldt wurde eine defensive Taktik implementiert, die den Support hinter den Striker positioniert, um Ballverluste abzufangen. Der

Goaliesupporter soll hingegen den Torwart unterstützen, wenn dieser gerade Striker ist und das Tor verlässt.

Der Torwart nimmt insgesamt eine separate Rolle ein und verhält sich anders als die Feldspieler. Neben der Integration in das Rollenkonzept wurden zusätzlich das defensive und offensive Verhalten des Torwarts angepasst. Dieser versucht nun zu jeder Zeit sich auf direkter Linie zwischen Teamball und Tor zu stellen. Kommt der Ball zu nahe, wird der Torwart zum Striker, wenn kein anderer Spieler bereits das Tor verteidigt.

Die Aufteilung der Rollen in statische und dynamische Varianten ermöglicht darüber hinaus, auf einzelne Aspekte des Zusammenspiels und der Koordination besser eingehen zu können. Beispielsweise lässt sich gezielt das Zusammenspiel zwischen den dynamischen Rollen Striker und Supporter verbessern.

Abschließend lässt sich festhalten, dass ein dynamischer Rollenwechsel und eine dynamische Positionierung gegenüber einer statischen Variante überlegen ist. Zukünftig sollte eine dynamische Strategie im Nao-Team Humboldt eingesetzt sowie weiterentwickelt werden. Die entwickelten Verfahren und implementierten Algorithmen können im Repository des Nao-Team Humboldts eingesehen werden. Ein jährlich veröffentlichte Version des gesamten Repositories findet sich auf GitHub⁵.

6.2 Ausblick

Die Entwicklung neuer erfolgreicher Strategien wird eine der Hauptschwerpunkte der näheren Zukunft in der SPL sein. Aufbauend auf dieser Arbeit sollten daher weitere Parameterbelegungen für die entwickelten Algorithmen getestet und geprüft werden. Zum Beispiel können die Rollen andere Prioritäten erhalten, um damit andere Aufstellungen und Strategien zu verfolgen. Zusätzlich sollte die Taktik an die Spielsituation anpassbar sein. Das kann wiederum über verschiedene Priorisierungen der Rollen oder durch verschiedene Formationen geschehen.

Weitere Arbeiten können auch Kombinationen der implementierten Verfahren realisieren. So könnte zum Beispiel das Formationsspiel mit lokalem Kräfte- oder Potentialfeld kombiniert werden.

Auch die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Aspekte des Zusammenspiels sollten untersucht und eingesetzt werden. Neben der Teampeife, die durch Mehrheitsentscheid und gemeinsames Vorgehen Vorteile haben kann, sollte insbesondere das Passspiel entwickelt und integriert werden. Damit würden sich neue Positionierungsvarianten,

⁵<https://github.com/BerlinUnited/NaoTH> (26.06.2019)

Taktiken und Verhaltensweisen ergeben. Es könnten gezielte Spielzüge entwickelt und realisiert werden, um den Gegner effektiver auszuspielen.

Auch völlig andere Strategien sollten erdacht und entwickelt werden. Mit weiteren Strategien können sich die Roboter schneller auf Gegner einstellen und abhängig davon eine passende Strategie auswählen.

Zum Testen und Validieren einer neuen Strategie ist es sinnvoll, auf Simulationen zurückzugreifen. Nur dort ist es möglich in annehmbarer Zeit gleichzeitig mehrfach Spiele durchzuführen. Außerdem können die Einflussparameter, wie Unsicherheiten in der Lokalisierung und Ballerkennung, besser angepasst oder gar vollständig abgeschaltet werden. Zusätzlich lassen sich effektive Aussagen über die Qualität einer neuen Strategie erst nach mehrfacher Wiederholung sicher bewerten. Die wenigen Wettkampfspiele während der GermanOpen oder des RoboCups reichen dafür nicht aus.

Dazu sollte die Simulation weiter ausgebaut und beschleunigt werden. Je schneller die Simulation läuft, umso schneller können neue Strategien bewertet und entwickelt werden. Gleichzeitig sollte die Übertragbarkeit aus der Simulation auf den realen Roboter fortgeführt werden. Daher sollte versucht werden alle Regeln der SPL auch in der Simulation abzubilden. Insbesondere „Pushing“-Fouls, die einen Großteil der Regelverstöße in einem SPL-Spiel ausmachen und damit großen Einfluss auf das Spielgeschehen haben, sollten in der Simulation angewandt werden.

Neben Simspark als Simulationsumgebung, sollten auch andere Simulatoren auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden. Insbesondere der Simulator aus der 2D-Liga könnte an die notwendigen Gegebenheiten angepasst werden und nur die notwendigen Daten simulieren. Dabei kann von der grundlegenden Ansteuerung des Bewegungsapparats und der Sensorik abstrahieren werden und damit den Spielablauf enorm beschleunigen. Dadurch ist es möglich, schneller Erkenntnisse zu neuen Strategien zu ermitteln.

Neben der Entwicklung neuer Strategien und Anwendungsszenarien sollte auch die Auswertung und Bewertung der Strategien ein Ziel sein. Weitere Parameter, die bisher nicht getestet wurden und die eine Strategie aus einem anderen Winkel betrachten, sollten entwickelt werden. Beispielsweise kann der Energieverbrauch und die Gelenkerwärmung in die Bewertung einer Strategie einfließen. Entsprechend müssen die Roboter solche Informationen aufzeichnen, um Analysen dahingehend durchführen zu können. Solche neuen Parameter sollten entsprechend auch in der Simulation Anwendung finden, um die Übertragbarkeit weiterhin zu gewährleisten. Weitere Bewertungsquellen können Ballbesitz und Ball-Awareness sein.

Ein vollständig neues Feld, das aufbauend auf den strukturiert gesammelten Daten erschlossen werden kann, ist das DataMining. Dabei ist es möglich aus den gesammelten

Daten Muster und Korrelationen, die bisher nicht ersichtlich waren, zu extrahieren. Ähnlich der Erkenntnis, dass die Latenz einen Einfluss auf die Entscheidungen der Spieler haben kann und entsprechend berücksichtigt werden sollte oder das anhand der Ausführungszeit die Spielsituation erkennbar ist.

Das Feld des strategischen Zusammenspiels in der SPL steht noch am Anfang und bietet viel Potential für weitere Entwicklungen. Zukünftig wird die überlegene Strategie und das bessere Zusammenspiel über den Ausgang der Wettkampfspiele entscheiden.

Literatur

- [1] AGÜERO, C. ; MATELLÁN, V. ; CAÑAS, J. M. ; GÓMEZ, V. M. G.: Switch! Dynamic roles exchange among cooperative robots. In: *in Proceedings of the 2nd International Workshop on Multi-Agent Robotic Systems - MARS 2006. INSTICC, 2006*, S. 99–105
- [2] ASADA, M. ; UCHIBE, E. ; NODA, S. ; TAWARATSUMIDA, S. ; HOSODA, K. : Coordination of multiple behaviors acquired by a vision-based reinforcement learning. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, IEEE, 1994
- [3] GERKEY, B. P. ; MATARIĆ, M. J.: On Role Allocation in RoboCup. In: *RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 43–53
- [4] GUARNIZO, J. G. ; BLANESA, J. F. ; MELLADO, M. ; SIMO, J. ; MUÑOZ, M. : A Survey of Team Strategies in Robot Soccer, focused in Standard Platform League. (2012)
- [5] IBA, H. : Emergent cooperation for multiple agents using genetic programming. In: *Parallel Problem Solving from Nature — PPSN IV*. Springer Berlin Heidelberg, 1996, S. 32–41
- [6] KONTES, G. ; LAGOUDAKIS, M. : Coordinated Team Play in the Four-Legged RoboCup League. In: *19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2007)* Bd. 1, 2007, S. 109–116
- [7] KUHN, H. W.: The Hungarian method for the assignment problem. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 2 (1955), Nr. 1-2, S. 83–97
- [8] LUKE, S. : Genetic programming produced competitive soccer softbot teams for robocup97. In: *Genetic Programming 1998* (1998), S. 214–222
- [9] LUKE, S. ; HOHN, C. ; FARRIS, J. ; JACKSON, G. ; HENDLER, J. : Co-evolving Soccer Softbot team coordination with genetic programming. In: *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*. Springer Berlin Heidelberg, 1998, S. 398–411
- [10] LUKE, S. ; SPECTOR, L. : Evolving Teamwork and Coordination with Genetic Programming. In: *Proceedings of the 1st annual conference on genetic programming*, MIT Press, 1996, S. 150–156

- [11] MCCALLUM, A. ; NIGAM, K. ; UNGAR, L. H.: Efficient clustering of high-dimensional data sets with application to reference matching. In: *Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining - KDD'00*, ACM Press, 2000
- [12] MELLMANN, H. ; SCHLOTTER, B. ; BLUM, C. : Simulation Based Selection of Actions for a Humanoid Soccer-Robot. In: *RoboCup 2016: Robot World Cup XX*. Springer International Publishing, 2017, S. 193–205
- [13] MELLMANN, H. ; SCHLOTTER, B. ; KADEN, S. ; STROBEL, P. ; KRAUSE, T. ; RITTER, C.-N. ; HÜBNER, T. ; TOFANGCHI, S. : Berlin United - Nao Team Humboldt: Team Report 2018 / Adaptive Systeme, Institut für Informatik, Humboldt-Universität zu Berlin, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Germany. 2018. – Forschungsbericht
- [14] MELLMANN, H. ; SCHLOTTER, B. ; STROBEL, P. : *Towards Data Driven Development in RoboCup*. 2019
- [15] MEWES, F. : *Entwicklung einer dynamischen Spielstrategie auf der humanoiden Roboterplattform NAO*, HTWK Leipzig, Bachelorarbeit, 2014
- [16] MUNKRES, J. : Algorithms for the Assignment and Transportation Problems. In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 5 (1957), Nr. 1, S. 32–38
- [17] PHILLIPS, M. ; VELOSO, M. : Robust Supporting Role in Coordinated Two-Robot Soccer Attack. In: *RoboCup 2008: Robot Soccer World Cup XII*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 235–246
- [18] QUINLAN, M. ; OBST, O. ; CHALUP, S. : Towards autonomous strategy decisions in the RoboCup Four-Legged League. In: *Proceedings of the Seventh IJCAI International Workshop on Nonmonotonic Reasoning, Action and Change* (2007)
- [19] RÖFER, T. ; LAUE, T. ; HASSELBRING, A. ; RICHTER-KLUG, J. ; RÖHRIG, E. : B-Human 2017 - Team Tactics and Robot Skills in the Standard Platform League. In: *RoboCup 2017: Robot World Cup XXI*. Springer International Publishing, 2018, S. 461–472

- [20] ROBOCUP TECHNICAL COMMITTEE: *RoboCup Standard Platform League (NAO) Rule Book*, 2018
- [21] ROS, R. ; ARCOS, J. L. ; MANTARAS, R. L. ; VELOSO, M. : A case-based approach for coordinated action selection in robot soccer. In: *Artificial Intelligence* 173 (2009), Nr. 9-10, S. 1014–1039
- [22] STONE, P. ; VELOSO, M. : Task Decomposition and Dynamic Role Assignment for Real - Time Strategic Teamwork. In: *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages*. Springer Berlin Heidelberg, 1999, S. 293–308
- [23] STONE, P. ; VELOSO, M. : Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective. In: *Autonomous Robots* 8 (2000), Nr. 3, S. 345–383
- [24] STROBEL, P. : *Methoden und Werkzeuge zur Analyse von Teamverhalten und -strategie im Roboterfußball*, Humboldt-Universität zu Berlin, Studienarbeit, 2018
- [25] VAIL, D. ; VELOSO, M. : Dynamic Multi-Robot Coordination. In: SCHULTZ, A. (Hrsg.) ; PARKER, L. (Hrsg.) ; SCHNEIDER, F. (Hrsg.): *Multi-Robot Systems*. Kluwer, 2003, S. 87–100
- [26] VELOSO, M. ; STONE, P. ; BOWLING, M. : Anticipation: A Key for Collaboration in a Team of Agents. In: *Submitted to the 3rd International Conference on Autonomous Agents*, 1998, S. 1–16
- [27] WORK, H. ; CHOWN, E. ; HERMANS, T. ; BUTTERFIELD, J. ; MCGRANAGHAN, M. : Player Positioning in the Four-Legged League. In: *RoboCup 2008: Robot Soccer World Cup XII*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 391–402

Abbildungsverzeichnis

1	Zwei Ansichten des MultiAgentConfiguration-Dialog	25
2	Bildschirmfoto des „RoboCup Data Explorer“-Tools	27
3	Anstoß eines Simulationspiels in Simspark	29
4	Hierarchie des NTP-Netzwerks	33
5	Kommunikationsdiagramm für SNTP	35
6	Zeitsynchronisierung im Nao-Team Humboldt	35
7	Fehlerhafte Ballerkennung	37
8	Visualisierung der Teamballermittlung	40
9	Ein Spieler blockiert die Striker-Rolle	42
10	Rollen und dessen Feldposition	47
11	Darstellung der Rollenposition mit Priorität	49
12	Individuelle und teambasierte Nutzenfunktion im direkten Vergleich . .	50
13	Visualisierung der Formation in Abhängigkeit des Teamballs	54
14	Visualisierung der Kräfte aus Sicht des Torwarts	55
15	Verschiedene Formen von Potentialfelder	56
16	beispielhafte Verteidigungspositionen des Torwarts	57
17	Visualisierung der Strikerabstimmung	59
18	Fehlerhafte Striker-Absprache	60
19	Einflussbereich des Torwarts und dessen Striker-Entscheidung	61
21	Mögliche Aufstellung des Supporters	63
22	Mögliche Hilfe des Goaliesupporters	64
23	Latenzen je Spielfeld und Spielhälfte (RC18)	67
24	Latenz im Verlauf einer Halbzeit	69
25	Ausführungszeiten der Roboter	69
26	Kumulierte Siege nach Anzahl der durchgeführten Spiele	72
27	Verwendete Aufstellung während der GermanOpen 2019	84
28	Anstoßtaktik des Teams aus Australien	85

Tabellenverzeichnis

1	Rollenbeschreibungen	46
2	Statistische Auswertung der Latenzen vom RoboCup 2018	68
3	Ergebnis der statischen Positionierung mit Rollenwechsel	73
4	Ergebnis der Kraftpositionierung mit Rollenwechsel	74
5	Ergebnis der Formationspositionierung mit Rollenwechsel	74
6	Ergebnis der Potentialfeldpositionierung mit Rollenwechsel	75
7	Ergebnis der Positionierungsvarianten ohne Rollenwechsel	75
8	Ergebnis der Rollenwechsel nach Anzahl der Entscheidungen	76
9	Ergebnis der Rollenwechsel nach Zeit	77
10	Ergebnis des Rollenwechsels mittels Prioritäten	78
11	Ergebnis des Rollenwechsels mittels Teamdistanz	78
12	Ergebnis des Rollenwechsels mittels Prioritäten und Teamdistanz	79
13	Ergebnis unterschiedlicher Aufstellungen mit statischer Positionierung	80
14	Ergebnis unterschiedlicher Aufstellungen mit Formation und Rollenwechsel	80
15	Gesamtergebnis aller Simulationsdurchläufe	82

Abkürzungsverzeichnis

U	Unentschieden
S_N	Siege NaoTH
S_B	Siege Basis
T_N	Tore NaoTH
T_B	Tore Basis
S_{N/B}	Siegverhältnis NaoTH zu Basis
T_{N/B}	Torverhältnis NaoTH zu Basis

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und noch nicht für andere Prüfungen eingereicht habe. Sämtliche Quellen einschließlich Internetquellen, die unverändert oder abgewandelt wiedergegeben werden, insbesondere Quellen für Texte, Grafiken, Tabellen und Bilder, sind als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass bei Verstößen gegen diese Grundsätze ein Verfahren wegen Täuschungsversuchs bzw. Täuschung eingeleitet wird.

Berlin, den 26. Oktober 2020

.....