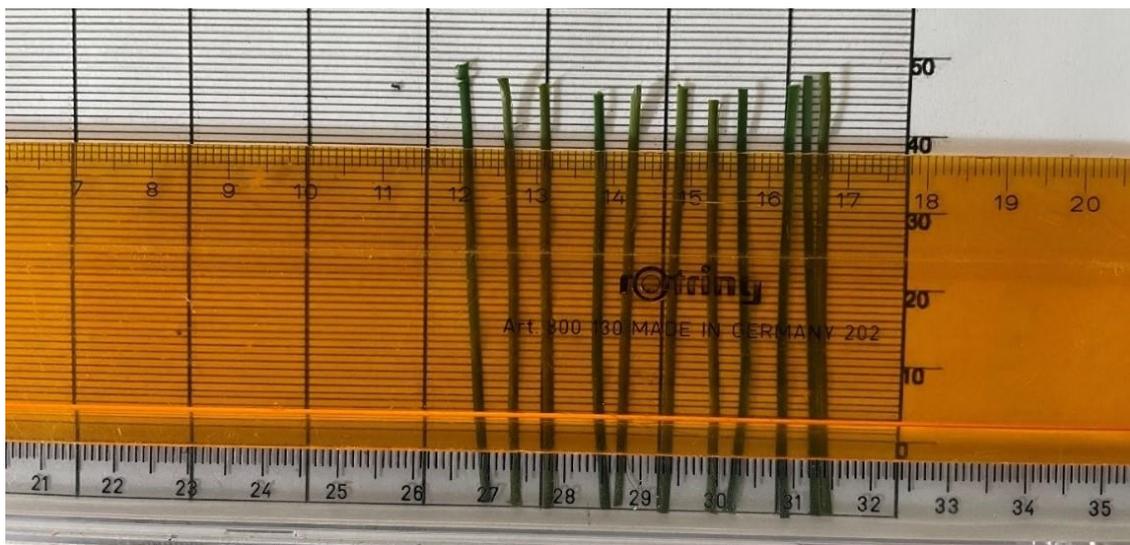


Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag und -verbrauch (UKuRa)



Förderkennzeichen

2521BI1402

Projektlaufzeit

04/2021 - 03/2023

bearbeitet von

Projektleitung:

Prof. Martin Thieme-Hack, Hochschule Osnabrück

Projektbearbeitung:

Maximilian Karle, Hochschule Osnabrück

Paul Pöhler, Hochschule Osnabrück

Studentische und wissenschaftliche Mitarbeit:

Lukas Brandt, Enje Clüver, Patrick Hinz, Luca Schmidt und Alexandra Ritters,
alle Hochschule Osnabrück

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VIII
ZUSAMMENFASSUNG	1
SUMMARY	3
1 EINLEITUNG	5
1.1 Hintergrund zum Forschungsantrag.....	5
1.2 Theoretischer Hintergrund.....	6
1.3 Relevanz der Zielstellung.....	7
1.4 Bedeutung von Kunststoffrasensystemen für den Sport	9
1.5 Nutzung von Kunststoffrasensystemen im Sport	9
1.5.1 Fußballsport.....	9
1.5.2 Feldhockey.....	10
1.5.3 American Football.....	10
2 KUNSTSTOFFFRASEN UND UMWELT	12
2.1 Definition Mikroplastik.....	12
2.2 Umfang von Mikroplastik in der Umwelt	14
2.3 Mikroplastikaustrag aus Kunststoffrasensystemen	14
2.3.1 Austräge in Gewässer	15
2.3.2 Austräge in Boden und Grundwasser	16
2.3.3 Austräge in die Luft.....	17
2.4 Gesundheitliche Risiken von Kunststoffrasensystemen.....	18
2.4.1 Multiresistente Keime – MRSA-Erreger.....	18
2.4.2 Bedeutung von MRSA-Erreger auf Kunststoffrasenplätzen.....	19
2.4.3 Äußere Einflüsse auf MRSA-Erreger	20
2.4.4 Belastung natürlicher Füllstoffe	21
2.4.5 Empfehlungen für die Nutzerinnen und Nutzer	21
2.4.6 Potentiell gefährliche Stoffe im Fasermaterial	22
2.4.7 Deklaration der Inhaltsstoffe (eigene Untersuchung)	22
2.5 Synthetische Füllstoffe	25
2.5.1 Altreifen (ELT – End-of-Life-Tyres).....	25
2.5.2 Gesundheitliche Risiken von ELT	26
2.5.3 Weitere synthetische Füllstoffe.....	29
2.6 Elastifizierende Schichten.....	30

2.6.1	Temperatureinfluss	31
2.6.2	Verletzung.....	31
3	EMISSION VON PRIMÄREM MIKROPLASTIK DURCH FÜLLSTOFFE	32
3.1	Schätzung der Nachfüllmengen	32
3.2	Ermittlungen von Füllstoffverlusten.....	33
4	EMISSION VON SEKUNDÄREM MIKROPLASTIK DURCH FASERABRIEB	37
4.1	Stand des Wissens	37
4.2	Felduntersuchungen - Austrag von sekundärem Mikroplastik (eigene Untersuchung).....	39
4.2.1	Masseverlust sandverfüllte Plätze	40
4.2.2	Masseverlust synthetisch verfüllte Plätze	42
4.2.3	Zusammenfassende Bewertung der Austragsmengen	45
5	SPIELEIGENSCHAFTEN VON KUNSTSTOFFFRASENSYSTEMEN	48
5.1	Stand des Wissens	48
5.1.1	Technische Spieleigenschaften.....	48
5.1.2	Verletzungsrisiko	48
5.1.3	Subjektiv wahrnehmbare Spieleigenschaften	49
5.1.4	Beeinflussung der Spieleigenschaften durch die Instandhaltung.....	50
5.2	Untersuchung der subjektiven Spieleigenschaften (eigene Untersuchung)	54
6	KUNSTSTOFFFRASENSYSTEME OHNE SYNTHETISCHEN FÜLLSTOFF	61
6.1	Kork als natürlicher Füllstoff	61
6.2	Weitere natürliche Füllstoffe	63
6.3	Patente für natürliche Füllstoffe	64
6.4	Teilverfüllte Systeme	64
6.5	Unverfüllte Systeme	64
7	VERMEIDUNG VON SEKUNDÄREM MIKROPLASTIK	65
7.1	Fasern	65
7.2	Langzeitverhalten	66
7.3	Prüfverfahren im System.....	68
7.4	Prüfverfahren zur Faserbeständigkeit.....	69
7.5	Abwasserbehandlungssysteme	71
8	ABFALLBEHANDLUNG UND RECYCLING	74
8.1	Problemstellung	74
8.2	Abfallhierarchie	74
8.3	Abfall Vermeidung.....	75
8.4	Vorbereitung zur Wiederverwertung.....	77

8.5	Recycling.....	78
8.6	Rezyklat	79
8.7	Sonstige Verwertung und Beseitigung	80
8.8	Fazit Kunststoffrasen-Recycling.....	81
9	HINWEISE FÜR NORMUNGSARBEIT	82
9.1	Umweltrelevante Inhaltsstoffe	82
9.2	Deklarationspflicht	83
9.3	Kontrollprüfungen	85
9.4	Dauerhaftigkeit.....	85
10	HINWEISE FÜR BESTELLER	87
10.1	Sportbodenauswahl	87
10.2	Vergabeverfahren	87
10.3	Kontrollprüfungen	89
10.4	Pflege, Betrieb und Nutzung	89
11	AUSBLICK	90
12	LITERATURVERZEICHNIS	92
13	ANHANG	115
13.1	Eigene Methoden	115
13.1.1	Methode der Umfrage zur Spieleigenschaften.....	115
13.1.2	Methode zur Untersuchung des Faserverschleißes	119
13.2	Eigene Ergebnisse.....	126
13.2.1	Auswertungen Faserverschleiß bei Kunststoffrasensystemen	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verletzungsrate der NFL Spieler im Vergleich auf Sportrasen und Kunststoffrasen (nach Seifert 2022)	11
Abbildung 2: Sekundäres Mikroplastik, hier Abrieb synthetischer Füllstoff aus einem Kunststoffrasen	13
Abbildung 3: Vergleich der Erregergruppen auf Sportrasen und Kunststoffrasen (Hornei et al. 2009)	19
Abbildung 4: Verwendete Metalle als Farbmittel für Kunststoffrasengarnen (Vineyard et al. 2018)	22
Abbildung 5: Beispiel einer FT-IR Untersuchung nach ISO 19702:2015-08 zwei exemplarischer Fasern, eigene Untersuchung.....	24
Abbildung 6: Thermogravimetrische Analyse nach DIN 51006:2005-07 einer exemplarischen Faser, eigene Untersuchung.....	24
Abbildung 7: Mikroskopische Aufnahme eines ELT-Granulats mit Hilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskops. Deutlich zu erkennen sind zahlreiche Einschlüsse und Verunreinigungen (Canepari et al. 2018).....	26
Abbildung 8:Vergleich der geschätzten Blei-Exposition während einer Trainingseinheit zwischen Kindern und Erwachsenen in Relation zur maximale zulässigen Tages- und Jahresdosis (Pronk et al. 2020)	28
Abbildung 9: Messung der überirdischen Biomasse bei 5 % EPDM-Erdanteil, Ergebnis-Vergleich in g. (van Kleunen et al. 2019)	30
Abbildung 10: Füllstoffaustrag nach (Løkkegaard et al. 2019)	32
Abbildung 11: Austrag (t) je Spielfeld und Nutzungsjahr Gesamt (Meyer 2020).....	34
Abbildung 12: Gesamter Faserverlust sandverfüllter Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung	40
Abbildung 13: Gesamter Faserverlust auf sandverfüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung ...	41
Abbildung 14: Faserverlust pro Jahr sandverfüllter Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung	42
Abbildung 15: Faserverlust pro Jahr sandverfüllter Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung	42
Abbildung 16: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung.....	43
Abbildung 17: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätze mit extensiver Nutzung	43
Abbildung 18: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung.....	44
Abbildung 19: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung.....	44
Abbildung 20: Gesamter Faserverlust an der Prüfstelle mit intensiver Nutzung	45
Abbildung 21: Vergleich des Masseverlustes pro Jahr der Fasern bei unterschiedlichen Füllstoffen Prüfstelle mit intensiver Nutzung.....	46
Abbildung 22: Vergleich des Masseverlustes pro Jahr der Fasern bei unterschiedlichen Füllstoffen Prüfstelle mit intensiver Nutzung.....	46
Abbildung 23: Umfrage zum subjektiven Empfinden von ungefüllten Kunststoffrasensystemen (ÖISS o. J.)	50

Abbildung 24: Links: Einfluss des Platzalters auf die Kraftreduzierung. Rechts: Einfluss der freien Faserhöhe auf die Ballrollentfernung (Sharma et al. 2016).....	51
Abbildung 25: Methode der Intensivwäsche eines Kunststoffrasens (Polyclean o. J.).....	52
Abbildung 26: Schema der Degradation und die Wirkung der Pflegemaßnahmen (Fleming et al. 2020, verändert)	53
Abbildung 27: Bewertung der Standfestigkeit.....	55
Abbildung 28: Bewertung des Ballrollverhaltens.....	55
Abbildung 29: Bewertung des Ballsprungverhaltens.....	56
Abbildung 30: Bewertung der Platzhärte	56
Abbildung 31: Bewertung der Bereitschaft zu Grätschen	57
Abbildung 32: Bewertung der Bereitschaft für ein Tackling	58
Abbildung 33: Bewertung des Verletzungsrisikos.....	58
Abbildung 34: Bewertung der Rutschfestigkeit auf Kunststoffrasenspielfeldern.....	59
Abbildung 35: Zusammenfassende Darstellung der subjektiven Bewertung von Spieleigenschaften	60
Abbildung 36: Vergleichende Untersuchung von Energieabbau und Energierückgabe bei Kork/Kokosnussfüllstoffen (Dickson et al. 2020a)	62
Abbildung 37: Endlos extrudierte LLDPE-Fasern für Kunststoffrasen	66
Abbildung 38: Einfluss der Zeit auf die Eigenschaftsänderung bei der Alterung von Thermoplasten (Zweifel 1997)	67
Abbildung 39: Verschleißmaschine (Lisport-Tester) nach DIN EN 15306:2014-07.....	69
Abbildung 40: Durch Absauganlage modifizierter Lisson Tretrad-Test nach DIN EN ISO 12951:2020-10.....	70
Abbildung 41: Kunststofftrieb in der Absauganlage des modifizierter Lisson Tretrad-Test nach DIN EN ISO 12951:2020-10	71
Abbildung 42: Überlastete Abwasserbehandlungsanlage	72
Abbildung 43: Die fünfstufige Abfallhierarchie der europäischen Abfallrahmenrichtlinie	75
Abbildung 44: Umweltbelastung verschiedener Rasenspielfelder pro Jahr im Vergleich (Itten et al. 2020) ..	76
Abbildung 45: Umweltbelastung verschiedener Rasenspielfelder pro theoretischer und effektiver Nutzungsstunde im Vergleich (Itten et al. 2020).	76
Abbildung 46: Mikroskopische Aufnahme eines PE/PA Compound. PE (grün) und 20 % PA (rot). Rechts: Neeware. Links: Rezyklat. (Bildquelle: BASF o. J.)	77
Abbildung 47: Deklarationsettiket mit Datenqualitätsleveln nach DIN SPEC 91446:2021-12.....	79
Abbildung 48: Schematische Darstellung der Wechselbeziehungen bei der Mikroplastik-Analyse DIN EN ISO 24187:2022-01	85
Abbildung 49: Übersicht der Prüfstellen und Messpunkte (Fédération Internationale de Football Association (FIFA) 2022, verändert)	119
Abbildung 50: Absaugen des Füllstoffes mittel Milwaukee M18 VC-2.....	120
Abbildung 51: Faserentnahme.....	120
Abbildung 52: Labortechnische Arbeiten	121
Abbildung 53: Untersuchung der Fasern	121

Abbildung 54: Differenzierung zwischen Faserbruch und Faserverschleiß durch Ausmessen	122
Abbildung 55: Analysewaage	122
Abbildung 56: Varianz der Masse je Faserbündel bei neuem Kunststoffrasen	124
Abbildung 57: Unterschiedliche Schlaufengrößen der Faserbündel unterhalb des Trägergewebes	124
Abbildung 58: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 1	126
Abbildung 59: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 2	127
Abbildung 60: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 3	127
Abbildung 61: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 4	128
Abbildung 62: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 5	128
Abbildung 63: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 6	129
Abbildung 64: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 7	129
Abbildung 65: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 8	130
Abbildung 66: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 9	130
Abbildung 67: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 10	131
Abbildung 68: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 11	131
Abbildung 69: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 12	132
Abbildung 70: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 13	132
Abbildung 71: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 14	133
Abbildung 72: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 15	133
Abbildung 73: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 16	134
Abbildung 74: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 17	134
Abbildung 75: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 18	135
Abbildung 76: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 19	135
Abbildung 77: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 20	136
Abbildung 78: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 21	136
Abbildung 79: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 22	137
Abbildung 80: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 23	137
Abbildung 81: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 24	138
Abbildung 82: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 25	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Größeneinordnung von „Plastik“ nach Andradý (2011) und Cole et al. (2011)	12
Tabelle 2: Mittelwerte der Ablösegeschwindigkeit von Füllstoffen auf glatter Oberfläche (Rischmüller 2022)	17
Tabelle 3: Durchschnittliche MRSA-Nachweisbarkeit der unterschiedlichen Faser- und Füllstofftypen (Keller et al. 2020, verändert)	20
Tabelle 4: Analyse der Stabilisatoren und anderer Additive über HPLC und UV/VIS von 4 exemplarischen Fasern.....	23
Tabelle 5: Datenbanken und Stofflisten als Vorbild für eine Deklaration.....	25
Tabelle 6: Nachfüllmenge an Füllstoff pro Jahr in kg.....	33
Tabelle 7: Mengen Füllstoffaustrag	36
Tabelle 8: Ergebnisse der Faseruntersuchung (nach Müller et al. 2019).....	38
Tabelle 9: Berechnung der Masseverluste während der bisherigen Nutzung (nach Müller et al. 2019)	38
Tabelle 10: Austragsmengen von sekundärem Mikroplastik durch Faserabrieb je 7.600 m ² , Poleinsatzgewicht 1 kg/m ²	39
Tabelle 11: Standort und Ausprägung der untersuchten Plätze	39
Tabelle 12: Plätze der Umfrage zur Bewertung der Spieleigenschaften von Kunststoffrasenplätzen	54

Abkürzungsverzeichnis

DFB	Deutscher Fußball-Bund
DK	Dänemark
DOSB	Deutscher Olympischer Sportbund
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
ELT	End-of-Life-Tyres
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien, M-Gruppe (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)
EU	Europäische Union
FIFA	Fédération Internationale de Football Association
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftentwicklung Landschaftsbau
FTOH	Fluortelomeralkohole
FT-IR	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
LLDPE	Lineares Polyethylen niederer Dichte
MRSA	Methicillin-resistenter <i>Staphylococcus aureus</i>
NFL	National Football League
NL	Niederlande
ÖISS	Österreichisches Institut für Schul- und Sportstättenbau
PA	Polyamid
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Polyethylen
PFAS	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PP	Polypropylen
PU	Polyurethane
ROOH	Hydroperoxiden
S	Schweden
SBR	Altreifenrezyklate
TPE	Thermoplastische Elastomere
UV-Strahlung	Ultraviolettstrahlung

Zusammenfassung

Durch die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) wurde am 27. April 2023 für die Beschränkung einer bewussten Inverkehrbringung von primärem Mikroplastik mit einer Übergangsfrist von 8 Jahren gestimmt (Europäische Kommission o. J.). Hier runter fallen auch die synthetischen Füllstoffe, welche für die Verfüllung von Kunststoffrasensystemen verwendet werden. Es müssen für die Zukunft Alternativen für synthetisch verfüllte Kunststoffrasensysteme gefunden werden, welche die gleiche Qualität an Spieleigenschaften mitbringen. Das Forschungsprojekt „Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag und -verbrauch - (UKuRa)“ umfasst drei Themenfelder. Als erstes Themenfeld wird der **Verzicht auf synthetische Füllstoffe**, die für Kunststoffrasensysteme bisher verwendet werden, behandelt. Aufgrund der aus Schätzungen und Hochrechnungen resultierenden Austragsmengen von Füllstoffen in die Umwelt von 0,12 bis 6,5 Tonnen pro Jahr und Platz (Weijer et al. 2017; Løkkegaard et al. 2019; Meyer 2020; Hann et al. 2018; Lassen et al. 2015; Eunomia Research & Consulting Ltd 2017; Magnusson und Mácsik 2017; Bø et al. 2020; Rischmüller 2022) und der geplanten Beschränkung zur Inverkehrbringung von primärem Mikroplastik werden alternative Füllstoffen wie beispielsweise Kork und Kunststoffrasenbeläge ohne Füllstoffe untersucht. Dazu gehören Füllstoffe, die sich bereits auf dem Markt etabliert haben und durch wissenschaftliche Untersuchungen ihre technischen Qualitäten bewiesen haben und andere natürliche Füllstoffe, die als Alternative infrage kommen könnten, sich jedoch aufgrund von fehlenden, unabhängigen Forschungsergebnissen noch in der Entwicklungsphase befinden.

Eigene Untersuchungen der subjektiven Wahrnehmung der Nutzenden von Kunststoffrasensystemen durch Umfragen zeigen, dass auch ohne die Verwendung synthetischer Füllstoffe die Beläge ohne Einschränkungen genutzt werden können. Bei ungefüllten Kunststoffrasensystemen werden die schutzfunktionellen Eigenschaften besser bewertet. Die mineralisch hochverfüllten Kunststoffrasensysteme werden insgesamt schlechter wahrgenommen.

Im zweiten Themenfeld wird der **Faserverschleiß** aus Kunststoffrasensystemen als Emittent von sekundärem Mikroplastik in die Umwelt untersucht. Die Beschränkung der bewussten Inverkehrbringung von primärem Mikroplastik der Europäische Chemikalienagentur (ECHA) greift nicht bei sekundärem Mikroplastik. Austragsmengen von Kunststoffrasenfasern aus den Kunststoffrasensystemen aus wenig validen Schätzungen und Hochrechnungen geben Mengen zwischen 0,14 bis 0,19 Tonnen pro Jahr und Platz an (Lassen et al. 2015; Müller 2018; Fleming et al. 2020; Hann et al. 2018). Durch eigene Felduntersuchungen im Zuge des Projektes wurde der Austrag von Kunststoffrasenfasern aus dem Kunststoffrasensystem untersucht. Unter der Berücksichtigung von Faktoren wie Platzalter, Nutzungszonen und Aufbau des Kunststoffrasensystems kam die Untersuchung zu

dem Ergebnis, dass ein Kunststoffrasensystem zwischen 10 kg und 90 kg Mikroplastik pro Jahr und Platz nur durch Faserverlust und Abrieb, ohne Berücksichtigung des Füllstoffverlustes verliert. Außerdem wurde durch dieses Forschungsprojekt die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Verschleißbeständigkeit von Fasern für Kunststoffrasensysteme angestoßen.

Im dritten Themenfeld des Forschungsprojektes geht es um das **Recycling von Kunststoffrasenplätzen**, welches von der Industrie in Ansätzen erprobt und in den Markt eingeführt wurde. Es besteht jedoch noch Potenzial für eine Verbesserung des Recyclingprozesses der End-of-Life Stoffe. Aktuell werden diese Stoffe noch einer minderwertigen Verwertung, einem Downcycling zugeführt. Um Abfallströme von Kunststoffrasensystemen erfassen und vermindern zu können, werden vier Ansatzpunkte vorgeschlagen.

1. Ein umfassendes Kataster, z. B. im Rahmen des Sportstättenatlas ließe eine lückenlose Verfolgung des Verbleibs von Kunststoffrasenbelägen zu.
2. Ein eigener Abfallschlüssel würde es ermöglichen, die Abfallströme hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu unterstützen.
3. Verwendung von Systemen, welche nur aus einer Polymersorte bestehen, um das Recycling zu erleichtern.
4. Durch eine umfassende Deklaration der beim Neubau verwendeten Stoffe kann das Recycling von Kunststoffrasenplätzen deutlich vereinfacht werden und die Qualität des Rezyklats gesteigert werden.

Summary

The EU Member States voted on 27 April 2023 to restrict the deliberate placing on the market of primary microplastics with a transitional period of 8 years (Europäische Kommission o. J.). This also includes the synthetic infill used for the backfilling of synthetic turf systems. For the future, alternatives for synthetically filled synthetic turf systems must be found that offer the same quality of playing characteristics. The research project "Environmentally sound synthetic turf through reduced plastic discharge and consumption" (UKuRa) covers three topics. The first topic area is the elimination of synthetic infill, which have been used for synthetic turf systems up to now. Based on the discharge amounts of infill into the environment of 0.12 to 6.5 tonnes per year and square resulting from estimates and projections (Weijer et al. 2017; Løkkegaard et al. 2019; Meyer 2020; Hann et al. 2018; Lassen et al. 2015; Eunomia Research & Consulting Ltd 2017; Magnusson und Mácsik 2017; Bø et al. 2020; Rischmüller 2022) and the planned restriction on placing primary microplastics on the market, alternative infill such as cork and synthetic turf coverings without infill are being investigated. These include infill that are already established on the market and have proven their technical qualities through scientific research and other natural infill that could be considered as an alternative but are still in the development phase due to a lack of independent research results. Our own investigations of the subjective perception of users of synthetic turf systems through surveys show that the surfaces can be used without restrictions even without the use of synthetic infill. The protective properties of unfilled synthetic turf systems are rated better. The highly mineral-filled synthetic turf systems are perceived worse overall.

In the second topic area, fibre wear from synthetic turf systems is investigated as an emitter of secondary microplastics into the environment. ECHA's restriction on the deliberate placing on the market of primary microplastics does not apply to secondary microplastics. Discharge quantities of synthetic turf fibres from synthetic turf systems from not very valid estimates and projections indicate quantities between 0.14 to 0.19 tonnes per year and site (Lassen et al. 2015; Müller 2018; Fleming et al. 2020; Hann et al. 2018). The discharge of synthetic turf fibres from the synthetic turf system was investigated through our own field investigations in the course of the project. Taking into account factors such as pitch age, usage zones and structure of the synthetic turf system, the study concluded that a synthetic turf system loses between 10 kg and 90 kg of microplastics per year and pitch only through fibre loss and abrasion, without considering filler loss. In addition, this research project initiated the development of a test method to determine the wear resistance of fibres for synthetic turf systems.

The third topic area of the research project is about the recycling of synthetic turf pitches, which has been tested by the industry in rudimentary form and introduced to the market. However, there

is still potential for improving the recycling process of end-of-life materials. Currently, these materials are still being downcycled. In order to be able to record and reduce waste flows from synthetic turf systems, four starting points are proposed.

- 1) A comprehensive register, e.g. within the framework of the sports facility atlas, would allow the fate of synthetic turf surfaces to be tracked without interruption.
2. a separate waste code would make it possible to support waste flows towards a circular economy.
3. use of unfilled systems consisting of only one type of polymer to facilitate recycling.

A comprehensive declaration of the materials used in new construction can significantly simplify the recycling of synthetic turf pitches and increase the quality of the recycled material.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund zum Forschungsantrag

Die aktuelle Diskussion um den Austrag von Mikroplastik aus Sportfreianlagen mit Kunststoffrasen erfordert vor dem Hintergrund der europäischen Kunststoffstrategie neue Lösungen der Verwendung von Stoffen, sowohl für die gefüllte Polschicht als auch der Stoffe für die Fasern. Bei der Planung neuer Sportfreianlagen mit Kunststoffrasensystemen stellt sich die Frage, welche Stoffe, insbesondere welche Füllstoffe verwendet werden können. In Zukunft soll die Verwendung von Kunststoff-Füllstoff auf Sportplätzen nicht mehr möglich sein, da ein Inverkehrbringen von Mikroplastik, also Partikel < 5 mm, wozu synthetisches Füllmaterial zählt, untersagt wird. Am 27. April 2023 wurde durch die EU-Mitgliedsstaaten für den Vorschlag zur Beschränkung von bewusst verwendetem Mikroplastik gestimmt. Die polymeren Füllmaterialien für Kunststoffrasensysteme sind von dieser Beschränkung betroffen und eine Inverkehrbringung ist nach einer Übergangsfrist von acht Jahren nicht mehr zulässig. Sollte nach der Prüfung des Vorschlages durch das Europäische Parlament und den Rat der Europäischen Union kein Veto eingelegt werden, wird der Vorschlag in die REACH-Verordnung aufgenommen und die Übergangsfrist beginnt.

Bestandsanlagen haben noch die Option ihren Vorrat an synthetischen Füllstoffen aufzubreuchen und können auch nach der Übergangsfrist noch in Betrieb bleiben. Alternativen sind bereits vorhanden, bisher ist jedoch wenig bekannt, welchen Einfluss alternativen Füllstoffe oder Systeme mit einem Verzicht auf Füllstoffe, auf das Spielverhalten der Nutzer haben (ECHA o. J.).

Von der ECHA bisher noch nicht im Fokus, aber gleichwohl ein Problem für die Umwelt, ist der Faserschleiß, da dieser wie die Füllstoffe über die Abführung des Regenwassers direkt in Gewässer geleitet werden, über Versickerung dem Grundwasser zugeführt werden könnten oder auf anderem Wege in die Umwelt geraten, z. B. durch die Nutzerinnen und Nutzer, in die Luft, ins Wasser oder in den Boden. Insbesondere ist bisher unbekannt, mit welchen Mengen hier gerechnet werden muss. Die Bestimmung der Mengen ist Grundlage für Möglichkeiten und Grenzen von Rückhaltesystemen und der Abwasserbehandlung. Auch ist nicht untersucht, ob Faserqualitäten Einfluss auf die Mengen des Austrags haben.

Aktuell überwiegt eine energetische Verwertung und damit werden die Rohstoffe nicht wieder in den Kreislauf zurückgeführt (Vacano et al. 2021). Bedingt durch die relativ kurze Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren und durch die Größe der Fläche gibt es einen hohen Bedarf an einer Optimierung und neuer Ansätze, wie mit dem Kunststoffrasensystem am Ende seiner Lebensdauer umgegangen wird.

1.2 Theoretischer Hintergrund

Bis vor einiger Zeit ist die Verwendung synthetischer Füllstoffe in Kunststoffrasensystemen kaum infrage gestellt worden. Große Auftraggeber, wie z. B. die Freie und Hansestadt Hamburg haben schon immer überwiegend sandverfüllte Kunststoffrasensysteme gebaut. Auch ATV DIN 18320:2019-09 sieht das sandverfüllte Kunststoffrasensystem als Regelbauweise vor. Seitdem der Austrag von Mikroplastik aus Kunststoffrasenplätzen europaweit diskutiert wird, ist die Notwendigkeit alternativer Füllstoffe erkannt worden. Seitens des Ausschusses für Risikobewertung der ECHA wird die Beschränkung zur bewussten Verwendung von Mikroplastik unterstützt, vor allem da ein Verbot effektiveren Umweltschutz leisten kann als Maßnahmen eines Risikomanagements. Bereits existierende Alternativen wie Kork, Olivenkerne, Gemische mit Reisspelzen oder andere organische Stoffe sind nur beschränkt verfügbar oder können durch eine schnellere Verwitterung zu einer verkürzten Lebensdauer des Kunststoffrasenspielfelds führen. Polymere aus abbaubaren Stoffen sind bisher nur im Prototypenstadium vorhanden. Auch haben die neuen Füllstoffe teilweise abweichende sportfunktionelle Eigenschaften zu bisher verwendeten Füllstoffen aus Kunststoff (Dickson et al. 2020a). Eine weitere Möglichkeit sind Kunststoffrasensysteme, welche nur mit Sand gefüllt sind. Auch wenn diese Art System als die bezeichnete zweite Generation von Kunststoffrasenbelägen (Sand-Gummigranulat-Gemische werden von der Wirtschaft als die dritte Generation bezeichnet) wie ein Rückschritt in der Entwicklung wirkt, können neue weniger hoch gefüllte Systeme durchaus eine Alternative sein. Entwicklungen gibt es vor allem bei der Geometrie und Stoffzusammensetzung der Faser. Auch ungefüllter Kunststoffrasen kommt wieder als Belag infrage und entwickelt sich weiter.

Erste Studien haben ergeben, dass der Faserverschleiß ebenfalls zum Mikroplastikaustrag in die Umwelt beiträgt. Dabei ist jedoch nur der Verschleiß an Fasern gemessen worden, die sich zur Zeit der Untersuchung noch auf der Sportfreianlage befanden. Vollständig abgelöste Fasern wurden nicht berücksichtigt (Müller et al. 2019).

Kunststoffrasensysteme besitzen keinen eigenen Abfallschlüssel, daher wird das Aufkommen derzeit nicht getrennt statistisch erfasst. In einer Schätzung, welche von 5.000 existierenden Kunststoffrasenplätzen in Deutschland ausgeht, müssten rechnerisch jährlich 400 bis 450 Plätze erneuert werden (Leers 2020; Dufft 2020 in Wagner et al. 2022). Dabei gelten als maßgebliches Ziel die Schonung der natürlichen Ressourcen und der Schutz von Menschen und Umwelt bei der Bewirtschaftung von Abfällen.

1.3 Relevanz der Zielstellung

Dieses Projekt untersucht alternative Füllstoffe, die Fasereigenschaften und die Nutzung des Recyclings von Kunststoffrasensystemen zur Vermeidung des Austrags von Mikroplastik in die Umwelt durch Optimierungen der Produkteigenschaften bis hin zu einer verbesserten Rezyklierbarkeit.

Vor dem Einsatz alternativer Füllstoffe für Kunststoffrasenbeläge sind von der Planung über die Instandhaltung des Systems bis hin zum Rückbau alle Phasen des Lebenszyklus eines Kunststoffrasensystems zu berücksichtigen. Betreibende und Planende bestimmen durch ihre Entscheidung wie die Anlage über ihre Lebensdauer hinweg zu betreiben ist, welche Potentiale in der Abfallbehandlung vorhanden sind und welche Risiken für die Umwelt entstehen können.

Die Dringlichkeit des Themas begründet sich durch die Einschränkung bisher genutzter synthetischer Füllstoffe und die Notwendigkeit, alternative Stoffe zu finden, denn der aktuelle Bedarf an Flächen für das Ausüben der verschiedenen Vereinssportarten kann nur gedeckt werden, wenn es weiterhin ausreichend Kunststoffrasenplätze gibt (Deutscher Olympischer Sportbund e.V. (DOSB) und Deutscher Fußball-Bund e.V. (DFB) 2019).

Durch alternative natürliche Füllstoffe, verschleißarme Fasern und eine optimierte Rezyklierbarkeit soll die Umweltfreundlichkeit unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit von Kunststoffrasensystemen von neu zu errichtenden Sportböden verbessert werden.

2020 ist der technische Bericht PD CEN/TR 17519:2020-07-29 erstellt worden, der Empfehlungen gibt, wie durch bauliche Maßnahmen im Umfeld der Kunststoffrasenspielfelder ein Austrag von Mikroplastik verringert werden kann. Es existieren jedoch bisher keine Maßnahmen oder Anforderungen für die Normung von Kunststoffrasensystemen.

Neben dem Austrag von Mikroplastik durch synthetischen Füllstoff und Faserverschleiß sind ebenfalls Möglichkeiten zur Optimierung der Rezyklierbarkeit der Kunststoffrasensysteme zu untersuchen. Es gibt bereits einige Anbieter, die verschiedene Methoden anwenden, um nach dem Rückbau ein Recycling aller Stoffe durchzuführen. Es fehlen jedoch Daten, wie hoch die Recyclingquote bei Kunststoffrasenfeldern ist und welche Methoden für welche Art Kunststoffrasensystemen geeignet sind. Betreibenden fehlt es an Transparenz, was nach dem Rückbau mit den Kunststoffrasensystemen passiert, da es kaum Zertifizierungen für Abfallbehandlungen gibt.

Im Projekt wurde der aktuelle Forschungsstand zu den einzelnen Themenfeldern mittels Literaturrecherche herausgearbeitet. Themenfelder bei denen noch unzureichend Ergebnisse verfügbar sind, wurden mit eigenen Methoden bearbeitet um neue Ergebnisse und Erkenntnisse zu gewinnen. Für die Beurteilung der Spieleigenschaften wurde eine Umfrage von Spielerinnen und Spielern zu den unterschiedlichen Kunststoffrasensystemen durchgeführt. Hier wurden Spieleigenschaften subjektiv beurteilt und statistisch ausgewertet, mit dem Ziel beurteilen zu können, wie die Nutzenden die unterschiedlichen Kunststoffrasensysteme wahrnehmen und inwieweit Unterschiede in der

Bespielbarkeit festgestellt werden. Der Austrag von sekundärem Mikroplastik durch Faserverschleiß wurde durch eine eigene Methode auf Kunststoffrasensystemen untersucht. Hierbei wurde der Verschleiß von Kunststoffrasenfasern bei unterschiedlichen Systemaufbauten, bei unterschiedlichem Alter und in unterschiedlichen Nutzungszonen untersucht, um validere Ergebnisse zu bekommen als die angegebenen Mengen aus diversen bereits vorhandenen Schätzungen und Hochrechnungen.

1.4 Bedeutung von Kunststoffrasensystemen für den Sport

Kunststoffrasenplätze sind für den Profi- und Breitensport ein wichtiger Bestandteil, um einen ganzjährigen Spielbetrieb mit hoher Nutzungsintensität aufrechtzuerhalten. In Deutschland gibt es derzeit rund 5.000 Kunststoffrasenplätze, die hauptsächlich für den Fußballsport verwendet werden (Schimmelpfennig 2020 in Wagner et al. 2022). Das Interesse an Kunststoffrasenplätzen ist hoch, da diese gegenüber anderen Belägen höhere Nutzungsstunden ermöglichen. So liegen die Nutzungsstunden bei einem Kunststoffrasenplatz bei über 1.500 Stunden im Jahr (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) 2014). Vergleichsweise liegen die Nutzungsstunden bei Naturrasen mit bis zu 800 Nutzungsstunden deutlich darunter (FLL 2014). In Deutschland werden aktuell pro Jahr ca. 300 Kunststoffrasenplätze neugebaut und 150 Bestandsplätze kernsaniert (DOSB und DFB 2019).

1.5 Nutzung von Kunststoffrasensystemen im Sport

1.5.1 Fußballsport

In Deutschland sind etwa 24.300 Vereine mit über 1.800.000 Spielern gemeldet, die organisiert die Sportart Fußball betreiben (DFB 2021). Dazu kommen unzählige Spielerinnen und Spieler, die außerhalb dieser Vereine ebenfalls Fußball spielen. Das hohe Interesse an Fußball sorgt dafür, dass die Nachfrage an Spielflächen, um die Sportart auszuüben, sehr hoch ist. Gerade bei den Amateurreinen ist ein Kunststoffrasenplatz unter anderem aufgrund der Möglichkeit zur hohen Nutzungsintensität als Sportbelag etabliert. In Deutschland besitzen 24,8 % aller Fußballvereine einen Kunststoffrasenplatz (Bauer et al. 2017). In vielen Profiligen ist das Austragen der Punktspiele auf Kunststoffrasen untersagt, dennoch hat die Fédération Internationale de Football Association (FIFA) bereits 2004 Kunststoffrasen in die Spielregeln mit aufgenommen und somit offiziell und international anerkannt (FIFA 2021).

Internationale Turniere, wie die FIFA U-17-Weltmeisterschaft in Finnland 2003, die FIFA U-17-Weltmeisterschaft in Peru 2005 und 2007 die FIFA U-20-Weltmeisterschaft in Kanada wurden bereits ausschließlich auf Kunststoffrasenplätzen ausgetragen (FIFA 2021).

1.5.2 Feldhockey

In Deutschland gibt es rund 400 Hockey-Vereine, die auf 15 Landesverbände in Deutschland verteilt sind. Dabei sind ca. 84.000 Menschen in Deutschland Mitglied in diesen Vereinen. Bereits seit den 70er Jahren wird Feldhockey für Länderspiele und bedeutende Wettbewerbe auf Kunststoffrasen gespielt und löste damit Naturrasen als Spieluntergrund ab (Deutscher Hockey Bund e. V. o. J.). Bei Kunststoffrasen, der für den Hockeysport verwendet wird, sollte die Flurlänge zwischen 10 und 11 Millimetern liegen, damit ist diese kürzer als die Flurlänge, die auf einem Kunststoffrasenplatz, der für Fußball vorgesehen ist, verwendet wird (DIN EN 15330-1:2013-12).

1.5.3 American Football

2022 wurden in der National Football League (NFL) auf 14 von insgesamt 30 NFL-Feldern die Punktspiele auf Kunststoffrasenplätzen ausgetragen (Abdalazem und Roche 2022). Der Präsident der NFL Players Association, JC Tretter sprach sich 2020 gegen die Verwendung von Kunststoffrasen aus, da sich zahlreiche Spieler auf Kunststoffrasen verletzt hatten. Die Spieler selbst sehen die Verwendung von Kunststoffrasen als Spielfeldgrundlage ebenfalls kritisch. So gaben bei einer Studie der NFL Players Association 91 % der befragten Spieler an, dass das Spielen auf Kunststoffrasen müder macht und schmerzhafter ist (Abdalazem und Roche 2022). Das erhöhte Verletzungsrisiko auf Kunststoffrasen im Vergleich zu Naturrasen hat sich aber im Verlauf der letzten Jahre nahezu egalisiert, wie die Abbildung 1 zeigt. So lag die Inzidenzrate für Kunststoffrasen 2018 noch bei 0,04 je 100 betroffener Spieler und bei 0,033 je 100 betroffener Spieler. 2021 hat sich das Unfallrisiko nahezu angeglichen und liegt nun bei einem Unterschied von 0,001 pro 100 betroffener Spieler (Seifert 2022).

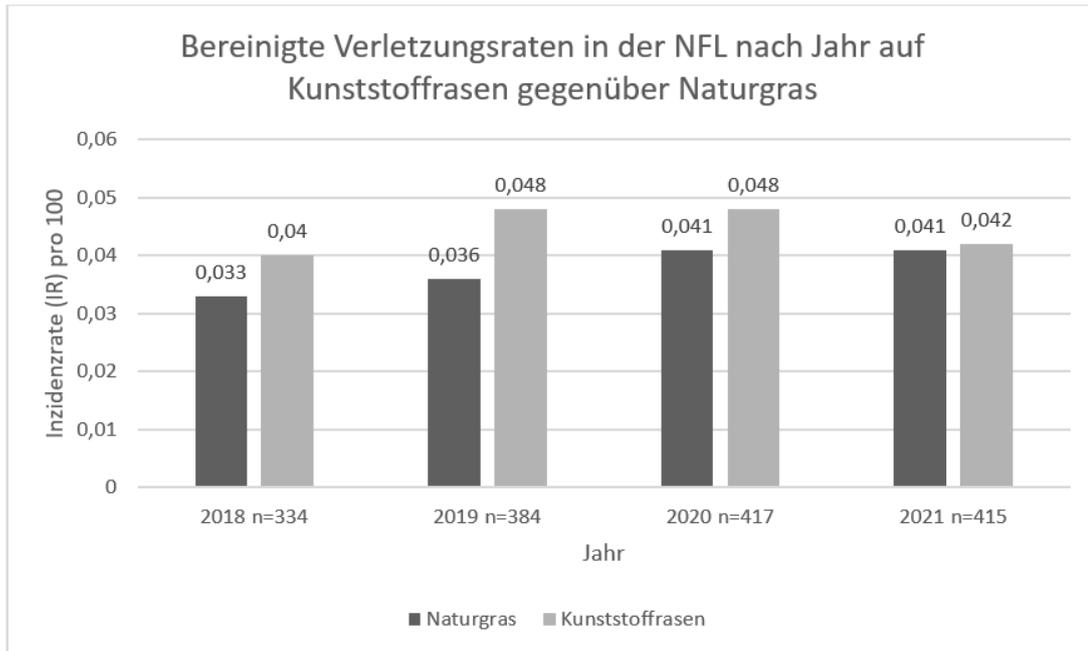


Abbildung 1: Verletzungsrate der NFL Spieler im Vergleich auf Sportrasen und Kunststoffrasen (nach Seifert 2022)

2 Kunststoffrasen und Umwelt

2.1 Definition Mikroplastik

Bei Mikroplastik handelt es sich um halb- bzw. vollsynthetisch hergestellte makromolekulare Werkstoffe, welche aus unterschiedlichsten Monomeren zu Kettenlängen von $n > 1000$ synthetisiert werden. Es existiert eine breite Palette unterschiedlichster Kunststoffe für vielseitige Anwendungen, z. B. für die Verwendung in der Automobilindustrie, Textilindustrie und für die Herstellung von Kosmetika. Durch ihre lange Haltbarkeit und hohe Funktionalität sind sie für eine Vielzahl von Anwendungen unverzichtbar geworden (Bauer et al. 2013).

Es existiert noch keine allgemeingültige Definition für die Größe von Mikroplastik. Die ECHA definiert Mikroplastik als synthetisch hergestellte, feste Partikel, welche größer als 100 nm und kleiner als 5 mm sind, bei faserähnlichen Partikeln größer 300 nm und kleiner 15 mm (ECHA o. J.). In der Fachliteratur werden unterschiedliche Definitionen gefunden. So verwendet Andrady (2011) den Begriff „Mesoplastik“, um zwischen Partikeln, welche mit dem menschlichen Auge erkennbar sind und welche, die nur unter dem Mikroskop sichtbar sind, zu unterscheiden. Die obere Größengrenze von Mikroplastik wird von einem Großteil der Literatur auf 5 mm (alle Dimensionen) festgelegt. Diskussionsbedarf existiert bei der unteren Größengrenze. So sprechen zum Beispiel Reifferscheid und Brennholt (2014) ab einer Größe $< 10 \mu\text{m}$ von Nano-Partikeln und ab einer Größe $< 100 \text{ nm}$ von Nano-Silber (siehe Tabelle 1). Weiter Informationen sind zu finden in Hartmann et al. (2019).

Tabelle 1: Größeneinordnung von „Plastik“ nach Andrady (2011) und Cole et al. (2011)

Partikelgröße (mm)	Bezeichnung
> 25	Makroplastik
5 - 25	Mesoplastik
1 - 5	L-MPP (Large Microplastic Particle)
< 1	S-MPP (Small Microplastic Particle)

Unterschiedliche Mikroplastiksorten werden neben ihrer Größe in ihrer Entstehungsart in primäres und sekundäres Mikroplastik unterteilt.

Zu **primärem Mikroplastik** zählen kleine, hergestellte Kunststoffkörper. Dies können Halberzeugnisse, wie Granulate oder Pellets sein, welche später in thermoplastischen Verfahren zu fertigen Erzeugnissen geformt werden oder es können sogenannte „Microbeads“, kleinste Kunststoffpartikel sein, welche z. B. als Zusätze in Körperpflege- und Kosmetikprodukten Verwendung finden. Granulate und Pellets sind mehrere Millimeter groß und werden aufgrund ihrer Rieselfähigkeit verwendet, dadurch sind sie pumpbar und einfacher zu transportieren. „Microbeads“ besitzen nur einen

Durchmesser von < 1 mm und verleihen dem fertigen Produkt seine gewünschte abrasive Eigenschaft. Sie sind in einer breiten Produktpalette von Pflegecremes, Duschgels, Makeup, Lippenstiften, Rasierschaum bis Deodorants zu finden (Liebezeit 2012). Viele Kosmetikhersteller verzichten inzwischen auf den Zusatz von „Microbeads“ und sind auf der Suche nach umweltschonenden Alternativen. Seit 2015 existiert auf dem deutschen Markt zum Beispiel keine Zahnpaste mehr mit zugesetztem Mikroplastik (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland o. J.).

Sekundäres Mikroplastik entsteht durch den Zerfall von Makroplastik. Sekundäres Mikroplastik kann durch physikalische, chemische oder biologische Prozesse entstehen.

Die **physikalische Zersetzung** wird in thermisch und mechanisch unterschieden. Bei der thermischen werden durch Verbrennung kleinste Kunststoffpartikel über den entstehenden Ruß emittiert. Bei der mechanischen Zersetzung entsteht durch den Kontakt mit härteren Stoffen, z. B. Sand oder Gesteine, meist feiner Abrieb.

Eine **chemische Zersetzung** findet unter Einfluss von Sauerstoff (Oxidation) und unter Einfluss von Wasser und UV-Strahlung (Hydrolyse) statt. Durch Radikalbildung an ungesättigten Verbindungen und durch Aufbrechen und Hydrolyse von kovalenten Bindungen verkürzen sich die Polymerketten. Das Werkstück versprödet, wird brüchig und zerfällt mit der Zeit.

Die **biologische Zersetzung** ist vergleichbar mit der chemischen Zersetzung erfolgt jedoch durch Bakterien (Ehrenstein und Pongratz 2007).



Abbildung 2: Sekundäres Mikroplastik, hier Abrieb synthetischer Füllstoff aus einem Kunststoffrasen

2.2 Umfang von Mikroplastik in der Umwelt

Mikroplastik gelangt über vielseitige Eintragspfade in die Umwelt. Die größten Quellen von primären Mikroplastik sind 1) die industrielle Kunststoffproduktion, in der durch unsachgemäße Lagerung sowie Transport von Präproduktionspellets und Produktionsabfällen Kunststoffpartikel in die Umwelt gelangen, und 2) die Kosmetikindustrie, in der Mikroplastik absichtlich zugesetzt wird, um optimale Produkteigenschaften zu erreichen (Hann et al. 2018).

Die Ermittlung der Menge von primären Mikroplastik in der Umwelt ist schwierig und in der Fachliteratur umstritten. Nach Gouin et al. (2015) stammen ca. 11 % des Kunststoffes in der Nordsee (ca. 2300 t/a) von Kosmetika. Ebenfalls eine große Quelle von Mikroplastik, welches direkt über die Kanalisation in den Wasserkreislauf emittiert wird, sind Kleidungsstücke. Diese bestehen häufig aus Kunststofffasern und verlieren nach Hernandez et al. (2017) anfänglich pro Waschgang etwa 0,01 % ihrer Masse. Die unsachgemäße Entsorgung von Hausmüll und die Verschmutzung des öffentlichen Raumes durch Einwegprodukte tragen erheblich zur Kunststoffbelastung bei. Dabei handelt es sich meistens um Makroplastik, welches im Laufe der Zeit zu Mikroplastik zerfällt. So landen weltweit allein 750.000 t Zigarettenstummel (4,5 Billionen Stück) in der Umwelt (Novotny und Slaughter 2014). Auch der Großteil korrekt entsorgter Kunststoffabfälle, welche bis vor wenigen Jahren hauptsächlich deponiert wurden, gelangen nach dem Zerfall in Mikroplastik über Sickerwasser, Wind und Regen in die Umwelt (Barnes et al. 2009). Lkw- und Pkw-Reifen nutzen sich über ihre Lebensdauer durch Straßenabrieb stark ab. Die dadurch freigesetzten Mikroplastikpartikel liegen im mittleren Größenbereich von 65 bis 80 µm. Die auf diesem Weg freigesetzte Masse wird auf 0,81 kg pro Person und Jahr geschätzt. Je nach Straßenbelag und Entwässerungssystem landen sie zum Großteil in der Umwelt (Kole et al. 2017). Als weitere Quelle ist die Bau- und Abrissbranche zu erwähnen. Durch Unachtsamkeit, fehlerhafte Lagerung und Abrieb landen vor allem expandierte Dämmstoffe, wie Polystyrol und Urethanschäume, Verkleidungen und Rohre, sowie Strahlmittel, Farben und Lacke in der Umwelt (Battulga et al. 2019). Auch der Schiffsverkehr trägt durch unbeabsichtigte Verluste von Netzen und Seilen erheblich zur Verschmutzung der Meere bei. Die aufgeführten Quellen transportieren hauptsächlich über Windverwehungen und Oberflächenabfluss das Mikroplastik in die Umwelt. Durch seine hohe Mobilität und sehr langen Lebensdauern ist es unmöglich einmal freigesetzte Mikroplastikpartikel wieder einzufangen (Hann et al. 2018).

2.3 Mikroplastikaustrag aus Kunststoffrasensystemen

Durch verschiedene Austragswege gelangt Mikroplastik in die Umwelt. Die Austragswege können in drei Kategorien unterteilt werden. Der Austragsweg in die Luft, den Boden und in das Wasser,

welcher durch die Nutzenden verstärkt wird. Die Austragswege und die damit verbundenen Mengen an Mikroplastik, die ausgetragen werden, sind durch verschiedene Faktoren beeinflusst.

Weijer et al. (2017) nennen als Faktoren für die Austragswege

- Socken und Schuhe,
- Austrag am Spielfeldrand auf Wege,
- Abwasserkanäle,
- Entwässerungsgräben,
- umliegende Grasflächen,
- Pflegemaßnahmen,
- Faserverschleiß,
- Auslaufmatten,
- Feinstaub in der Luft.

Der technische Bericht PD CEN/TR 17519:2020-07-29 benennt diese Austragswege

- Schneeräumung,
- mangelhafte Wartungsverfahren,
- schlechte Lagerung von Ersatzfüllstoff,
- unsachgemäße Platzbauweise.

2.3.1 Austräge in Gewässer

In der Literatur ist das Vorhandensein von Mikroplastik in Oberflächengewässern weitreichend untersucht (Bertling et al. 2018). Jedoch ist der aquatische Austrag von Füllstoffen aus Kunststoffrasensystemen nur durch wenige Studien belegt. Niederländische Studien geben einen Füllstoffverlust von 6 – 10 kg pro Jahr und Platz an. Schwedische Studien sprechen von einer Menge von 200 – 340 kg pro Jahr und Platz, die in die Kanalisation gelangen. Nach Behandlung des Abwassers in Kläranlagen wird eine Menge von 2,5 kg - 36 kg in die Umwelt geleitet (Løkkegaard et al. 2019).

Als Austragsweg nennen Lassen et al. (2015) die Drainage als geringsten Faktor für den Austrag von Mikroplastik. Als Hauptaustragsweg wird der Oberflächenaustrag in anliegende Böden genannt, wobei der Austrag über Spielerinnen und Spieler und deren Kleidung ebenfalls relevant ist.

Zum Austragsweg durch Schuhe und Kleidung geben Løkkegaard et al. (2019) eine Zunahme bei Regen und Nässe an.

2.3.2 Austräge in Boden und Grundwasser

Während Mikroplastik in Oberflächengewässern inzwischen gut untersucht ist, existieren nur wenige Untersuchungen zu Boden und Grundwasser. Aufgrund der Verschmutzung der terrestrischen Umwelt ist anzunehmen, dass Mikroplastik aus dem Boden in tiefere Bodenschichten sickern kann. Diese Tatsache impliziert die Möglichkeit, dass das Vorkommen von Mikroplastik im Grundwasser in hohem Maße mit der Beschaffenheit des Bodens zusammenhängt. Diese Verunreinigung ist schädlich für das komplette Ökosystem, sowie für die menschliche Gesundheit (Chia et al. 2021).

Um die damit verbundenen Risiken bewerten zu können, müssen die Expositionskonzentrationen und -wege bekannt sein. Es existieren mehrere Studien zu Mikroplastikkonzentrationen in Trinkwasser, welches aus Grundwasser gewonnen wird. Die nachgewiesenen Konzentrationen sind sehr gering und werden auf den Abrieb von Kunststoffgeräten und Leitungen bei der Wasseraufbereitung oder den Transport zurückgeführt (Mintinig et al. 2019).

Durch die wenigen durchgeführten direkten, verschlossenen Grundwasserbeprobungen, bei denen eine nachträgliche Verschmutzung ausgeschlossen werden kann, konnte nachgewiesen werden, dass auch in tieferen Grundwasserschichten eine heterogene Verteilung von Mikroplastik vorliegt. Eine australische Studie fand im Durchschnitt 38 +/- 8 Mikroplastikpartikel pro Liter mit einem Durchmesser von 89 +/- 55 µm im Grundwasser (Samandra et al. 2021).

Im Iran wurden bei Beprobungen von Grundgewässern in einer semiariden Region im Durchschnitt 0,47 Mikroplastikpartikel pro Liter gefunden. Die Funde bestanden zu 70 % aus Fasern mit einer Länge < 500 µm. Diese Verteilung ist auf das poröse Gestein zurückzuführen, indem, je nach Niederschlagsmenge und Grundwassergeschwindigkeitsströmen, die Verweilzeit von Mikroplastik im Grundwasserleiter zwischen Jahren und Jahrzehnten betragen kann und damit eine eindeutige Identifizierung der Quelle und Wege erschwert wird (Esfandiari et al. 2022).

In China wurden vier verschlossene Bohrungen mit 12 Beprobungen durchgeführt. Dabei wurden in jeder Probe geringe Mengen von Mikroplastik nachgewiesen. Bei 93 % handelte es sich um Partikel, bei 6 % um Fasern und bei 1 % um Folien. Die Partikelgrößenverteilung lässt vermuten, dass in dem beprobten Gebiet nur Partikel mit einem Durchmesser unter 1,9 µm versickern können, da die Größeren von den Sedimenten gefiltert werden (Su et al. 2021).

Das Durchsickern durch Poren und Risse sowie die Wechselwirkung mit kolloidalen Aggregaten kann die Dynamik von Mikroplastik im Untergrund teilweise beeinflussen, was den Nachweis von Mikroplastik in Grundwassersystemen zu einer Herausforderung macht. Methoden zum Nachweis von Mikroplastik, die darauf abzielen, die kleineren Fragmente zu charakterisieren, sind notwendig, um den Verbleib dieser Schadstoffe in den Grundwasserleitern zu klären (Viaroli et al. 2022).

Die Ergebnisse einer Simulation, eine mit Regelgleichungen angepasste Finite-Elemente-Methode, deuten darauf hin, dass es notwendig ist, die Diffusionsfähigkeit von Mikroplastik zu verringern und

die Fließgeschwindigkeit des Wassers, die Porosität und den Bindungskoeffizienten erster Ordnung zu erhöhen, um diese Umweltgefahr wirksam einzudämmen. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich ableiten, dass eine Kombination aus niedrigem Diffusionsvermögen, hoher Fließgeschwindigkeit des Wassers und hoher Bodenporosität die Menge an Mikroplastik, die in das Grundwasser gelangt, verringern kann (Ryu et al. 2021).

Eine weitere Simulation, welche mit Hilfe von Vektorgleichungen und Diffusionsmodellen den Schadstofftransport von Mikroplastik untersucht, kommt zu dem Ergebnis, dass die Konzentration des Mikroplastiks in Grundwasserleitern keinen wesentlichen Einfluss auf die Mobilität organischer Schadstoffe besitzt (Castan et al. 2021).

Die wenigen praktischen Untersuchungen konnten zwar Mikroplastik im Grundwasser nachweisen, jedoch nur in geringen Mengen. Aktuell wird davon ausgegangen, dass die Sedimente, mit ihrer guten Filterwirkung, das Mikroplastik zurückhalten und sich das Meiste in den oberen Bodenschichten akkumuliert, bzw. erst in mehreren Jahren im Grundwasser ankommen wird. Zudem ist bisher kein Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Kunststoffrasenflächen und Belastungen des Grundwassers durch Bodenschichten erkennbar.

2.3.3 Austräge in die Luft

Es ist zu erwarten, dass es auch einen Austrag aus Kunststoffrasensystemen in die Luft gibt. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Staubpartikel mit einem Durchmesser von kleiner als 10 Mikrometer (Liebmann 2015). Mikroplastikfunde in Gebieten, die vom Menschen zum größten Teil unberührt sind, wie beispielsweise die Arktis oder Mangrovenwälder bestätigen diese Vermutung vom Mikroplastiktransport über die Luft (Miklos et al. 2016). Rischmüller (2022) untersuchte unter anderem das Partikeltransportverhalten über die Luft. Für die Untersuchung wurden organische und synthetische Füllstoffe im Windkanal und einer Modellfläche im Freiland auf Transportverhalten bzw. Austragsverhalten untersucht. Die Untersuchungen im Windkanal ergaben, dass Barrieren die Ablösegeschwindigkeit erhöhen. Für die Einzelnen Füllstoffe konnten folgende Ablösegeschwindigkeiten auf glatter Oberfläche ermittelt werden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Mittelwerte der Ablösegeschwindigkeit von Füllstoffen auf glatter Oberfläche (Rischmüller 2022)

Füllstoff	Ablösegeschwindigkeit (m/s)
Kork > 2 mm	1,86
Kork 0,5 – 1 mm	2,50
EPDM > 2 mm	5,06
EPDM 0,5 – 1 mm	4,54
Styroporkugeln > 2 mm	0,82

Die Modellfläche im Freiland blieb nach dreimonatiger Beobachtung nahezu unverändert, obwohl starker Sturm, Schneefall und hohe Niederschlagsmengen aufgezeichnet wurden. Es konnten nur vereinzelt Füllstoffe in einer Distanz von 34 cm bis 40 cm von der Testfläche entfernt vorgefunden werden (Rischmüller 2022).

2.4 Gesundheitliche Risiken von Kunststoffrasensystemen

Naturrasenplätze und Kunststoffrasenplätze weisen bei der Untersuchung der mikrobiologischen Ökosysteme signifikante Unterschiede auf. Bei synthetischen Kunststoffrasenspielfeldern wird die Mikrobiota aus anthropogenen und ökologischen Umweltquellen gebildet. Der Naturrasen hingegen beherbergt eine bodenbezogene mikrobielle Gemeinschaft (Valeriani et al. 2019).

2.4.1 Multiresistente Keime – MRSA-Erreger

Bei Kunststoffrasenplätzen wird der Erreger *Staphylococcus* festgestellt, welcher als multiresistenter Keim gegen die meisten Antibiotika resistent ist und gerade bei immunsystemgeschwächten Personen zu Wundinfektionen und Sepsis führen kann (Deutsches Zentrum für Infektionsforschung (DZIF) o. J.). Hierbei wird auch von Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA)-Erregern gesprochen. MRSA-Bakterien sind Keime, die sich an der Haut und an den Schleimhäuten ansiedeln. MRSA-Bakterien haben gegen die meisten Antibiotika Resistenzen ausgebildet. Daher sind sie meist nur schwer zu behandeln. Bei einem gesunden Immunsystem verläuft eine Infektion aber in den meisten Fällen harmlos. Gefährlich sind MRSA-Bakterien insbesondere für ältere und immungeschwächte Patientinnen und Patienten (Dissemond et al. 2002).

Hornei et al. (2009) untersuchten Kunststoffrasenplätze und Naturrasenplätze auf Erreger von *Staphylococcus aureus* und andere Mikroorganismen aus der Hautflora. Hierfür wurden Abstriche und Abklatsche von vier Kunststoffrasenspielfeldern und einem Naturrasenspielfeld gezogen. Die Erreger wurden ihrer typischen Herkunft zugewiesen und zusammengefasst. *Staphylococcus aureus* wurde einmal auf einem Kunststoffrasenplatz nachgewiesen. Auch konnten auf Kunststoffrasenplätzen lebensfähige pathogene Mikroorganismen der Haut- und Schleimhautflora nachgewiesen werden. Auf Naturrasen wurden dagegen Enterokokken nachgewiesen, welche auf Tiere wie Kaninchen oder Mäuse zurückzuführen sind und es wurden häufiger Feuchtkeime nachgewiesen. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Kunststoffrasen und Naturrasen festgestellt werden (vgl. Abbildung 3).

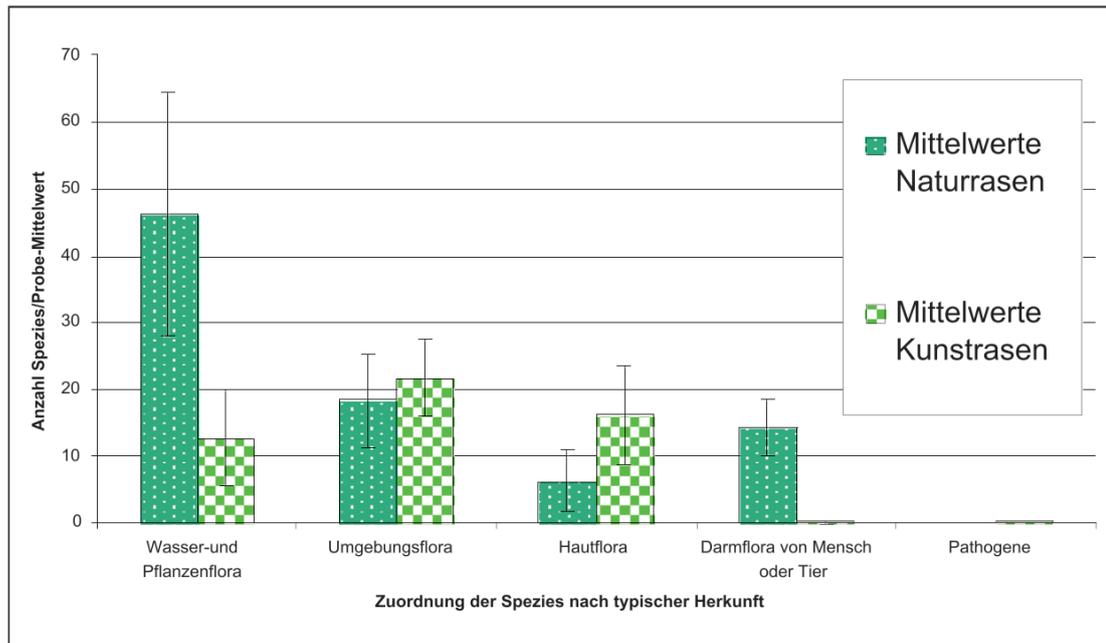


Abbildung 3: Vergleich der Erregergruppen auf Sportrasen und Kunststoffrasen (Hornei et al. 2009)

2.4.2 Bedeutung von MRSA-Erreger auf Kunststoffrasenplätzen

Bass und Hintze (2013) weisen auf ein erhöhtes Infektionsrisiko auf Kunststoffrasenplätzen hin, welches durch Schürfwunden und den damit entstehenden Eintrittswunden auftritt. Über diese Eintrittswunde können beispielsweise Erreger wie der *Staphylococcus aureus* in die Wunde eindringen. Die Ergebnisse von Bass und Hintze (2013) zeigen eine deutlich höhere Anzahl an Erregern bei den Plätzen, die sechs Jahre alt sind. Das lässt darauf schließen, dass sich mikrobielle Erreger im Füllstoff anreichern. Die Messpunkte an der Seitenlinie weisen die höchste mikrobielle Belastung auf. Als möglichen Grund für den Anstieg mikrobieller Erreger bei zunehmendem Platzalter nennen Bass und Hintze mangelnde Pflege. Waninger et al. (2011) kommen zu der Schlussfolgerung, dass die Überlebensrate von MRSA in starker Verbindung mit der Nährstoffversorgung steht. Ohne Nährstoffquelle betrug die nachgewiesene Überlebensdauer weniger als ein Tag. Ein Überleben von MRSA-Erregern ist für eine Woche auf Kunststoffrasensystemen möglich, mit dem Rückgang der koloniebildenden Einheiten von $\sim 5 \times 10^7$ auf $\sim 5 \times 10^5$. Eine geringe Anzahl wird auch bis zu einem Monat auf der Fläche überleben können.

Hardbarger (2012) kommt durch eine vergleichende Untersuchung zwischen Feldversuchen und Laborversuchen zu dem Ergebnis, dass Oberflächentemperatur, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Sonneneinstrahlung einen direkten Einfluss auf das Überleben von MRSA-Erregern auf den jeweiligen Kunststoffrasenflächen hat.

In der Arbeit von Keller et al. (2020) wird nicht das Kunststoffrasensystem im Ganzen betrachtet, sondern die einzelnen Komponenten. Es wurden sechs Füllstofftypen und drei Fasertypen jeweils

mit MRSA-Erregern infiziert. Durchschnittlich überlebten auf Kunststoffrasenfasern die Erreger 24 Stunden und auf Füllstoffen 96 Stunden. Tabelle 3 listet die unterschiedlichen Füllstoffe und Fasertypen mit der jeweiligen Überlebensdauer und Prozentzahl der Erreger auf.

Tabelle 3: Durchschnittliche MRSA-Nachweisbarkeit der unterschiedlichen Faser- und Füllstofftypen (Keller et al. 2020, verändert)

	Allgemeine Verfügbarkeit in h	Nachweisbar nach 2 h in %
Füllstoffe		
Kryogenes ELT	96	9
Umgebungs ELT	96	84
TPE	96	84
EPDM	24	35
PU beschichteter Sand	48	100
PU beschichtete ELT	24	57
Organischer Füllstoff	96	73
Sand	96	100
Fasertypen		
Nylon	<24	82
Geschnittene Folie	<24	76
Monofilament	24	69

Kazakova et al. (2005) zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit sich mit MRSA zu infizieren in den Hygienräumen oder Spielerkabinen höher ist als auf einem Kunststoffrasenplatz. Zu diesem Ergebnis kommen Kazakova et al. (2005) nach der Analyse von 84 Abstrichen von Profifootballspielern und relativiert die Gefahr einer MRSA-Infektion auf Kunststoffrasenflächen.

2.4.3 Äußere Einflüsse auf MRSA-Erreger

McNitt et al. (2022) untersuchen Möglichkeiten, um die Anreicherung mikrobieller Erreger anhand von *Staphylococcus aureus* Erregern auf Sportflächen unter verschiedenen Umwelteinflüssen zu minimieren bzw. gänzlich zu vermeiden. Weniger als vier Prozent der Erreger von *Staphylococcus aureus* überleben unter nicht extremen Temperaturen und eingeschränkten Lichtverhältnissen 12 Tage lang. Mit dem Indikator der Bekämpfungsmittel wird die Überlebensrate der *Staphylococcus aureus* Erreger auf weniger als ein Prozent nach sechs Tagen reduziert. Die Bestrahlung mit UV-C Licht sorgt sowohl bei Kunststoffrasen als auch bei Naturrasen für eine wirksame Methode die Erreger zu bekämpfen. Auf Kunststoffrasenfasern wird eine höhere Anzahl an Erregern im Vergleich zum synthetischen Füllstoff festgestellt (McNitt et al. 2022). Bei der Behandlung der infizierten Flä-

chen mit herkömmlichem Flüssigwaschmittel werden 24 Stunden nach der Reinigung keine *Staphylococcus aureus* Erreger mehr festgestellt. Die Arbeit kommt zu dem Ergebnis, dass eine Kombination aus der Reinigung der Plätze mit Flüssigwaschmittel und UV-C Licht am effektivsten ist. Die Forschung deutete aber auch an, dass vermutlich schon eine kurze Dauer von mäßiger Sonnenlichtintensität im Freien genügen würde, um die *Staphylococcus aureus* Erreger abzutöten (McNitt et al. 2022).

2.4.4 Belastung natürlicher Füllstoffe

Heisterkamp et al. (2022) untersuchten drei verschiedenen Korkfüllstoffe auf ihre ökotoxische Wirkung im Algen-, Daphnien und Leuchtbakterientest. Bei allen drei Korkfüllstoffen wurden hohe Algentoxizitäten festgestellt. Lignine, Polysaccharide und Suberin sind die Hauptbestandteile von Kork. Kork besteht aber auch zu etwa 15 % aus extrahierbaren Bestandteilen wie beispielsweise Phenolen. Zu den nachgewiesenen Phenolen gehört unter anderem Gallussäure, welche laut ECHA-Registrierungsdossier eine hohe Algentoxizität mit sich bringt. Eluate aus Korkgranulat bringen sehr hohe TOC-Werte (Gesamter organischer Kohlenstoff) mit sich, was darauf schließen lässt, dass nur wenige Anteile chemisch-analytisch erfasst wurden. Es ist aber bekannt, dass durch Pflanzen ausgeschiedenen Phenole wie Ellagsäure, die in Konzentrationen bis zu 21 mg/l vorlag, oder Gallussäure oder Tanninsäure deutliche Algentoxizitäten ausgehen (Planas et al. 1981).

2.4.5 Empfehlungen für die Nutzerinnen und Nutzer

Wenn die Überlebensdauer der mikrobiologischen Erreger betrachtet wird, die bei 96 Stunden auf synthetischem Füllstoff und 24 Stunden auf Rasenfasern liegen (Keller et al. 2020), wäre eine Empfehlung von geringerer Frequentierung der Kunststoffrasenspielflächen zu treffen. Auch die Nutzung im Herbst und Winter, welche als Vorteil dem Kunststoffrasenplatz gegenüber dem Naturrasenplatz zu nennen ist, hemmt das Absterben von Erregern. Denn schon eine kurze Dauer mit mäßiger Sonnenlichtintensität kann den Bestand an Erregern drastisch reduzieren (McNitt et al. 2022). Aufgrund der längeren Überlebensdauer von Erregern auf Füllstoffen als auf Kunststofffasern (Keller et al. 2020) würden sich hier ungefüllte Systeme empfehlen. Wie McNitt et al. (2022) beschreiben, ist eine regelmäßige Reinigung des Kunststoffrasensystems am effektivsten, um Erreger nachhaltig aus den Systemen fernzuhalten und eine Infektion der Sportlerinnen und Sportler zu verhindern. Um die Anreicherung mikrobieller Erreger auf Kunststoffrasensystemen zusätzlich zu verhindern, sollten die Sportlerinnen und Sportler Präventivmaßnahmen treffen. Dazu gehört unter anderem das Abdecken von Wunden und das Einhalten allgemeiner Hygienestandards, um die Übertragungswege unter den Sportlern und Sportlerinnen zu verhindern (Kirkland und Adams 2008).

2.4.6 Potentiell gefährliche Stoffe im Fasermaterial

Auch im Fasermaterial können giftige Substanzen vorhanden sein. Dabei besitzen Thermoplaste (Material der Fasern) im Vergleich zu Elastomeren (Material der synthetischen Füllstoffe) deutlich weniger Additive. So werden bei der Herstellung keine Weichmacher, Vernetzer, Aktivierer und Verzögerer benötigt (Bauer et al. 2013).

Mögliche gesundheitlich bedenkliche Stoffe können zum Beispiel Antioxidantien (häufig auf Phenolbasis) oder Flammschutzmittel, die Brom enthalten, sein. Als Farbmittel werden Metall-Oxide verwendet. In Abbildung 4 ist ein Überblick der üblichen Metalle und deren Konzentrationen zur Einfärbung der Garne aufgelistet (Vineyard et al. 2018).

Eine Pilotuntersuchung konnte, mit einer Extraktionsmethode mit Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung, per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) und Fluortelomeralkohole (FTOH), welche für Mensch und Umwelt schädlich sein können, in Fasermaterialien nachweisen (Zuccaro et al. 2023; Naim 2020).

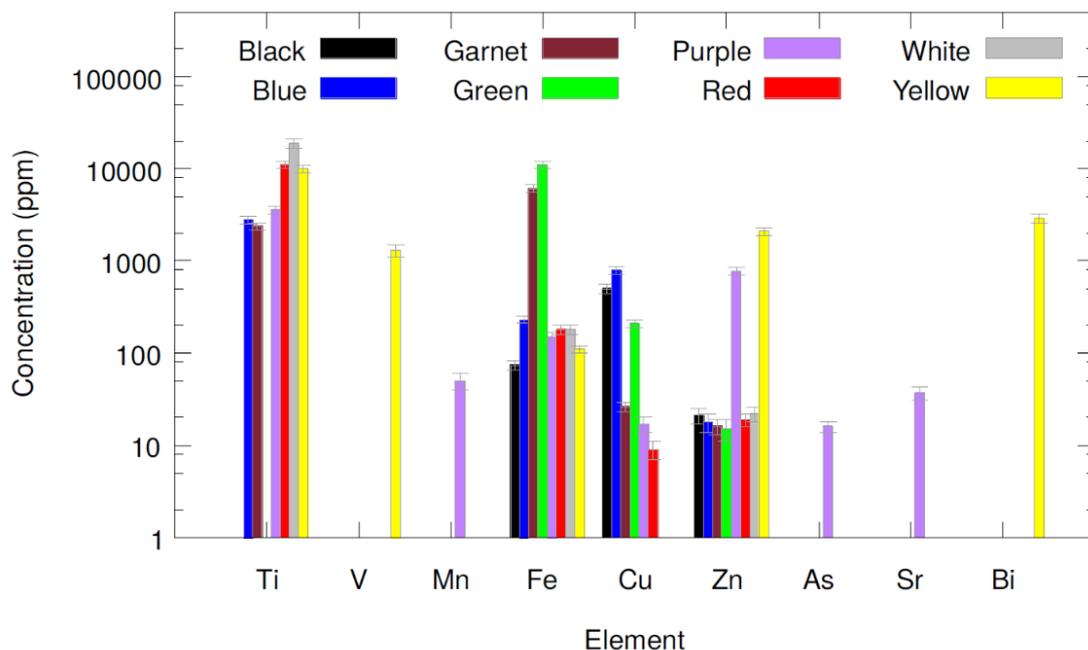


Abbildung 4: Verwendete Metalle als Farbmittel für Kunststoffrasengarnen (Vineyard et al. 2018)

2.4.7 Deklaration der Inhaltsstoffe (eigene Untersuchung)

Es wurden im Rahmen dieses Projektes exemplarisch zwei aktuell typische Fasermaterialien an der Hochschule Osnabrück untersucht. Zur Identifizierung des Materials wurde nach ISO 19702:2015-08 eine Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FT-IR) durchgeführt (vgl. Abbildung 5). Dabei wurde das untersuchte Material eindeutig als Polyethylen (PE) identifiziert. Zur Bestimmung des Reinheitsgrades des Materials wurde zusätzlich eine Thermogravimetrische Analyse nach DIN

51006:2005-07 durchgeführt (vgl. Abbildung 6). Der große Sprung bei 505 °C von 97 % lässt auf einen hohen Reinheitsgrad schließen. Es liegt kein Blockcopolymer vor. Die restlichen 3 %, bei denen es sich nicht um PE handelt, setzten sich aus nicht identifizierten Additiven, wie zum Beispiel Farbstoffen und Stabilisatoren, zusammen. Des Weiteren wurde mit Hilfe der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) und einer Elektronenabsorptionsspektroskopie (auch UV/VIS genannt) probiert, weitere Additive wie Stabilisatoren und Alterungsschutzmittel zu identifizieren (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Analyse der Stabilisatoren und anderer Additive über HPLC und UV/VIS von 4 exemplarischen Fasern

Probennummer	Analyse über HPLC (ISO 15033:2018-06)	Analyse über UV-VIS (ISO 10640:2011-08)
1	Noch unbekannte Peaks	Keine Analyse möglich
2	0,10 % Irganox 1010 0,13 % Irgafos 168at 0,18 % Irganox 1076 0,08 % Irgafos 168	Kein Chimassorb 944 oder 2020 (beides HALS)
3	0,10 % Irganox 1010 0,10 % Irgafos 168at 0,19 % Irganox 1076 0,06 % Irgafos 168	Kein Chimassorb 944 oder 2020 (beides HALS)
4	0,13 % Irgafos 168at	Kein Chimassorb 944 oder 2020 (beides HALS)

Bei der ersten Faserprobe konnten keine bekannten Stoffe identifiziert werden. Die zweite und dritte Faserprobe enthielt eine Mischung aus mehreren bekannten Stabilisierungssystemen (primäre und sekundäre Antioxidationsmittel, Thermostabilisatoren, Langzeitstabilisatoren und Verarbeitungstabilisatoren). Bei den Faserproben zwei, drei und vier konnte eine identische Kombination von Amin-Lichtstabilisatoren (HALS - Hindered amine light stabilizers) identifiziert werden. Dabei handelt es sich um chemische Verbindungen mit funktionellen Aminogruppen. Diese Verbindungen sind typischerweise Derivate von Tetramethylpiperidin und werden hauptsächlich zum Schutz der Polymere vor den Auswirkungen der Photooxidation verwendet (Bonnet 2014). Bei der Probe Nummer vier ist auffällig, dass ein geringerer prozentualer Anteil an Stabilisatoren über die HPLC nachgewiesen werden konnte.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen beispielhaft eine Untersuchung nach ISO 19702:2015-08 und eine thermogravimetrische Analyse nach DIN 51006:2005-07.

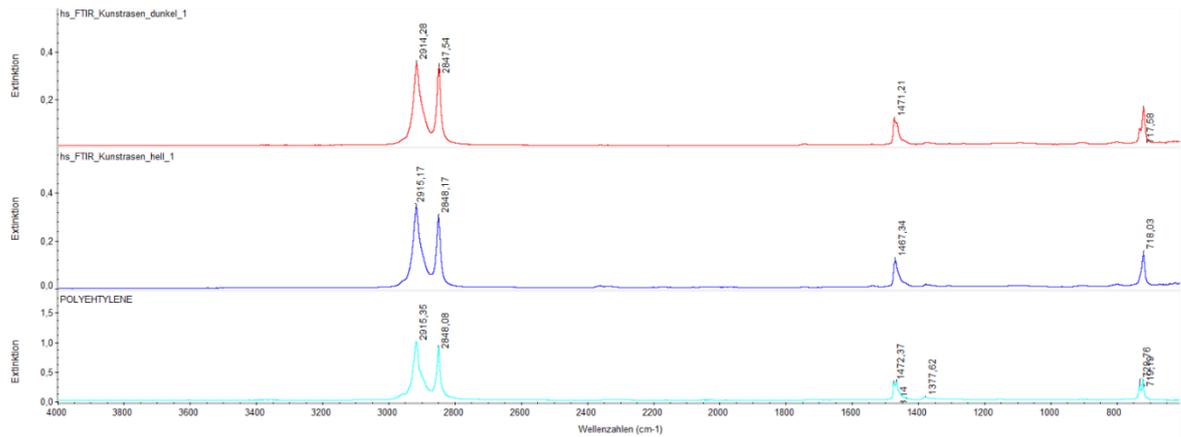


Abbildung 5: Beispiel einer FT-IR Untersuchung nach ISO 19702:2015-08 zwei exemplarischer Fasern, eigene Untersuchung

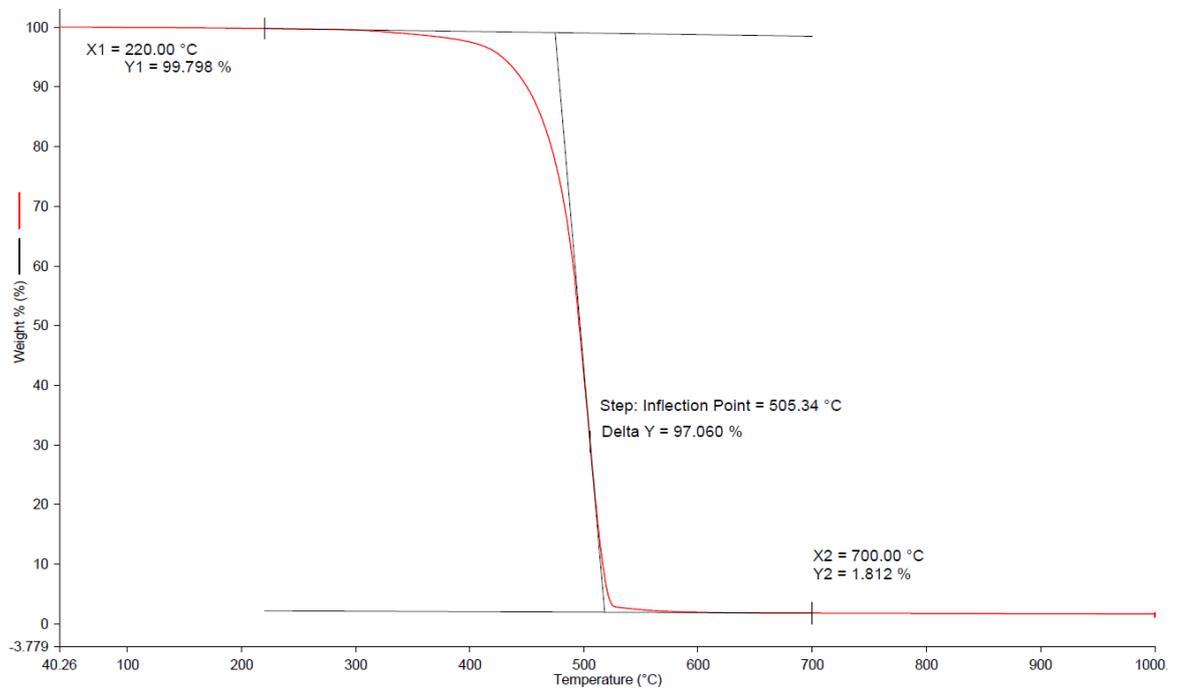


Abbildung 6: Thermogravimetrische Analyse nach DIN 51006:2005-07 einer exemplarischen Faser, eigene Untersuchung

Für eine Einschätzung der Toxizität des Fasermaterials, sowie zur Sicherstellung der Materialqualität, ist eine Deklaration aller Subkomponenten nötig. Mit Hilfe detaillierter Angaben zu Material und Materialzusammensetzung können Produkte hinsichtlich ihrer Risiken für Mensch und Umwelt bewertet werden sowie eine Einschätzung über die Materialanglebigkeit getroffen werden. Des Weiteren helfen diese Angaben bei der späteren Wiederverwertung des Materials (s. Kapitel 8.4). Die Bewertung und Kennzeichnung zu relevanten Stoffen würde entsprechend der verwendeten Datenbanken und Stofflisten erfolgen. In der folgenden Tabelle 5 ist eine Auswahl von Datenbanken für die Materialdeklaration aufgelistet.

Tabelle 5: Datenbanken und Stofflisten als Vorbild für eine Deklaration

RoHS	Restriction of Hazardous Substances	EU-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe
ELV	End of Live of Vehicle	EU-Richtlinie zur stofflichen Verwertung
REACH	Registration Evaluation Authorization of Chemicals	EU-Chemikalien-VO für die Registrierung, Bewertung Zulassung und Beschränkung
SVHC	Substance of Very High Concern	Bezeichnung für umweltrelevante Stoffe gem. Festlegung Anhang XIV in REACH. Einstufung als SVHC kann die Verfügbarkeit von darauf beruhenden Zubereitungen oder Materialien erschweren
GADSL	Global Automotive Declarable Substance List	Die GADSL ist eine Auflistung von deklarationspflichtigen Stoffen mit möglicher Verwendung in der Automobilindustrie
DIN EN IEC 62474	Materialdeklaration für Produkte aus der elektrotechnischen Industrie	Spezifiziert das Verfahren, den Inhalt und die Form bezüglich der Erstellung von Materialdeklarationen für Produkte von Unternehmen

2.5 Synthetische Füllstoffe

2.5.1 Altreifen (ELT – End-of-Life-Tyres)

Neben den elastischen Tragschichten, den Elastikschichten und den Kunststoffrasenfasern sorgt der Füllstoff für die sport- und schutzfunktionellen Eigenschaften eines Kunststoffrasensystems. Er stellt sicher, dass das Spielfeld ähnliche Eigenschaften wie herkömmliche Sportrasenflächen aufweist. In Europa werden hauptsächlich synthetische Füllstoffe aus zerkleinerten Altreifen (End-of-Life-Tyres (ELT)) verwendet (FLL 2014; Simon 2010). In vielen Studien werden ELT-Granulate irreführenderweise als Styrol-Butadien-Rubber (SBR) bezeichnet. Ein Altreifen-Gemisch besteht aus bis zu 25 unterschiedlichen Materialien, unter anderem zählt SBR dazu (Röthemeyer und Sommer 2013).

Die Menge des benötigten Füllstoffes hängt stark von der Bauweise des Kunststoffrasenplatzes ab. So wird bei der Bauweise nach DIN 18035-7:2019-12 weniger Füllstoff benötigt als bei der Bauweise nach DIN EN 15330-1:2013-12. Dies liegt an dem Vorhandensein einer elastischen Tragschicht, so dass weniger Füllstoff benötigt wird, um den geforderten Kraftabbau zu erfüllen. Andere Faktoren, wie die Höhe und Faserdichte der Polschicht und die Art der Faser, ob glatt oder texturiert, haben ebenfalls Einfluss auf die Füllstoffmenge.

Für die Herstellung von Gummigranulaten als Füllstoff können 21 % der anfallenden Altreifen (etwa 600 Millionen kg/Jahr) in Europa verarbeitet werden. Durch die Weiternutzung des Materials als starkes Downcycling-Produkt kann, im Vergleich zur Verwendung von neuwertigen Füllstoffgranulaten, ein CO₂-Ausstoß vermieden werden, welcher mit der Menge vergleichbar ist, die von ca. 30 km² Wald absorbiert werden könnte (Verschoor et al. 2021).

Aus wirtschaftlichen Gründen und aus Sicht der Weiterverwendung des Materials von Altreifen im Sinne eines starken Downcycling ist die Verwendung von ELT-Granulat für Kunststoffrasen durchaus

sinnvoll (Graça et al. 2022). Sofern entsprechende Grenzwerte z. B. aus der Bundesbodenschutzverordnung eingehalten werden.

2.5.2 Gesundheitliche Risiken von ELT

Es existieren bereits seit den 1990er Jahren Bedenken über die Auswirkungen der Verwendung von ELT-Granulat auf Sport- und Freizeitflächen auf die menschliche Gesundheit sowie auf die Umwelt (Harper 2015). Die ELT-Granulate können aufgrund des Vorhandenseins von Vulkanisationskatalysatoren, Stabilisatoren und anderen Zusatzstoffen organische und anorganische Schadstoffe enthalten (Kalbe et al. 2013; Krüger et al. 2012). Potenziellen Risiken für die Nutzerrinnen und Nutzer bestehen durch gefährliche Stoffe wie Metalle, flüchtige organische Verbindungen sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Phthalate (Weichmacher). Einige Stoffe sind nachweislich krebserregend, andere können endokrine Störungen verursachen und Auswirkungen auf die Fortpflanzung haben (Watterson 2017).

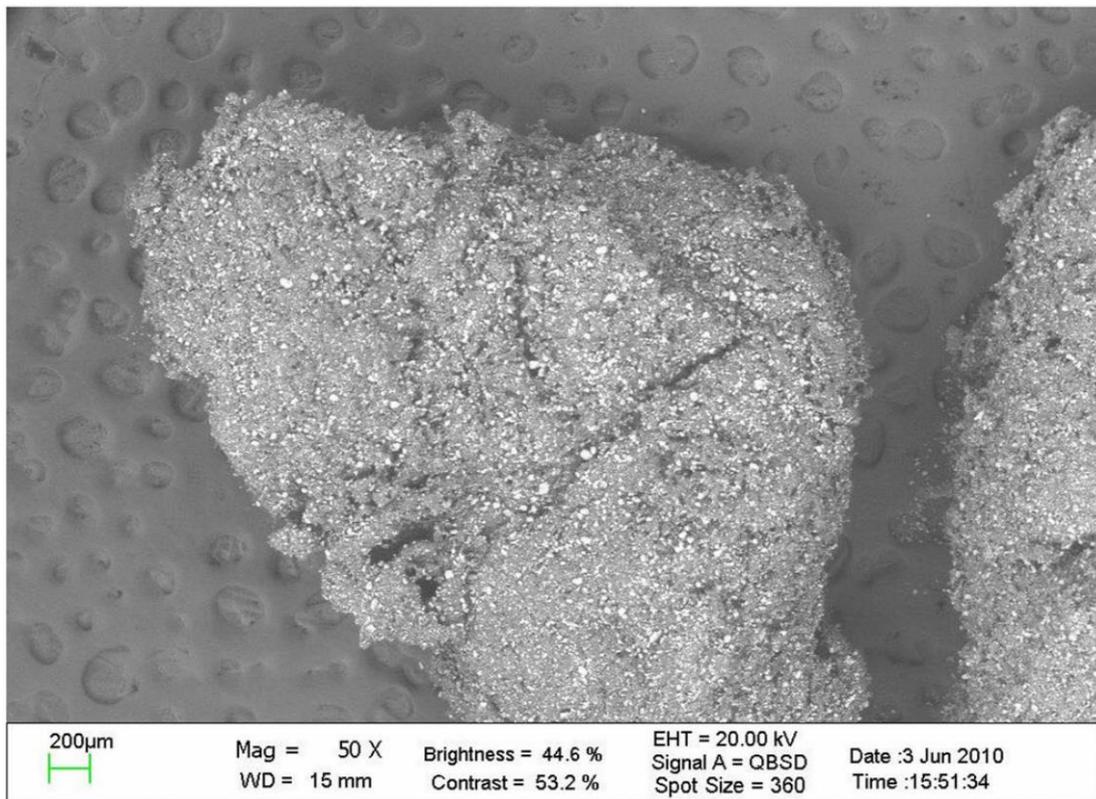


Abbildung 7: Mikroskopische Aufnahme eines ELT-Granulats mit Hilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskops. Deutlich zu erkennen sind zahlreiche Einschlüsse und Verunreinigungen (Canepari et al. 2018)

Potenziell gefährliche organische Verbindungen sowie Schwermetalle können sich über die Luft verflüchtigen und über Regenwasser zu Verunreinigungen in den Platzabläufen und im Grundwasser führen (Cheng et al. 2014). Vor allem die besorgniserregenden metallischen Giftstoffe werden

als sehr mobil eingestuft und können leicht vom menschlichen Körper und der Umwelt aufgenommen werden (Vineyard et al. 2018). Neben den metallischen Giftstoffen wurden problematische synthetische Stoffe gefunden. Unter anderem konnten PAK, Benzothiazol, 2-Hydrxybenzothiazol, tert-Butylamin, Cyclohexylamin, Anilin, Bisphenol A, Methylisobutylketon, 6PPD, DPG und 4-tert-Octylphenol nachgewiesen werden (Schneider et al. 2020c). Aufgrund der unterschiedlichen Mess- und Mobilitätsmethodik lassen sich die Studien schwer vergleichen und zusammenfassen (Cheng et al. 2014). Des Weiteren bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der vollständigen Erfassung aller relevanten Stoffe und deren Bioverfügbarkeit (Schneider et al. 2020b). So konnten Donald et al. (2019) mit Hilfe eines Passivsammlers und einem gezielt angelegten Screening auf 1530 Chemikalien das Vorhandensein von 25 Chemikalien nachweisen. ELT-Granulat ist nicht inert und es ist keine Hochtemperatur- oder Lösemittelextraktion erforderlich, um Metalle und halbflüchtige organische Verbindungen freizusetzen (Celeiro et al. 2018). Die Freisetzung von luftgetragenen Chemikalien und Staub ist nach den vorliegenden Informationen gut belegt und kann zu akuten chronischen Reizungen der Augen, Lunge und Haut führen (Brown 2007). Über die Auswirkungen auf die Nieren, das endokrine System, das Nervensystem, das Immunsystem, das Herz-Kreislauf-System und das Potential zur Auslösung von Krebserkrankungen existieren immer noch Datenlücken. Es ist anzunehmen, dass der Mensch bei der Nutzung von Kunststoffrasenplätzen freiwerdenden Chemikalien ausgesetzt ist. Daher stellen ELT-Granulate eine chemische Belastung für Mensch und Umwelt dar (Celeiro et al. 2018). Gesundheitsbewertungen, welche auf ein minimales Risiko hindeuten sind für Spiel- und Sportplätze möglicherweise nicht geeignet (Brown 2007; Celeiro et al. 2018).

Die gemessenen Expositionen potenziell gefährlicher Stoffe liegen im Allgemeinen jedoch meistens unterhalb der von der EU festgelegten Grenzwerte und halten die Prüfwerte der Bundes-Bodenschutz- und der Altlastverordnung ein, sodass kein erhöhtes gesundheitliches Risiko bei der Verwendung von Kunststoffrasen mit ELT-Füllstoff festgestellt wurde (Schneider et al. 2020a; Kuck und Neto 2020; Cheng et al. 2014). Bei dieser Einschätzung muss darauf hingewiesen werden, dass eine Reihe von Industrie-finanzierten Studien zur Gesundheitsgefahr von ELT-Granulaten existieren, welche die Gefährdung herunterspielen (Alderman et al. 2017).

Die Menge der freiwerdenden Stoffe ist nicht konstant. So kommt es infolge der Alterung von ELT zum Beispiel zu einer verstärkten Zinkauswaschung. In einem niederländischen Szenario würde so der Grenzwert für Zink nach elf Jahren überschritten werden. Auch die Verwendung von Salzen, je nach Menge und Art (sauer oder alkalisch) hat Auswirkung auf die Auswaschung chemischer Stoffe in Böden und Gewässer (Nilsson et al. 2008).

Neben der steigenden Mobilität der Giftstoffe durch die Alterung von ELT kann bei neu installierten Systemen ein „First-Flush-Effekt“ beobachtet werden. Dabei werden durch die Fertigung und Mon-

tage freigewordene Giftstoffe während der ersten Nutzungszeit freigesetzt. Die Mobilität wird zusätzlich von umfassenden Faktoren wie den Oberflächenmaterialien, Niederschlagsereignissen und Schadstoffcharakteren beeinflusst (Zhang et al. 2021).

Über entwickelte Expositionsszenarien, welche die Exposition von Amateurfußballspielern und -spielerinnen gegenüber den gefährlichsten Stoffen in ELT-Granulat über den oralen, dermalen und inhalativen Weg abschätzen, konnte kein erhöhtes Gesundheitsrisiko, welches über das vernachlässigbare Krebsrisiko von eins zu einer Million hinausgeht, festgestellt werden. Es konnten jedoch signifikante Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen in Bezug auf die orale Exposition festgestellt werden. Da die Mundaktivität und das „Mündeln“ von kleinen Kindern (1 – 6 Jahre) deutlich stärker zu bewerten ist, muss die mittlere zufällige Aufnahme höher geschätzt werden und kann dabei die maximale Tagesdosis überschreiten. In Abbildung 8 ist die geschätzte tägliche Dosis Blei, welche Kinder während eines Fußballtrainings über ELT-Granulat aufnehmen, im Vergleich zu älteren Kindern und der empfohlenen maximalen Tagesdosis aufgezeigt (Lopez-Galvez et al. 2022; Pronk et al. 2020).

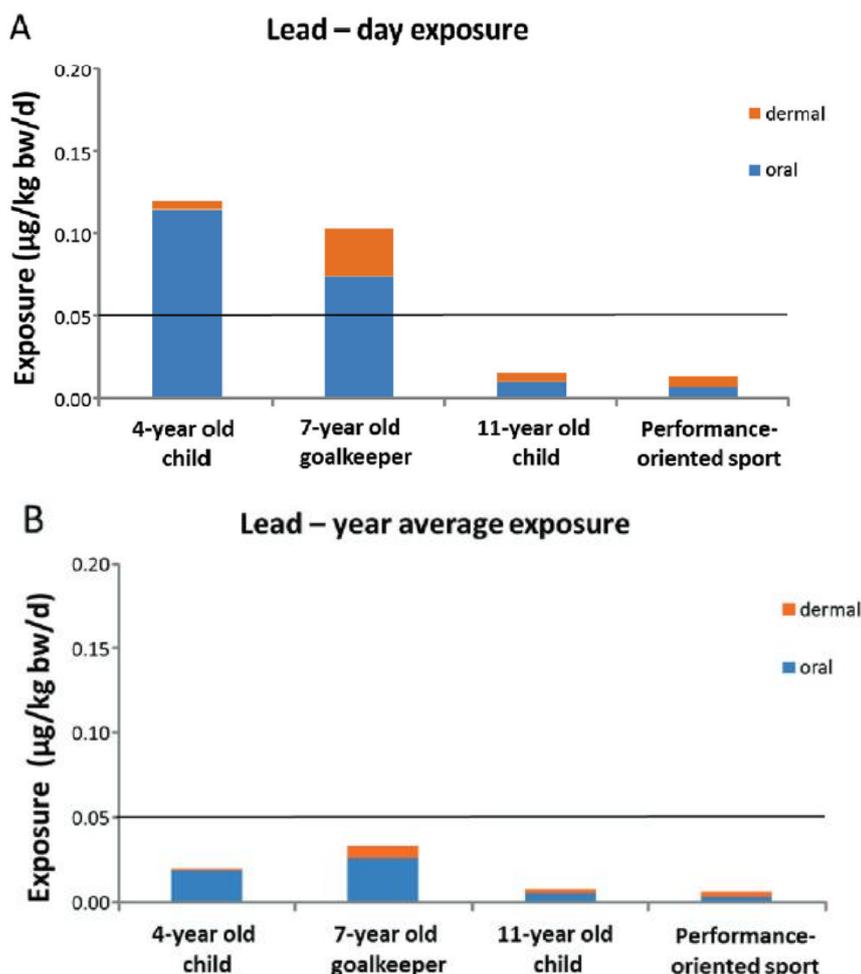


Abbildung 8: Vergleich der geschätzten Blei-Exposition während einer Trainingseinheit zwischen Kindern und Erwachsenen in Relation zur maximale zulässigen Tages- und Jahresdosis (Pronk et al. 2020)

2.5.3 Weitere synthetische Füllstoffe

Als Reaktion auf die gesundheitlichen Bedenken der in ELT-Granulate enthaltenen giftigen Stoffe wurde eine Vielzahl von alternativen synthetischen Füllstoffen von Bauer et al. (2017) erprobt:

- Polyurethane (PU) ummantelte ELT-Granulaten,
- neues Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM),
- recyceltes EPDM,
- Thermoplastische Elastomere (TPE).

Weiteren Alternativen wurden von Harper (2015) getestet:

- geschredderte PET-Getränkeflaschen, Teppichböden, Schuhsohlen,
- recyceltes Polyethylen (R-PE),
- andere Abfälle.

In Hinblick auf die Inhaltsstoffe und deren Exposition scheint TPE als Füllstoffalternative keine ausreichende Sicherheit für die menschliche Gesundheit zu bieten, insbesondere vor dem Hintergrund, dass Kinder die am stärkste exponierte Bevölkerungsgruppe sind (Canepari et al. 2018). Unter den untersuchten alternativen synthetischen Füllstoffen wurde die höchste Konzentration an schädlichen organischen Substanzen in neuwertigem und recyceltem EPDM nachgewiesen (Magnusson und Mácsik 2017).

Massey et al. (2020) kommen zu dem Ergebnis, dass kein synthetischer Füllstoff eindeutig unbedenklich ist. Dabei wurden bei den meisten untersuchten Füllstoffproben einige der gleichen bedenklichen Chemikalien wie in ELT gefunden, jedoch möglicherweise in geringerer Anzahl und Menge. Alternative synthetische Füllstoffe können ökologisch und gesundheitlich daher nicht als unbedenklich eingestuft werden (Massey et al. 2020).

Van Kleunen et al. (2019) untersuchten die Auswirkung von Füllstoff-Verschmutzung auf das Wachstum von Gräsern. Dabei wurde ein mit 5 % EPDM-Anteil belasteter Boden im Einzugsgebiet eines Kunststoffrasenplatzes gewählt. Es konnte eine Wachstumsverringerung von über 50 % Biomasse im Vergleich zu einem vergleichbaren unbelasteten Boden beobachtet werden (vgl. Abbildung 9).

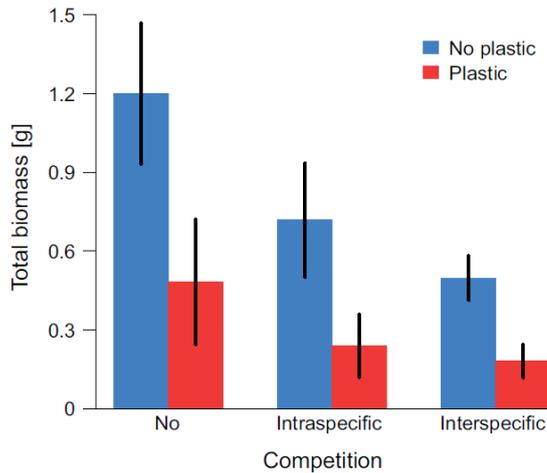


Abbildung 9: Messung der überirdischen Biomasse bei 5 % EPDM-Erdanteil, Ergebnis-Vergleich in g. (van Kleunen et al. 2019)

Es existieren große Unterschiede in den Regelansätzen der betroffenen Nationen zur Vermeidung der beschriebenen Risiken. Während fast alle Nationen die potentiellen Gesundheitsrisiken anerkennen, welche von Schwermetallen, PAK- und PFAS-Chemikalien ausgehen, haben nur sehr wenige Nationen angemessene Überwachungsmaßnahmen eingeführt, um diejenigen zu schützen, welche regelmäßig Kunststoffrasenfelder nutzen. Die Europäische Union hat zum Beispiel die Konzentration schädlicher PAK, PFAS und Schwermetalle begrenzt. In Deutschland werden Kunststoffrasensysteme mit synthetischen Füllstoffen in der Regel nicht mehr gefördert (vgl. Zuccaro et al. 2022).

2.6 Elastifizierende Schichten

Für die ganzheitliche Betrachtung der Kunststoffrasensysteme sind die elastifizierenden Schichten ebenfalls zu berücksichtigen. Die technischen Anforderungen werden in der DIN 18035-7:2019-12 gestellt. Sie werden zum einen in der Bauweise A als Elastikschicht und in der Bauweise B als ungebundene elastische Tragschicht gebaut. In RAL-GZ 944:2022-10 sind in Abschnitt 2 zusätzlich Güte- und Prüfbestimmungen festgelegt worden. Für in situ gefertigte Elastikschichten werden Gummigranulate mit einem Bindemittel vermischt, für elastische Tragschichten werden zusätzlich Gesteinskörner zugemischt. Als Bindemittel werden Polyurethan-basierte Einkomponentkleber bzw. Zweikomponentkleber eingesetzt (Bertling et al. 2021).

2.6.1 Temperatureinfluss

Petrass et al. (2014) untersuchten einen Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur von Kunststoffrasensystemen und der Verwendung von Elastikschichten. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Elastikschicht Auswirkung auf eine Erhöhung der Oberflächentemperatur hat. Eine Verbindung zwischen der Dicke von Faserbündeln und der Elastikschicht in Verbindung mit der Oberflächentemperatur konnte ebenfalls festgestellt werden. Die Studie nennt hier als mögliche Erklärung, dass durch den größeren Abstand der Fasern innerhalb der Faserbündel mehr Wärme durch die Elastikschicht abgegeben wird. Im Gegensatz dazu könnte eine fehlende Elastikschicht dafür sorgen, dass die Faserbündel die Wärme besser an den Boden ableiten können. Die Studie gibt an, dass die Ergebnisse erst durch detailliertere und mehrere Untersuchungen bestätigt werden können.

2.6.2 Verletzung

Elvidge et al. (2022) untersuchten Unterschiede der Knie- und Knöchelbiomechanik auf Kunststoffrasensystemen mit und ohne Elastikschicht. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Auswirkungen einer Elastikschicht auf die Belastung der unteren Extremitäten während einer 90°-Schrittbewegung begrenzt sind. Die Ergebnisse deuten aber auch darauf hin, dass der Kunststoffrasen mit dem Dämpfungselement mit zunehmender Geschwindigkeit mehr kinetische Energie absorbiert als der Kunststoffrasen allein. Die kritische Fallhöhe, die durch den Kopf-Verletzungs-Faktor bestimmt ist, wird ebenfalls durch die Elastikschicht signifikant beeinflusst (Twomey et al. 2011). McGhie und Ettema (2012) zeigen, dass eine Erhöhung der stoßabsorbierenden Eigenschaften des Kunststoffrasensystems zu einer verbesserten Aufpralldämpfung führt. Hierbei konnte eine Verringerung der Füllhöhe von synthetischem Füllstoff durch eine Elastikschicht bei gleichbleibenden stoßabsorbierenden Eigenschaften bestätigt werden. Allgeuer et al. (2008) untersuchten verschiedene Elastikschichten auf ihre Energieabsorption. PE-Schaumstoffe mit geringer Dichte scheinen nach der Studie nicht geeignet zu sein. Elastomere Schaumstoffe sind gegenüber plastomeren Schaumstoffen im Vorteil, da sie bei dünnerer Schicht eine gleiche Energieabsorption ermöglichen. Allgemein belegt die Studie auch, dass die Elastikschicht einen hohen Einfluss auf die Energieabsorption hat. Da für elastische Tragschichten und Elastikschichten unter anderem auch Altreifen verwendet werden, sind ähnliche Risiken zu erwarten wie bei der Verwendung als Füllstoff. Durch die Bindung der Stoffe in den elastifizierenden Schichten und den Schutz durch den Kunststoffrasenbelag, lassen sich die oben getroffenen Aussagen nicht unbesehen übertragen. Bisher sind elastifizierende Schichten nicht auf mögliche negative Auswirkungen untersucht worden.

3 Emission von primärem Mikroplastik durch Füllstoffe

3.1 Schätzung der Nachfüllmengen

Weijer et al. (2017) ermitteln eine Austragsmenge zwischen 120 kg und 460 kg pro Jahr. Es kann mit einem Austrag von 20 bis 50 % des jährlich eingebrachten Füllstoffes pro Jahr gerechnet werden. Weijer et al. (2017) geben an, dass die Werte nicht ganz aussagekräftig sind, da der eingebrachte Füllstoff nicht dem ausgetragenen Füllstoff entspricht.

Løkkegaard et al. (2019) vergleichen in ihrer Studie die Forschungsergebnisse aus Dänemark, Norwegen, Schweden und den Niederlanden. Dabei geht es um die Austragsmengen von Mikroplastik über den aquatischen Weg und die Verdichtung von Füllstoffen. Für die Betrachtung des Füllstoffverlustes wird die angegebene Menge an nachgefülltem Füllstoff als Bewertungsgrundlage gewählt. Abbildung 10 zeigt die unterschiedlichen Austragsmengen, welche durch Løkkegaard et al. (2019) zusammengefasst wurden.

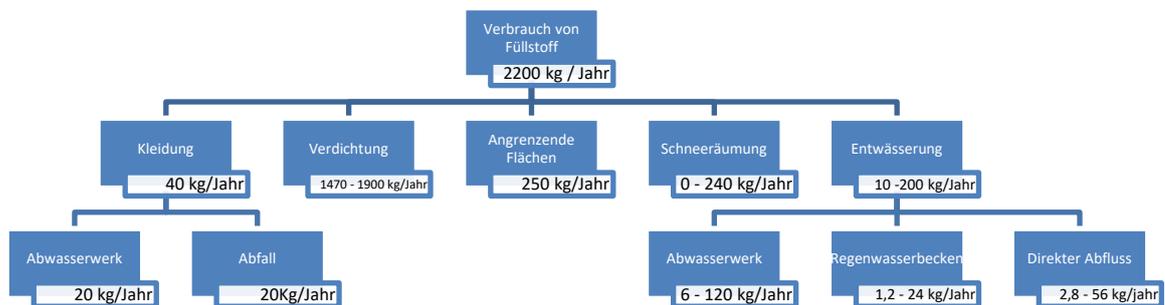


Abbildung 10: Füllstoffaustrag nach (Løkkegaard et al. 2019)

Kjær (2013 in Løkkegaard et al. 2019) und Lassen et al. (2015) geben Schätzungen des dänischen Fußballverbands als Nachfüllmenge an. Lindberg International (2018 in Lassen et al. 2020) hat für die Nachfüllmenge eine Umfrage bei 81 Vereinen mit insgesamt 89 Kunststoffrasenspielfeldern durchgeführt. Von diesen Kunststoffrasenspielfeldern sind 29 Felder nicht mit Füllstoff gebaut, aber in die gesamte Auswertung mit einbezogen. Die Befragungsstudie kommt auf eine durchschnittliche Nachfüllmenge von 2,2 Tonnen pro Jahr. Lindberg International (2018 in Lassen et al. 2020) gibt ebenfalls eine Menge an, welche durch die Befragung der drei größten Anbieter von Füllstoffen in Dänemark ermittelt wurde. Hier wird eine Zahl von 2,5 bis 5 Tonnen pro Jahr genannt, welche sich

aus Prognosen ergibt. Magnusson und Mácsik (2017) geben eine Menge von 2 bis 3 Tonnen jährlich an. Die Zahl wurde durch die Befragung lokaler Behörden ermittelt. Drei unterschiedliche Kunststoffrasenfelder wurden von Weijer et al. (2017) untersucht, welche eine breite Streuung zwischen 0 und 2,2 Tonnen pro Jahr aufwiesen. Løkkegaard et al. (2019) kommen zu dem Ergebnis, dass durch unterschiedliche Faktoren wie Instandhaltungskapazität, Witterungsverhältnisse, Nutzungsintensität und Platzalter eine konkrete Zahl in der Praxis nicht definierbar ist. Die Tabelle 6 stellt die unterschiedlichen Auffüllmengen aus den Quellen dar.

Tabelle 6: Nachfüllmenge an Füllstoff pro Jahr in kg

Quelle	Land	Feld / Alter	Material	Tiefstwert kg/Jahr	Durchschnitt kg/Jahr	Höchstwert kg/Jahr
Kjær (2013 in Løkkegaard et al. 2019) und Lassen et al. 2015	DK	Schätzung des Dänische Fußballverbands	ELT	3.000	4.000	5.000
Lindberg International (2018 in Lassen et al. 2020)	DK	Daten aus 89 Feldern	ELT		2.200	
Wallberg et al. (2016)	S	Ein 2 x 11 Spielfeld	EPDM	3.000	3.500	4.000
Magnusson und Mácsik 2017	S			2.000	2.500	3.000
Weijer et al. (2017)	NL	Rotterdam / 1 Jahr	ELT		580	
Weijer et al. (2017)	NL	Amsterdam / 9 Jahre	ELT		2.200	
Weijer et al. (2017)	NL	Hoogeveen / 10 Jahre	ELT		0	

Zur detaillierten Betrachtung der Nachfüllmenge muss die Verdichtung des Füllstoffes berücksichtigt werden. Løkkegaard et al. (2019) führen hierzu unterschiedliche Verdichtungsmessungen durch. Die Verdichtung eines Platzes nimmt um 12,7 % bei 50-maligem Walzen und 25,5 % bei 500-maligem Walzen zu. Diese Zahl ist allerdings stark von der Pflegeintensität und der Nutzung abhängig. Løkkegaard et al. (2019) geben eine Verdichtung von 1.460 kg/Jahr bis 1.900 kg/Jahr an.

3.2 Ermittlungen von Füllstoffverlusten

Meyer (2020) untersucht zehn Kunststoffrasensysteme auf denen zehn Probepunkte mit einer Fläche von 94,2 cm² definiert sind, wo der Füllstoff entnommen wird. Über ein Siebverfahren nach DIN

EN 933-1:2012-03 werden größere Füllstoffteile von Sand getrennt. Der Anteil von kleineren Füllstoffteilen und Abrieb wird mittels Glühverlust nach DIN 18128:2002-12 ermittelt. Durch die Methodik wird nicht unterschieden zwischen Faserabrieb und Füllstoffabrieb. Fünf der untersuchten Plätze sind neun Jahre alt und mit TPE verfüllt. Die weiteren fünf Plätze sind vier Jahre alt und mit EPDM verfüllt. Meyer (2020) kommt auf folgenden durchschnittlichen Mikroplastikaustrag:

- 1,622 t/Jahr bei neun Jahre alten Plätzen,
- 1,387 t/Jahr bei vier Jahre alten Plätzen.

Im Durchschnitt liegt der Mikroplastikaustrag bei 1,5 t/Jahr/Platz.

Die Abbildung 11 zeigt den ermittelten Austrag. Die Auswertung der Siebkornlinien kommt auf unterschiedliche Ergebnisse beim Verschleiß der Füllstoffe. EPDM hat nahezu keinen Verschleiß, TPE hingegen verliert 4,7 % des Größtkorns. Durch den Glühverlust nach DIN 18128:2002-12 können die genauen Korngrößen nicht bestimmt werden.

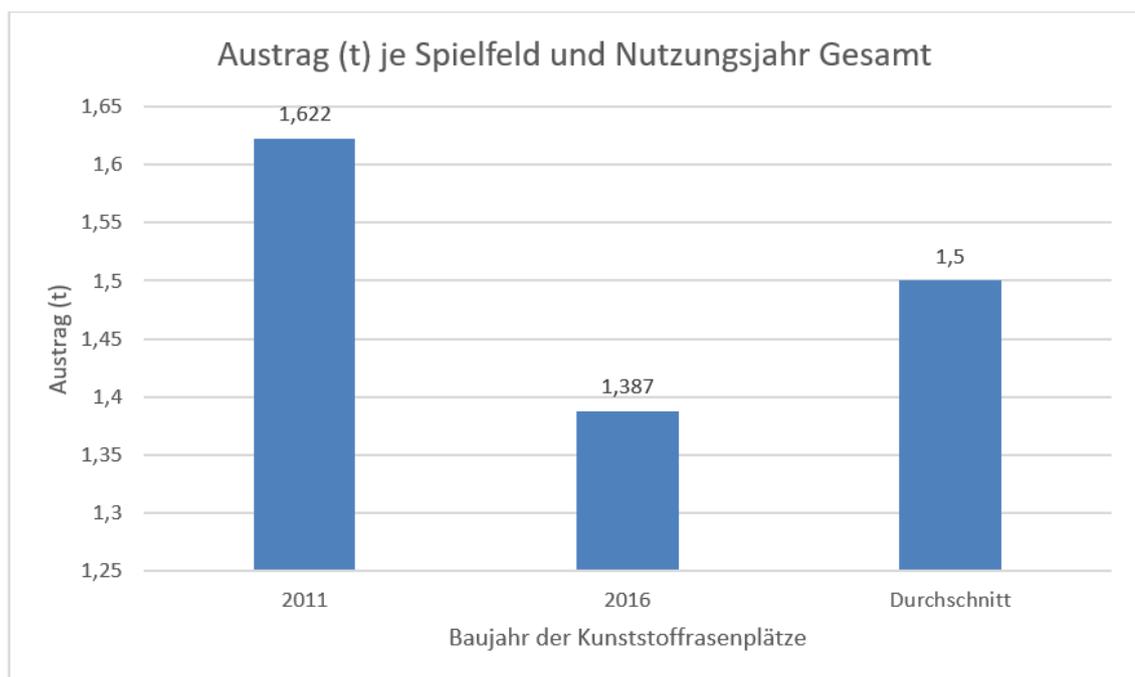


Abbildung 11: Austrag (t) je Spielfeld und Nutzungsjahr Gesamt (Meyer 2020)

Ein Austragsweg, der untersucht wird, ist der Austrag in anliegende Flächen, wie Wege und Rasenflächen. Weijer et al. (2017) führten hierzu Untersuchungen auf Plattenflächen mit einer Fläche von 1 m² durch. Rasenflächen wurden mit einer Breite von 0,5 m und Tiefe von 5 cm beprobt. Die ermittelte Austragsmenge ergab 260 bis 300 kg pro Jahr. Lindberg International (2018 in Lassen et al. 2020) gibt eine Schätzung von 250 kg pro Jahr an. Eine Forschungskampagne aus Norwegen führte eine Untersuchung von 592 Spielen auf 343 Feldern mit insgesamt 12.591 Spielerinnen und Spielern

durch (Norges Forskningsråd et al. 2017). Die Studie kommt auf ein Ergebnis von 40 kg pro Spielfeld und Jahr.

Ebenfalls gibt es einen Füllstoffverlust durch Schneeräumung, welcher in der Studie von Løkkegaard et al. (2019) untersucht wird. Hier gibt Wallberg (2016 in Løkkegaard et al. 2019) eine Menge zwischen 20 bis 30 Liter Füllstoff an, der durch Schneeräumung entfernt wird, teilweise aber auch wieder in das System zurückgeführt wird. Dies würde 11 % des gesamten Füllstoffverlustes ausmachen, unter der Berücksichtigung das 1/3 zurückgeführt und 2/3 entsorgt werden. Løkkegaard et al. (2019) nehmen einen Füllstoffverlust von 0 bis 11 % pro Jahr an.

Auch Lassen et al. (2015) betrachten die Mikroplastikemissionen in ganz Europa in den unterschiedlichen Branchen. Für die Austragsmengen, die durch Kunststoffrasensysteme entstehen, geben Lassen et al. (2015) Berechnungen aus Dänemark wieder. In Dänemark beläuft sich der Verbrauch von Gummigranulat auf 10.000 bis 15.000 t/Jahr. Es wird bei dieser Menge aber nicht ausschließlich der Verbrauch von Füllstoff für Kunststoffrasenplätzen berücksichtigt, sondern auch die Verwendung für Spielplätze und Leichtathletik. Lassen et al. (2015) sprechen von einer Lebensdauer für Kunststoffrasenplätzen von 10 Jahren. Unter Beachtung der Menge von Füllstoff pro Kunststoffrasenspielfeld, welche sich auf 100 bis 120 Tonnen beläuft, müssen jährlich 3 bis 5 Tonnen ersetzt werden. Ein Teil der Nachfüllmenge wird der Verdichtung des Füllstoffes zugeschrieben und der andere Teil dem Austrag von Füllstoffen aus dem Kunststoffrasenplatz in die Umwelt. Demnach schätzen Lassen et al. (2015) eine Austragsmenge von 1,5 bis 2,5 t/Jahr. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich um eine theoretische Schätzung handelt und die Austragsmenge nicht durch eine wissenschaftliche Versuchsmethodik zustande kommt. Bø et al. (2020) geben eine jährliche Nachfüllmenge vom synthetischen Füllstoff von 3,4 bis 6,4 Tonnen an, stellen diese Menge aber als unsicher dar. Die Mengen für den Füllstoffaustrag wurden durch die angegebenen Mengen beim Einbau und der am Ende der Lebenszeit angegebenen Mengen von einem Recyclingwerk bei der Entsorgung des Systems ermittelt. Die Menge beim Einbau wird von der Menge bei der Entsorgung subtrahiert und ergibt die Austragsmenge nach Bø et al. (2020).

Nachstehend werden alle Forschungsarbeiten mit den jeweils ermittelten Füllstoffausträgen zusammenfassend in Tabelle 7 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Plätze mit einer Größe von 7.600 m² angenommen.

Tabelle 7: Mengen Füllstoffaustrag

Quelle	Austrag (t/Jahr x Platz)	Region
Weijer et al. 2017	0,12 – 0,46	Niederlande
Løkkegaard et al. 2019	> 0,25	Dänemark
Meyer 2020	1 - 1,5	Deutschland
Hann et al. 2018	1,2 – 4,8	Europa
Lassen et al. 2015	1,5 – 2,5	Dänemark
Eunomia Research & Consulting Ltd 2017	1,5 - 12	Skandinavien
Magnusson und Mácsik 2017	2 – 3 / 2,3 – 3,9	Schweden
Bø et al. 2020	3,5 – 6,5	Norwegen
Rischmüller 2022	2,89	Deutschland

Die Studien zu Füllstoffausträgen sind teilweise kritisch zu betrachten. Viele Zahlen beruhen auf Schätzungen wie dies beispielsweise bei Hann et al. (2018) der Fall ist. So verweisen Hann et al. (2018) auf den stark schwankenden Austragsfaktor der Schneeräumung, der stark nach Region und Klimabedingungen variiert. Auch die Betrachtung der unterschiedlichen Instandhaltungsmaßnahmen, welche von Fleming et al. (2020) beschrieben werden, sind ein maßgeblicher Faktor, der in den Forschungen nur teilweise berücksichtigt wird, aber die Austragsmenge stark beeinflussen kann.

Durch bewusster Nutzung aber auch Anpassung der Instandhaltungsmaßnahmen sollen die Austragswege von Mikroplastik in die Umwelt verhindert bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Durch Verdichtung des Füllstoffes, der sowohl bei Quarzsand, synthetischen Füllstoffen und organischen Füllstoffen durch die Nutzung und Instandhaltung eintritt, ist eine optische Reduzierung der Füllhöhe zu erkennen. Durch Auflockerung des Füllstoffes kann diese Verdichtung aber aufgehoben werden und somit eine Nachfüllung von Füllstoff überflüssig machen. Der Arbeitskreis „Kunststoffe im Landschaftsbau“ der FLL gibt in diesem Zusammenhang beispielsweise an, dass bei einer Verdichtung von 0,1 bis 1 mm ein Nachfüllen von 2,5 bis 5 t für einen gesamten Platz nötig wäre. Diese Nachfüllmenge würde durch eine Auflockerung des Füllstoffes wegfallen (FLL 2022).

4 Emission von sekundärem Mikroplastik durch Faserabrieb

4.1 Stand des Wissens

Lassen et al. (2015) schätzen durch eine theoretische Berechnung den Austrag von Mikroplastik durch Faserverschleiß auf 5 bis 10 % pro Jahr. Hierbei bezieht sich die Schätzungen auf eine Menge an Fasern von $0,8 \text{ kg/m}^2$ und einer Fußballfeldgröße von 7.140 m^2 (Källquist 2005 in Lassen et al. 2015). Die gesamte Fasermenge beträgt somit 5.712 kg pro Spielfeld wobei 5 bis 10 % durch Mikroplastikaustrag verloren gehen. Also eine Menge zwischen $285,6 \text{ kg}$ und $571,2 \text{ kg}$ pro Jahr und Spielfeld.

Hann et al. (2018) betrachten den Mikroplastikaustrag von Kunststoffrasensystemen im Vergleich zu anderen Branchen in ganz Europa und ermitteln einen Faserverlust von 0,5 % bis 0,8 % jährlich. Die Studie geht von einem Polgewicht von $1,4 \text{ kg/m}^2$ und einer Platzgröße von 7.526 m^2 aus. Fleming et al. (2020) geben in der Studie, die sich mit einem Wartungsmodell zu Kunststoffrasenplätzen beschäftigt lediglich eine Schätzung zum Faserverlust von 0,5 bis 0,9 t/Jahr x Platz an. Hierbei gehen sie von einem durchschnittlichen Kunststoffrasenplatz aus. Alle oben genannten Studien ermitteln den Faserverschleiß über Schätzungen.

Müller et al. (2019) dagegen untersuchen auf drei Kunststoffrasenplätzen mit gleichem Füllstoff den Faserverschleiß. Für die Untersuchung werden an fünf Messpunkten auf dem Spielfeld je 40 Fasern aus verschiedenen Faserbündeln entnommen. Zusätzlich wird in Müller et al. (2019) der Faserverschleiß mit einem Lisport-Gerät mit 40.000 Zyklen an neuwertigen Probestücken getestet. Für die Bestimmung des Fasergewichtes wird jeweils der Mittelwert herangezogen. Für die Vergleichbarkeit werden neuwertige Probestücke desselben Faserstoffes als Referenzwert gewählt. In der Studie werden unter anderem die Faserlänge, das Fasergewicht, der Faserquerschnitt, die Faserdicke und die Faserbreite verglichen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Ergebnisse der Faseruntersuchung (nach Müller et al. 2019)

Gegenstand	Verschleißbetrag				
	Felduntersuchung			Laboruntersuchung	
Faserart	texturiert			glatt	
Platz	1	2	3		
Baujahr	2012	2014	2016		
Belastung				40.000 Zyklen	
Faserlänge	14,81 %	5,51 %	3,09 %	2,65 %	4,04 %
Fasergewicht	18,93 %	7,61 %	3,85 %	4,46 %	8,04 %
Faserquer-schnitt	23,09 %	2,68 %	3,33 %	22,22 %	22,64 %
Faserdicke	17,11 %	3,79 %	2,66 %	15,53 %	27,23 %
Faserbreite	8,49 %	0,45 %	10,24 %	23,40 %	14,08 %

Müller et al. (2019) stellen fest, dass die Faserlänge, die Faserbreite, die Faserdicke und der Faserquerschnitt für die Ermittlung des Fasergewichtes wichtig sind. Die Tabelle 9 zeigt die Umrechnung der relativen Verschleißbeträge der Kunststoffrasensysteme.

Tabelle 9: Berechnung der Masseverluste während der bisherigen Nutzung (nach Müller et al. 2019)

Platz	Verschleißbetrag (a)	Garneinsatzgewicht (b)	Kunststoffrasen- belagsfläche (c)	Freigesetzte Kunststoffparti- kel während der bisherigen Nutzung (a x b x c)
1	18,93 %	0,93 kg/m ²	8136 m ²	1436,03 kg
2	7,61 %	0,93 kg/m ²	5912 m ²	419,49 kg
3	3,85 %	1,02 kg/m ²	7900 m ²	310,23 kg

Nach der Prüfmethode von Müller et al. (2019) werden ganze Fasern, die sich aus dem Kunststoffrasensystem gelöst haben, nicht berücksichtigt. Außerdem werden bei Müller et al. (2019) die Messwerte ohne Gewichtung verrechnet, sodass die Messungen am Straßstoßpunkt überproportional in die Berechnung eingegangen sind.

Die Tabelle 10 zeigt zusammenfassend die Austragsmengen des Faserverschleiß. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse der Forschungsarbeiten auf einen Durchschnittsplatz von 7.600 m² und ein Poleinsatzgewicht von 1 kg/m² umgerechnet.

Tabelle 10: Austragsmengen von sekundärem Mikroplastik durch Faserabrieb je 7.600 m², Poleinsatzgewicht 1 kg/m²

Quelle	Austrag [t/Jahr x Platz]	Region
Lassen et al. 2015	0,38 – 0,76	Dänemark
Müller 2018	0,14 – 0,23	Deutschland
Fleming et al. 2020	0,5 – 0,9	Dänemark
Hann et al. 2018	0,6	Europa

4.2 Felduntersuchungen - Austrag von sekundärem Mikroplastik (eigene Untersuchung)

Aufgrund der schlechten Datenlage wird im Rahmen dieses Projektes der Austrag von sekundärem Mikroplastik aus den Kunststoffrasenfasern durch weitergehende Felduntersuchungen bestimmt. Die 25 Kunststoffrasenplätze in Hamburg wurden von der Freien und Hansestadt Hamburg zur Verfügung gestellt. Die drei Kunststoffrasenplätze in Italien, die drei Kunststoffrasenplätze in England und die vier Kunststoffrasenplätze in den Niederlanden wurde durch die EMEA Synthetic Turf Council bereitgestellt.

Die untersuchten Plätze sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Standort und Ausprägung der untersuchten Plätze

Anzahl	Standort	Verfüllung der Pol-schicht	Florhöhe
25	Freie und Hansestadt Hamburg	Sand	bis 40 mm
3	Italien	Synthetischer Füllstoff-Sand	50 mm
3	England	Synthetischer Füllstoff-Sand	50mm
4	Niederlande	Synthetischer Füllstoff-Sand	50 mm

Die Kunststoffrasensysteme wurden zwischen 2011 und 2017 gebaut. Weitere Daten, die erhoben und bei der Untersuchung berücksichtigt wurden sind:

- Standort, Anschrift
- Kunststoffrasensystem
- Baujahr
- Hauptnutzung der Sportart
- Füllstoffart

- Abmessung des Spielfeldes in m
- Fläche des Spielfeldes in m²
- Faserlänge über dem Trägergewebe nach FIFA TM 29
- Füllhöhe des Füllstoffes nach FIFA TM 21
- Tuftabstand der Tuftreihen nach FIFA TM 28
- Tuftreihenabstände nach FIFA TM 28
- Anzahl der Fasern pro Noppe
- Gewicht der Noppen
- Gesamtfaserlänge je Noppe (Schätzung)

Die eigens für diese Fragestellung entwickelte Methode ist ausführlich im Anhang dargestellt und wurde für das Projekt „Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag und -verbrauch“ entwickelt.

4.2.1 Masseverlust sandverfüllte Plätze

In Abbildung 12 sind die Masseverluste der Fasern im zeitlichen Alterungsverlauf der Kunststoffrasensysteme bei der Prüfstelle 2, also der intensiven Nutzungszone dargestellt. Der Masseverlust wird bei 25 Kunststoffrasenspielfeldern festgestellt.

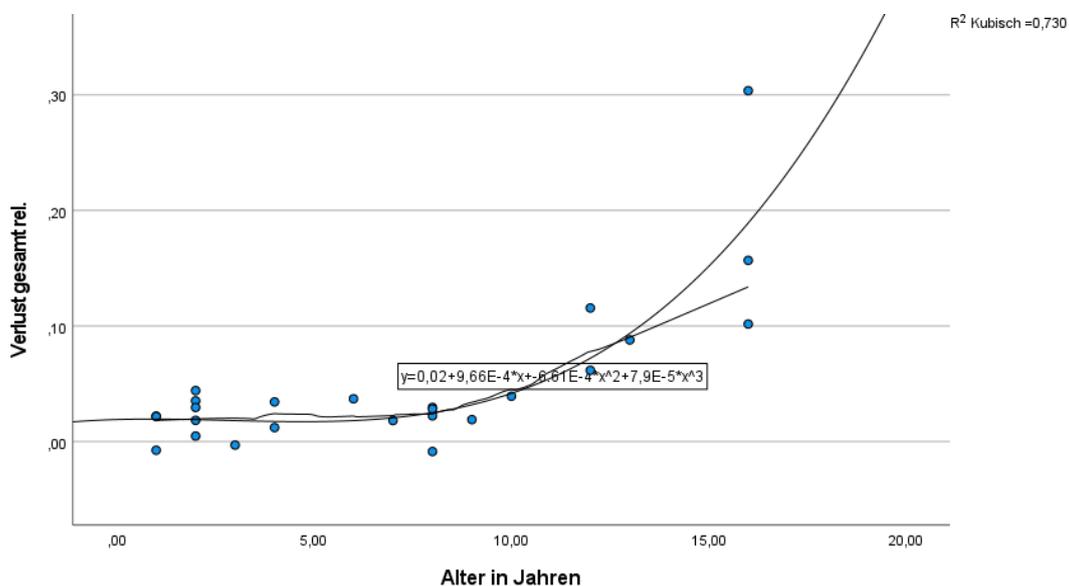


Abbildung 12: Gesamter Faserverlust sandverfüllter Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung

Die Masseverluste der Plätze im intensiv genutzten Bereich am Strafstoßpunkt liegen im Regelfall zwischen 0,5 % und 15,7 %. Ausnahme ist ein Platz mit annähernd 30 % mit einem Alter von 16 Jahren. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der intensiven Nutzungszone wird deutlich, dass ein vergleichsweise hoher Masseverlust der Fasern bei Kunststoffrasenplätzen verzeichnet wird, die ein geringes Platzalter zwischen einem und drei Jahren haben.

Bei extensiver Nutzungsintensität wird ein prozentualer Masseverlust von 6 % nicht überschritten (vgl. Abbildung 13). Insgesamt konnte ein Masseverlust nur bei 20 der insgesamt 25 untersuchten Kunststoffrasenplätze festgestellt werden. Die Untersuchungen ergaben bei 5 Kunststoffrasenplätzen einen negativen Masseverlust. Es ist nur zu mutmaßen, dass dies auf Schwankungen der Faserproduktion zurückzuführen ist.

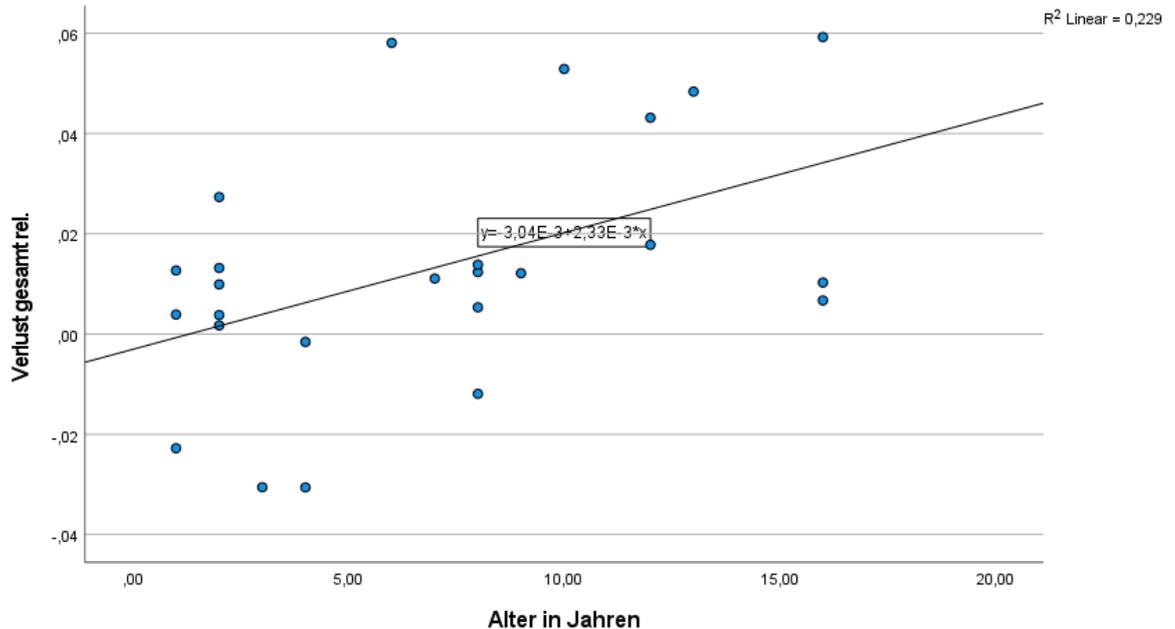


Abbildung 13: Gesamter Faserverlust auf sandverfüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung

In der Abbildung 14 und der Abbildung 15 wird der prozentuale Masseverlust pro Jahr dargestellt. Der hohe Masseverlust in den ersten Jahren lässt eine hohe Anzahl an ausgerissenen Fasern vermuten. Eine fehlerhafte Einbindung der Fasern in das Trägergewebe könnte hierfür eine Ursache sein. Eine andere mögliche Erklärung ist die nachträgliche Aushärtung/Stabilisierung der Faser durch Sonneneinstrahlung. Ein solcher Effekt konnte im Rahmen der Entwicklung der Prüfmethode zur Bestimmung des Faserverschleiß nach der Behandlung mit UV-C Licht ebenfalls festgestellt werden.

Nach den ersten Jahren fällt der prozentuale Masseverlust pro Jahr auf weniger als 1 % zurück. Gegen Ende der Lebensdauer, nach zwölf Jahren, steigt der Masseverlust der Fasern stark an. Dies lässt vermuten, dass es mit den Jahren bei den Kunststofffasern zu Versprödung kommt. Die beschriebenen Effekte sind bei der intensiven Nutzungszone deutlich stärker ausgeprägt als bei der extensiven Nutzungszone.

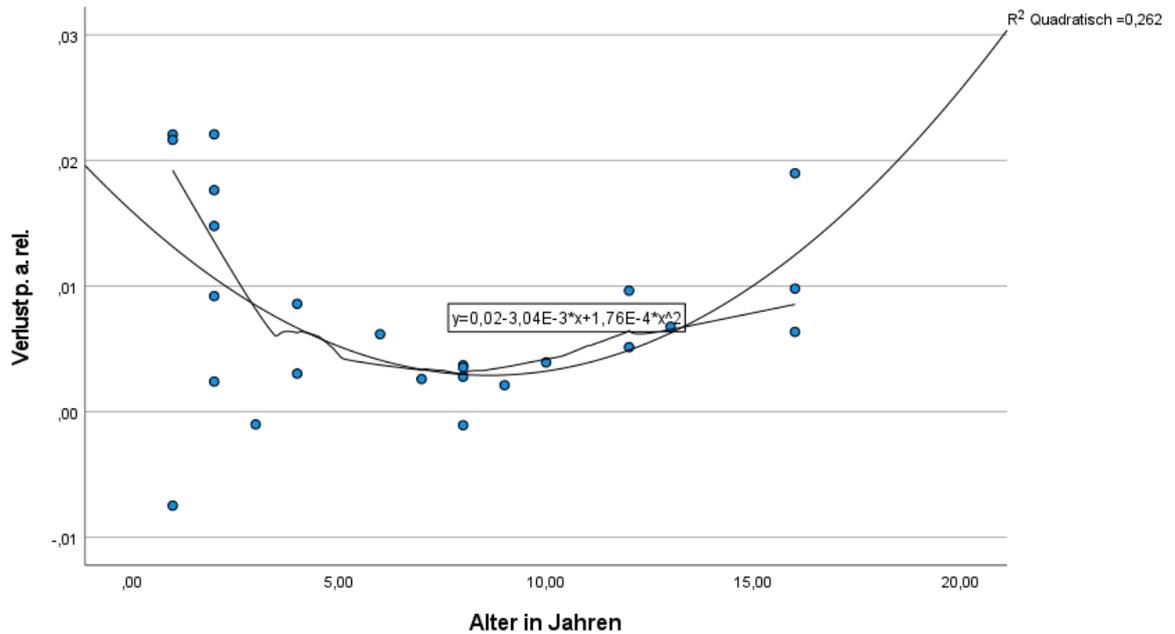


Abbildung 14: Faserverlust pro Jahr sandgefüllter Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung

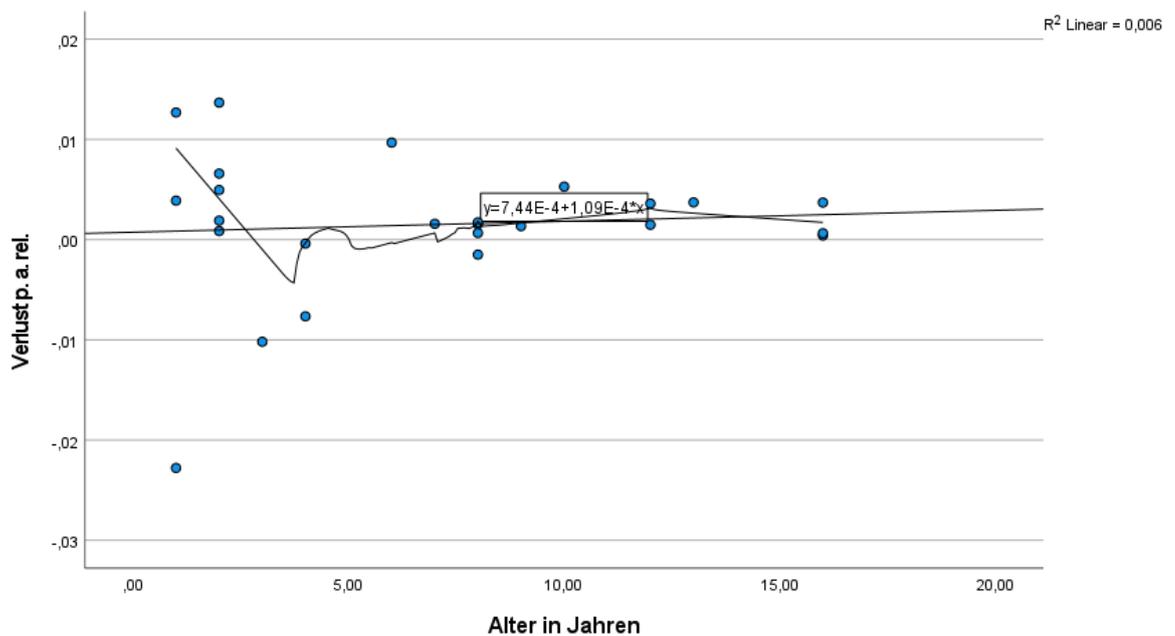


Abbildung 15: Faserverlust pro Jahr sandgefüllter Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung

4.2.2 Masseverlust synthetisch verfüllte Plätze

Der festgestellte Masseverlust der synthetisch verfüllten Kunststoffrasenplätze in Großbritannien, Italien und den Niederlanden erreicht an der Prüfstelle mit intensiver Nutzung auf einem Platz einen Masseverlust von knapp 30 %. Bei den meisten Kunststoffrasenplätzen liegt der Masseverlust der Fasern zwischen 4 % und 7 % (vgl. Abbildung 16). Bei neun von den zehn untersuchten Plätzen konnte ein Masseverlust nachgewiesen werden.

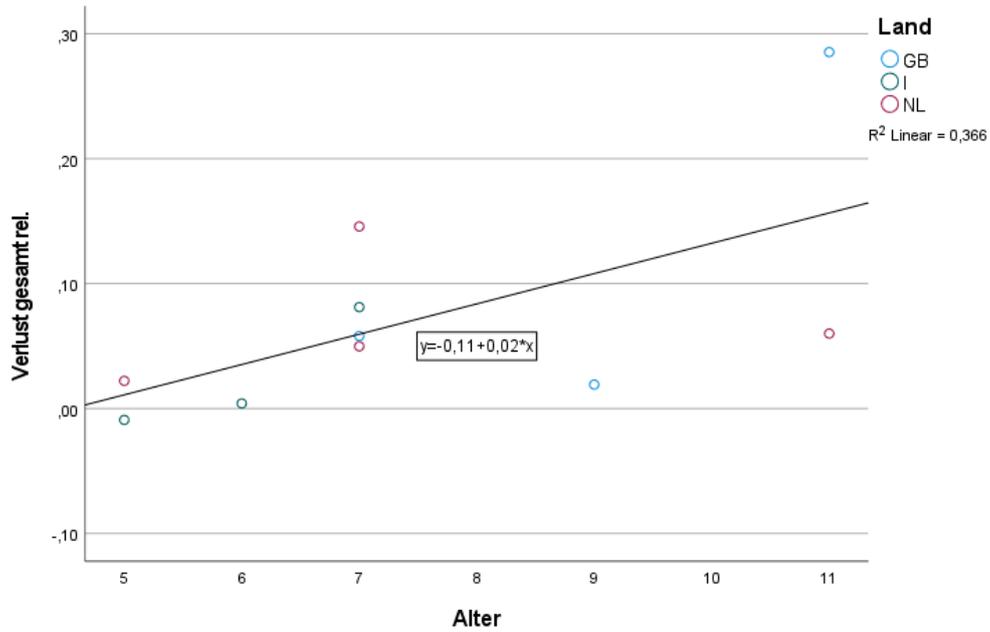


Abbildung 16: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit intensiver Nutzung

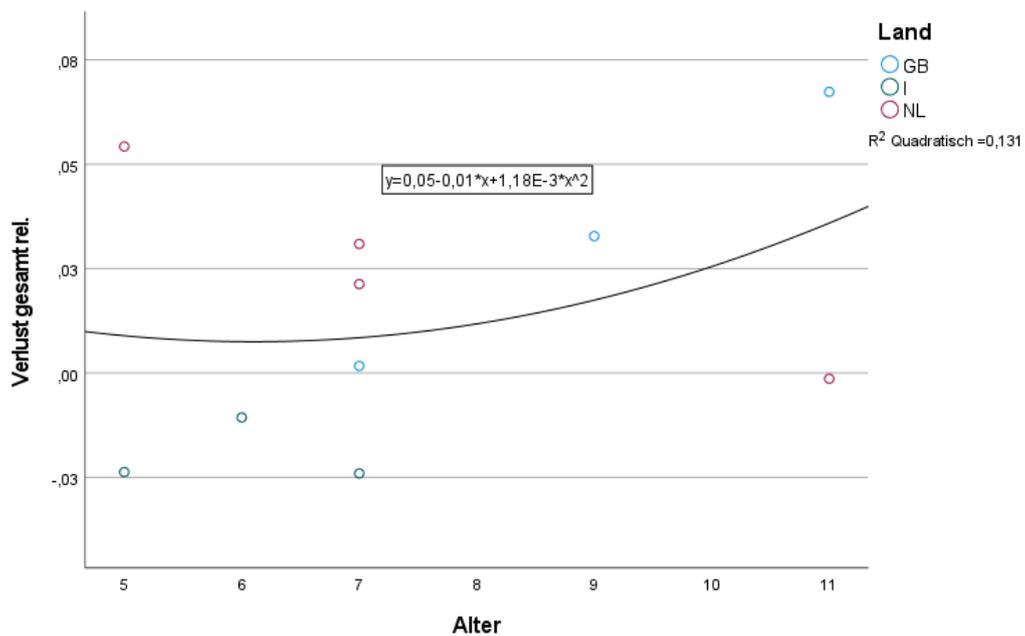


Abbildung 17: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätze mit extensiver Nutzung

Der höchste Masseverlust in der extensiven Nutzungszone liegt bei 7 % (vgl. Abbildung 17 - Abbildung 19). Bei sechs von zehn Kunststoffrasenplätzen wird ein Masseverlust festgestellt (vgl. Abbildung 17).

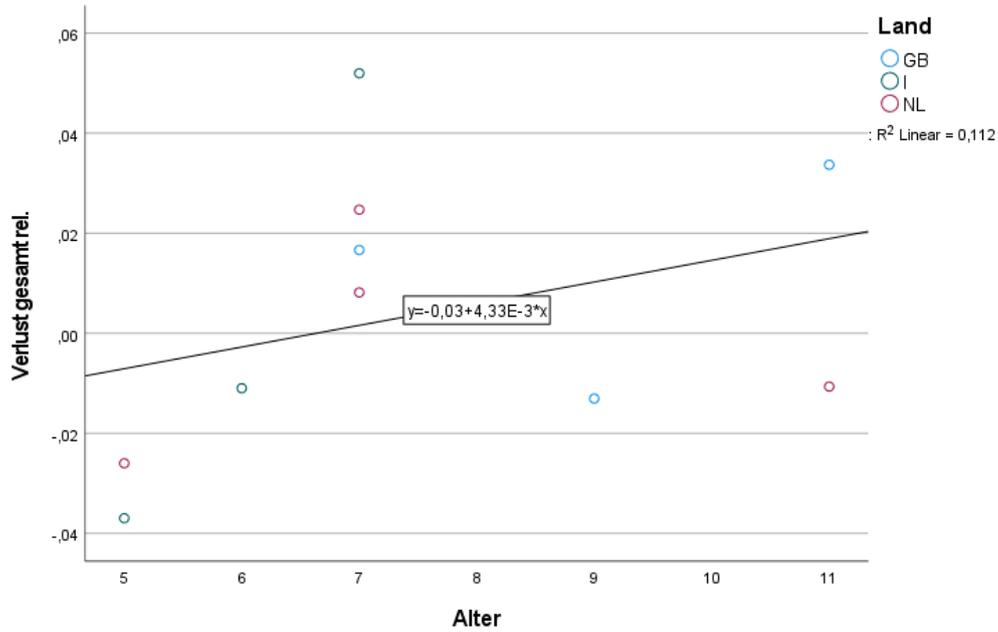


Abbildung 18: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung

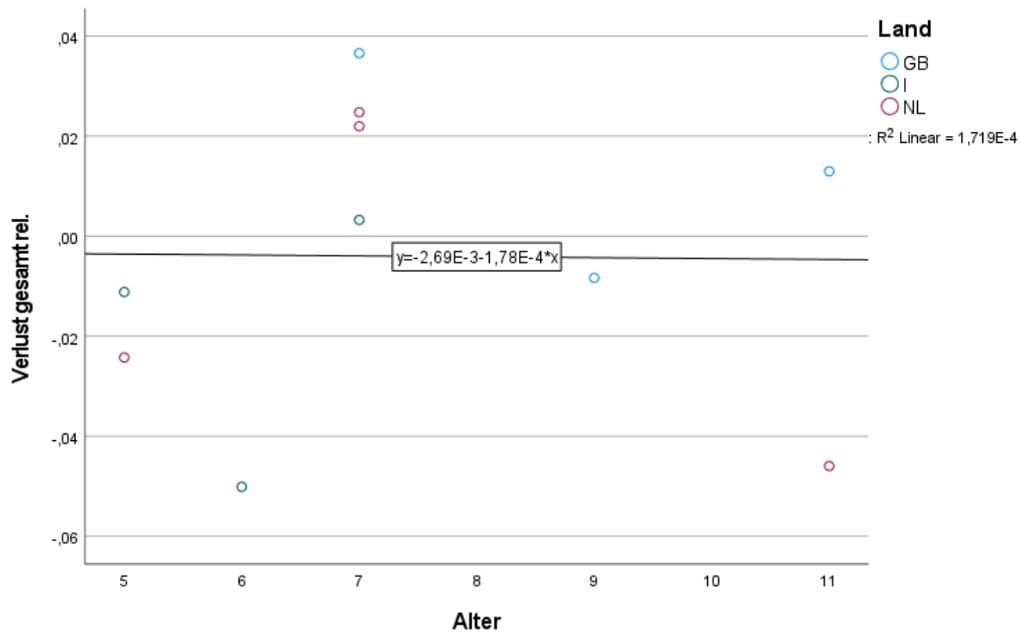


Abbildung 19: Gesamter Faserverlust auf synthetischgefüllten Kunststoffrasenplätzen mit extensiver Nutzung

4.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Austragsmengen

Der Vergleich der sandgefüllten Kunststoffrasenplätze aus Deutschland und den synthetisch verfüllten Kunststoffrasenplätzen in Großbritannien, Italien und den Niederlanden zeigt, dass der Masseverlust der Fasern im Durchschnitt zwischen einem und acht Prozent in den Lebensjahren null bis zehn liegt. Ab dem zehnten Lebensjahr steigt der Masseverlust an (vgl. Abbildung 20).

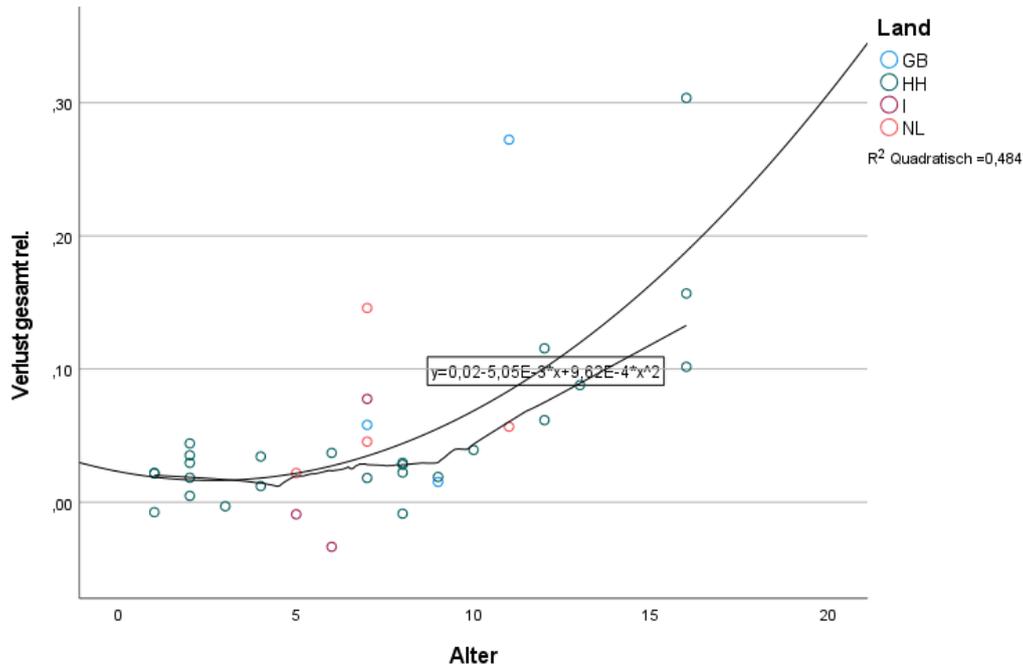


Abbildung 20: Gesamter Faserverlust an der Prüfstelle mit intensiver Nutzung

Bei der Betrachtung des Masseverlustes pro Jahr ist in den ersten drei Lebensjahren zwischen einem und drei Prozent festgestellt worden. In den Lebensjahren drei bis zehn flacht dieser Verlust wieder deutlich ab, um dann ab dem zehnten Lebensjahr kräftig anzusteigen. Der Maximalwert liegt bei einem Platz aus Großbritannien mit einem Verlust von 2,5 % pro Jahr am höchsten (vgl. Abbildung 21).

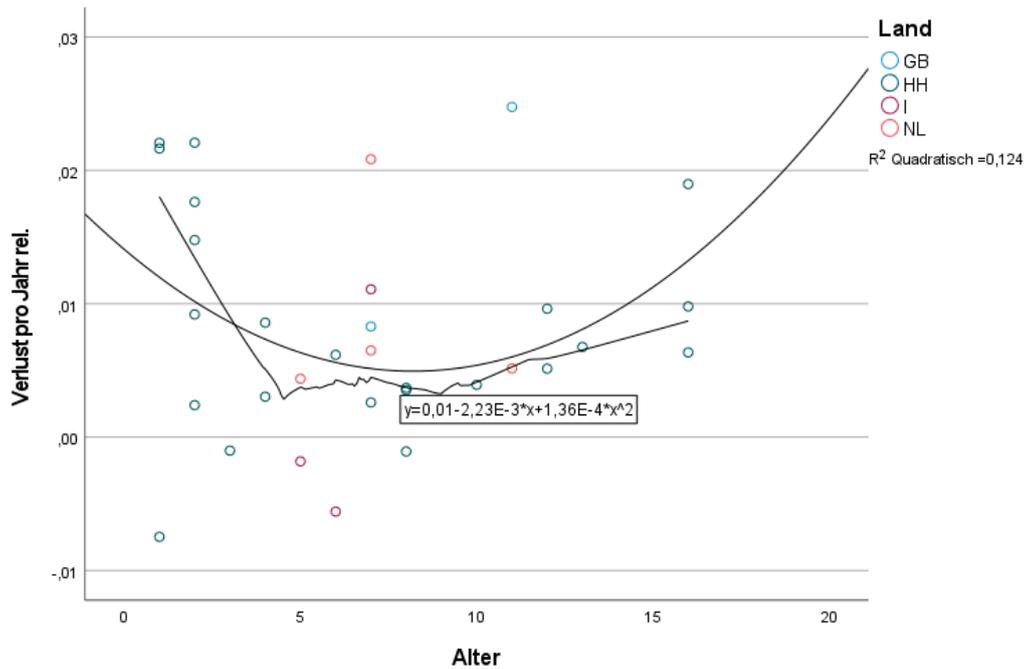


Abbildung 21: Vergleich des Masseverlustes pro Jahr der Fasern bei unterschiedlichen Füllstoffen Prüfstelle mit intensiver Nutzung

Um eine mögliche Verbindung zwischen Füllstoff und Faserverschleiß zu ermitteln, wurden die Systeme gegenübergestellt (vgl. Abbildung 22). Der erwartete Unterschied bei dem Verschleiß zwischen synthetischer Füllstoff-Sand-Füllung (Großbritannien, Italien und Niederlande) und einer reinen Sandfüllung (Hamburg, Deutschland) ist zwar optisch sichtbar, konnte aber statistisch nicht nachgewiesen werden. Die beiden Füllstoffe können den 95%-Konfidenzintervallen nicht als signifikant unterschiedlich angesehen werden.

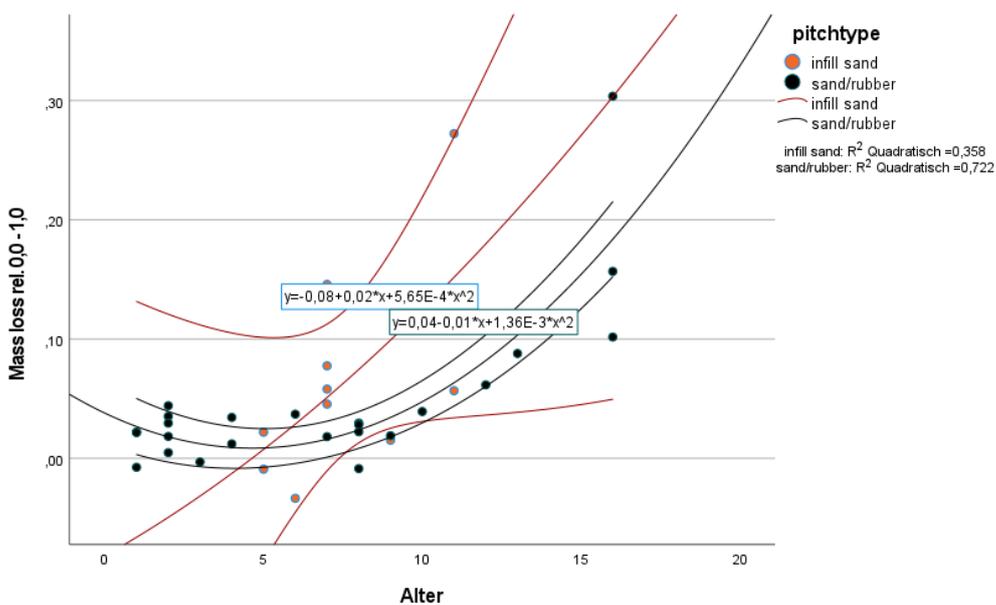


Abbildung 22: Vergleich des Masseverlustes pro Jahr der Fasern bei unterschiedlichen Füllstoffen Prüfstelle mit intensiver Nutzung

Aufgrund der hohen Streuung der Messergebnisse und der variablen Annahmen ist die folgende Hochrechnung nur eine grobe Schätzung und ist mit Vorsicht zu bewerten.

Angenommen wird eine Spielfeldgröße von 7.600 m². Weiterhin wird angenommen, dass 10 % des Spielfeldes intensiv und 90 % extensiv genutzt werden. Diese Annahme kann jedoch nicht verallgemeinert werden, da die Intensität der Spielfeldnutzung stark von der Dauer der Nutzung sowie dem Leistungsniveau abhängt. Hochgefüllte Kunststoffrasensysteme haben typischerweise Fasergewichte zwischen 1.000 g/m² und 1.600 g/m². Aus den Messergebnissen ergibt sich, unter Vernachlässigung der Ausreißer, ein Massenverlust in intensiv genutzten Flächen von 0,5 %/Jahr bis 2,0 %/Jahr. Für extensiv genutzte Flächen beträgt der erwartete Massenverlust 0,1 %/Jahr bis 0,6 %/Jahr. Aus diesen Annahmen ergeben sich eine Best-Case- und eine Worst-Case-Berechnung für den erwarteten Massenverlust eines gesamten Spielfeldes in einem Jahr.

Best-Case:

$$7.600 \text{ m}^2 * 1.000 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} * (0.1 * 0.005 + 0.9 * 0.001) \frac{\%}{\text{y}} = 10.640 \frac{\text{g}}{\text{y}}$$

Worst- Case:

$$7.600 \text{ m}^2 * 1.600 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} * (0.1 * 0.02 + 0.9 * 0.006) \frac{\%}{\text{y}} = 89.984 \frac{\text{g}}{\text{y}}$$

Ergebnis der Analyse: Ein hochgefüllter Kunststoffrasen verliert zwischen 10 kg und 90 kg Mikroplastik pro Jahr pro Platz nur durch Faserverlust und Abrieb, ohne Berücksichtigung des Füllstoffverlustes.

5 Spieleigenschaften von Kunststoffrasensystemen

5.1 Stand des Wissens

5.1.1 Technische Spieleigenschaften

Es gibt unterschiedliche Kunststoffrasensysteme. Die technischen Anforderungen sind nach den entsprechenden Normen alle gleich und machen keine Unterschiede zwischen Systemen.

Es werden in DIN EN 15330-1:2013-12 Spieleigenschaften, die ein Kunststoffrasensystem erfüllen muss, benannt. Kennwerte für die Spieleigenschaften von Kunststoffrasensystemen sind in Abhängigkeit zu der vorgesehenen Nutzung des Kunststoffrasensystemes insbesondere

- Ballreflexion
- Ballrollverhalten (Ballrollentfernung)
- Drehwiderstand
- Ebenheit der Oberfläche
- Kraftabbau
- Kritische Fallhöhe
- Wasserinfiltrationsrate (sofern zutreffend)
- Winkliges Ballverhalten
- Vertikale Verformung

Zusätzlich zu den prüfbaren Spieleigenschaften wurden in diesem Projekt auch die subjektiven Spieleigenschaften ermittelt, die ein Kunststoffrasensystem erfüllen muss.

5.1.2 Verletzungsrisiko

Seit der Einführung von Kunststoffrasensystemen in professionellen Wettbewerben gibt es eine Diskussion über Verletzungsrisiken. In der NFL fordert die Spielervereinigung seit längerem eine Abschaffung von Kunststoffrasen und ein Umstieg auf Naturrasenplätze (Jensen 2022). Der schweizerische Profiverein Young Boys Bern machte für ihre hohe Verletzungsquote zum Beispiel ihr neues Kunststoffrasensystem verantwortlich (Wuillemin 2022).

Demgegenüber werten Kuitunen et al. (2023) systematisch aktuelle wissenschaftliche Studien zum Verletzungsrisiko aus und kommen zu dem Ergebnis, dass die Gesamthäufigkeit von Fußballverletzungen auf Kunststoffrasen niedriger ist als auf Naturrasen. Möglicherweise sind die Nutzenden aus Angst vor Verletzungen vorsichtiger.

Nach Williams et al. (2011) sind der Rotationswiderstand bei ungefüllten Plätzen mit niedriger Faserhöhe im Vergleich zu einem hochverfüllten Kunststoffrasen höher. Auch die Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt besitzen einen direkten Einfluss auf die Traktion zwischen Schuhsohlen und

Spielfläche und damit auf das Verletzungsrisiko (Orchard 2002). So können im Hochsommer, in der Trockenzeit, vermehrt Verletzungen beobachtet werden (Orchard 2002). Nach Shorten (2009) kann die Zugabe einer stoßdämpfenden Elastikschicht das Risiko für leichte und mittlere Kopfverletzungen von 29 % auf 11 % deutlich senken.

Vereinzelte Studien konnten eine knapp höhere Knöchelverletzungsrate auf Kunststoffrasen im Vergleich zu Naturrasen beobachten (Ekstrand et al. 2011). Kristenson et al. (2013) beobachteten eine knapp höhere Überlastungsverletzungsrate, vor allem in den unteren Extremitäten.

Biomechanische Studien erklären diese Beobachtungen damit, dass Kunststoffrasenbeläge die Stollen der Fußballschuhe nicht so leicht freigeben wie Naturrasenbelägen. So ist das Risiko von Verletzungen der unteren Extremitäten auf Kunststoffrasen um 16 % höher (Mack et al. 2019).

Weitere Faktoren, welche für die höhere Knöchelverletzungsrate verantwortlich sein können, sind das höhere Spitzendrehmoment und die höhere Rotationssteifigkeit zwischen Schuh und Oberfläche, sowie eine geringere Aufpralldämpfung. Durch diese Unterschiede besitzen Kunststoffrasenflächen und Naturrasenflächen ein unterschiedliches Belastungsmuster der Füße, welches zu nachteiligen physiologischen Reaktionen führen kann. Daher kann der Wechsel zwischen unterschiedlichen Sportbelägen ein Grund für Verletzungen beim Fußball sein (Williams et al. 2011).

Nicht nur der Untergrund, sondern auch die Wahl der Schuhe haben einen Einfluss auf die Schutzfunktion. Fußballschuhe mit flächig verteilten Noppen reduzieren die Rotationssteifigkeit und verringern somit die Belastungen der unteren Extremitäten (Müller 2010).

Viele Untersuchungen konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Häufigkeit, Schwere, Art und Ursache von Verletzungen feststellen. Im Vergleich zu älteren Kunststoffrasensystemen besitzen aktuelle Systeme keine signifikanten Unterschiede bei den schutzfunktionellen Eigenschaften im Vergleich zu Naturrasen (DFB 2006; Fuller et al. 2007a, 2007b; Slogard et al. 2010; Rennie et al. 2015; FIFA 2021).

5.1.3 Subjektiv wahrnehmbare Spieleigenschaften

Neben den technisch und funktionellen Eigenschaften sind subjektive Wahrnehmungen der Nutzerinnen und Nutzern zu berücksichtigen. Beispielhaft kann hier die Bereitschaft zum Tackling oder zum Grätschen genannt werden. Bisher sind nur zwei Untersuchungen bekannt, die innerhalb der unterschiedlichen Kunststoffrasensysteme Bewertungen von Spielerinnen und Spielern darlegen.

Unterschiede in der subjektiven Bewertung der Systeme nach Kriterien wie Elastizität, Härte, Standicherheit, Kraftabbau, Ermöglichung von komplexen Körperbewegungen und die Ballreflexion ergab nach Befragung von Nutzern von sieben unterschiedlichen Kunststoffrasensystemen, dass synthetisch verfüllte Kunststoffrasenplätzen den mineralisch- und unverfüllten Kunststoffrasenplätzen vorgezogen werden (DFB 2006).

Eine Umfrage des Österreichisches Institut für Schul- und Sportstättenbau (ÖISS) zum subjektiven Empfinden von Körperbelastung, Ballrollverhalten, technischen und allgemeinen Eigenschaften von ungefüllten Kunststoffrasensystemen zeigt, dass Kunststoffrasenplätze mit jüngerem Baujahr besser bewertet werden. Gerade Grätschen, Springen und der Schuss aus dem Stand werden über eine Note besser bewertet (vgl. Abbildung 23). Zusätzlich zu den technischen Messergebnissen wurden Ergebnisse aus der Umfrage zu Körperbelastung, Spielfeldeigenschaften und Ballverhalten gesammelt. Die Umfrage des ÖISS zeigt, dass das jüngere Baujahr der Kunststoffrasensysteme in allen Kategorien tendenziell besser bewertet ist.



Abbildung 23: Umfrage zum subjektiven Empfinden von ungefüllten Kunststoffrasensystemen (ÖISS o. J.)

5.1.4 Beeinflussung der Spieleigenschaften durch die Instandhaltung

Einen beträchtlichen Einfluss auf die Spieleigenschaften eines Kunststoffrasensystems hat die Instandhaltung. Dabei können angemessene Wartungspraktiken die Beschaffenheit und die Variabilität deutlich verbessern (Jastifer et al. 2021). Die größten Veränderungen in den Spieleigenschaften entstehen in der ersten Spielsaison. So gibt es deutliche Schwankungen in der Ballrolldistanz und der Oberflächenhärte.

So konnten Sánchez-Sánchez et al. (2014) bei unterschiedlichen Systemen eine deutliche Verschlechterung der Spieleigenschaften innerhalb des ersten Jahres ohne Instandhaltung beobach-

ten. Dies verdeutlicht die wichtige Rolle der Pflege bei der Aufrechterhaltung einer hohen Leistungsfähigkeit von Kunststoffrasenplätzen. Im Allgemeinen werden Kunststoffrasenplätze mit den Jahren härter und schneller (Kieft 2009).

Vor allem der verwendete Füllstoff bei hochverfüllten Systemen kann sich über die Zeit verdichten oder umverteilen. Dies erhöht die Oberflächenhärte, was nicht nur zu schlechteren Spieleigenschaften führt, sondern auch die Schutzfunktion des Platzes verringert. Die Füllstoffverdichtung führt zu einem Freilegen der Fasern, dadurch ist die Interaktion der Spielenden und des Balles mit den synthetischen Fasern höher, was die Ballrolleigenschaften verschlechtern kann. Um die beschriebenen Effekte zu vermeiden ist ein regelmäßiges Aufbürsten der Fasern und des Füllstoffes nötig, um ein konsistentes System zu schaffen (Dickson et al. 2020b).

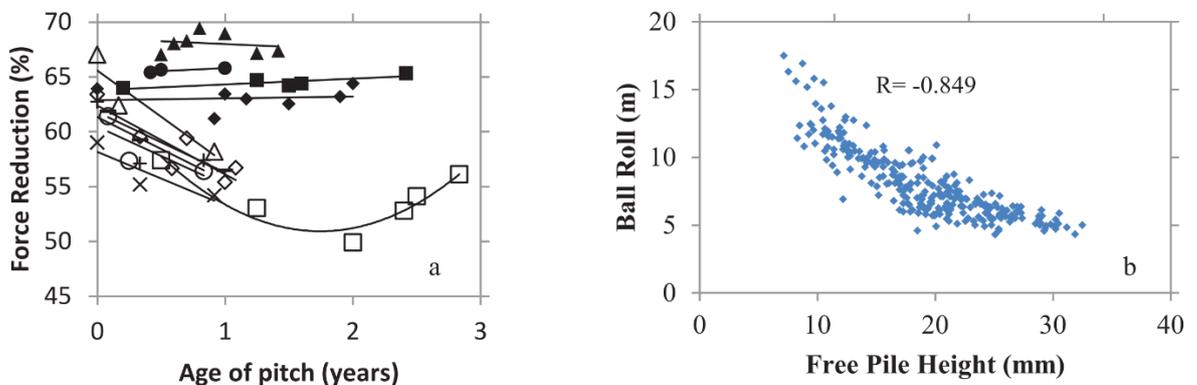


Abbildung 24: Links: Einfluss des Platzalters auf die Kraftreduzierung. Rechts: Einfluss der freien Faserhöhe auf die Ballrollentfernung (Sharma et al. 2016)

Fleming (2011) beschreibt, dass bei korrekter Verwendung und Auswahl der Bürste das Aufbürsten den Fasern nicht schadet. Es konnten bei drei untersuchten Systemen keine mittels Bürsten verursachten Faserbrüche oder Faserspalten beobachtet werden. Hinsichtlich der Häufigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen hat sich die Faustregel „Pro 10 Stunden Nutzung des Oberflächensystems 1 Stunde Pflege“ (Fleming 2011) bewährt. Somit ergibt sich im Vergleich zu Naturrasen der gleiche Aufwand für Pflege und Instandhaltung pro Jahr. Bei optimaler Auslastung des Kunststoffrasenplatzes ergibt sich jedoch ein geringerer Aufwand für Pflege und Instandhaltung pro Nutzungsstunde. Zur Überwachung der Instandhaltung empfiehlt sich die Nutzung von tragbaren, relativ günstigen Überwachungsgeräten. Es reichen ein Clegg-Hammer und ein Rotationsgerät um die wichtigsten Aspekte, wie Fülltiefe, Beweglichkeit, Torsion und Oberflächenhärte zu bestimmen (Fleming 2011).

Nicht nur die Füllung und die freie Faserhöhe besitzen einen Einfluss auf die Eigenschaften des Systems auch eine Verschmutzung durch Ansammlung von Verunreinigungen kann starke negative Auswirkungen besitzen. So führt eine hohe Verunreinigungskonzentration zu einer Zunahme des

Feuchtigkeitsgehaltes in sandverfüllten Systemen. Die effektive Bürstentiefe und die Bürstenlast nehmen mit dem Feuchtigkeitsgehalt der Sandfüllung erheblich ab (McLeod 2008).

Mit zunehmender Verschmutzung steigt auch die Ballverzögerung und es wird die Infiltrationsrate verringert, so dauert es deutlich länger, bis die Oberfläche getrocknet ist. Die länger anhaltende Feuchte begünstigt das Wachstum von Moos, Algen und Bakterien und hat somit einen Einfluss auf die gesundheitlichen Risiken (siehe oben) (James und McLeod 2010).

Sharma et al. (2016) konnten aufzeigen, dass zum Beispiel das monatliche Tiefenbürsten der Oberfläche die Verschmutzungsrate um 1 % pro Jahr reduzieren kann. Dies kann die Lebensdauer des Systems verlängern und eine teure Tiefenreinigung oder ein Austauschen des kontaminierten Füllstoffes vermeiden. Die Häufigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen kann nur schwer verallgemeinert werden, da sie nicht nur von der Nutzungsintensität abhängt, sondern auch von geographischen und klimatischen Bedingungen. So benötigt zum Beispiel ein System mit Baumbestand am Feldrand ein deutlich höheres Reinigungsintervall als Anlagen in geschlossenen Räumen (Sharma et al. 2016).

Nicht nur organische Bestandteile (Pollen, Blätter, Staub, Hautzellen, Haare, Moose, Algen, Bakterien u. a.) sorgen für Verunreinigungen, sondern auch das sekundäre Mikroplastik, welches durch den Abrieb der Fasern entsteht. In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Pilotprojekt der Firma Polyclean wird untersucht, wie diese Verunreinigungen mit Hilfe einer Intensivwäsche entfernt und entsorgt werden können. Dazu wird ein Reinigungsgerät verwendet, welches mit Wasser die Schadstoffe bindet und mit Hilfe eines integrierten Filters die fachgerechte Entsorgung der Rückstände ermöglicht (vgl. Abbildung 25).

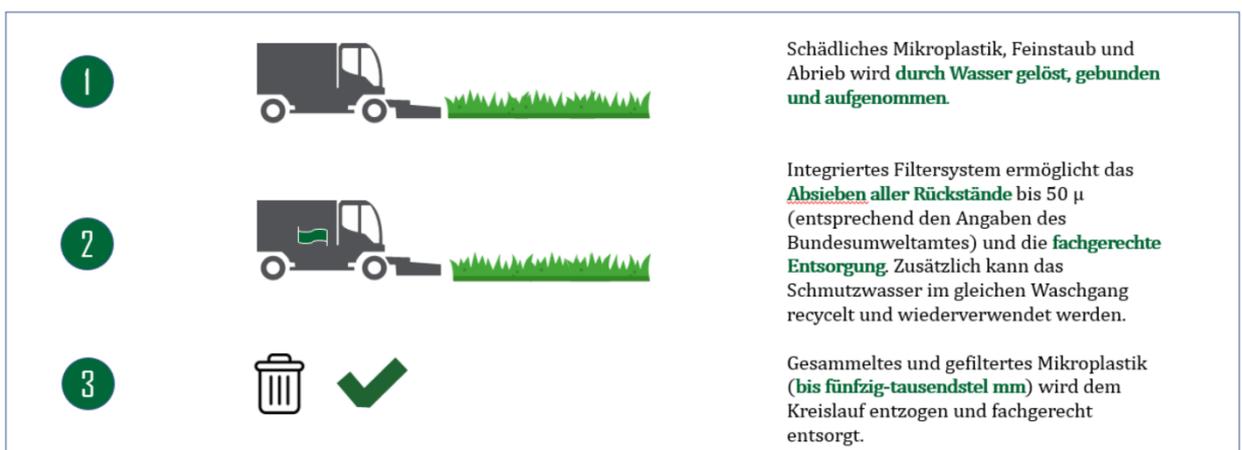


Abbildung 25: Methode der Intensivwäsche eines Kunststoffrasens (Polyclean o. J.)

Die Kunststoffrasen-Normen behandeln das Thema Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen nur unzureichend und beschreiben weder Maßnahmen noch Intervalle. Die DIN DIN 18035-7:2019-12 verweist auf die FLL-Sportplatzpflegerichtlinie und die Norm DIN EN 15330-1:2013-12 verweist

auf die Herstellerangaben. In den Sportplatzpflegerichtlinien wird eine regelmäßige Grundpflege gegen Verunreinigungen und eine jährliche Intensivpflege empfohlen (FLL 2014). In RAL-GZ 944:2022-10 werden in Teil 6 Anlage F die Intensivreinigung von ungefüllten Systemen mit Hilfe einer Hochdruckreinigung und die Intensivpflege von verfüllten Systemen mit einer trockenen Kehr- saugmaschine beschrieben.

Fleming et al. (2020) haben für Instandhaltungsmaßnahmen von hochverfüllte Kunststoffrasensysteme ein quantitatives Modell geschaffen, welches Daten für die Geschwindigkeit der Verschlechterung des Systems mit dem Schwerpunkt auf Füllmenge und freie Faserhöhe zeigt. Das Modell quantifiziert primäre Zusammenhänge zwischen Degradationsfaktoren und Degradationsmechanismen. Auch zeigt das Modell eine erwartete Rate für den Mikroplastikaustrag durch Füllstoffverlust. Die Zusammenhänge zwischen Faktoren und Mechanismen sowie die Wirkungen der Pflegemaßnahmen sind in Abbildung 26 dargestellt.

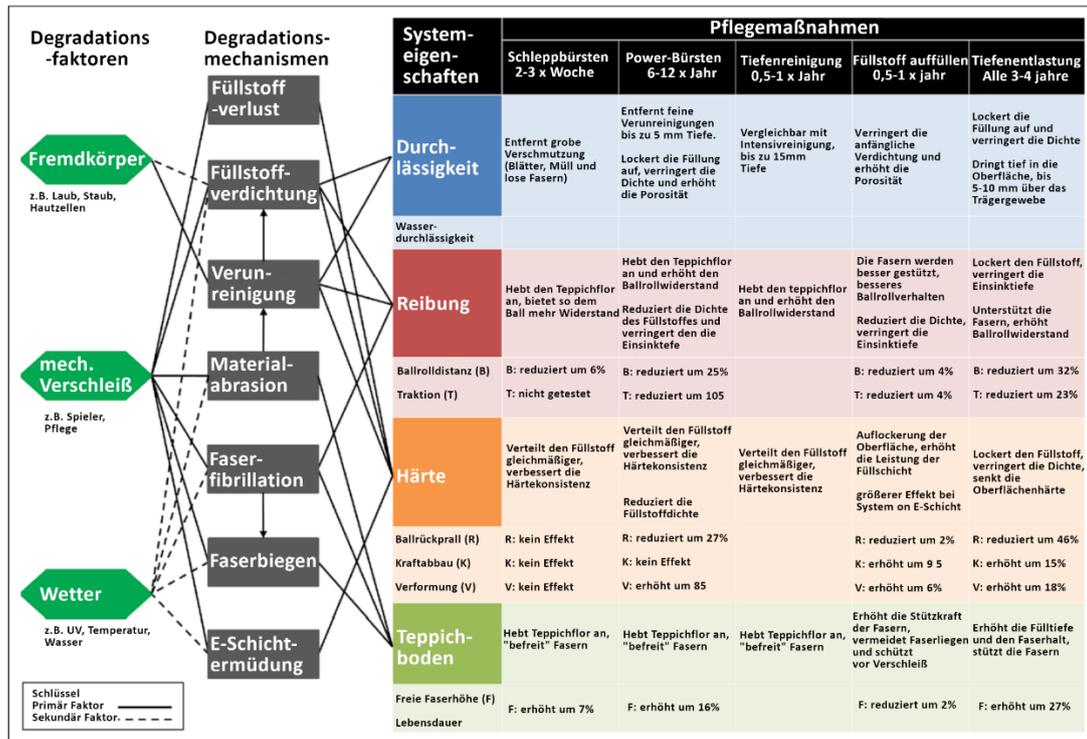


Abbildung 26: Schema der Degradation und die Wirkung der Pflegemaßnahmen (Fleming et al. 2020, verändert)

5.2 Untersuchung der subjektiven Spieleigenschaften (eigene Untersuchung)

Aufgrund der geringen Datenlage wurden im Rahmen dieses Projektes zwei Umfragen bei aktiven Nutzerinnen und Nutzern zu den subjektiven Eigenschaften durchgeführt. Bewusst sind die Fragen einfach und verständlich formuliert, sodass Normbegriffe durch Umgangssprache ersetzt wurden, z.B. Gummigranulat statt synthetisch-elastischer Füllstoff. An der Befragung haben 612 Personen teilgenommen. Davon wurden 322 persönlich vor Ort und 290 online befragt. Von den Befragten haben 548 eine Altersangabe gemacht.

- 21 % jünger als 21 Jahre
- 49 % zwischen 21 und 28 Jahren
- 29 % älter als 29 Jahre

Die Zuordnung der befragten Nutzerinnen und Nutzer nach Baujahr und Art des Kunststoffrasensystems sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Methodik der Umfrage ist detailliert im Anhang beschrieben.

Tabelle 12: Plätze der Umfrage zur Bewertung der Spieleigenschaften von Kunststoffrasenplätzen

Füllstoff	Baujahr 2022 - 2021	Baujahr 2020 - 2018	Baujahr älter 2018
Synthetisch	13	62	43
Natürlich	27	46	44
Mineralisch, hoch ver- füllt	59	100	6
ungefüllt und teilverfüllt	0	0	143
Gesamt Baujahr	99	208	246

Die ungefüllten und teilverfüllten Systeme mussten hier zusammengefasst werden, da nicht sicher zwischen den beiden Systemen unterschieden werden konnte. Dabei gilt:

- synthetisch Füllstoff aus synthetischen, elastischen Stoffen mit Sand,
- natürlich Füllstoff aus natürlichen Stoffen, hier Kork mit Sand,
- mineralisch, hochverfüllt Füllstoff aus Sand, hochverfüllt,
- ungefüllt und teilgefüllt ohne Füllstoff oder teilverfüllt mit Sand nur zur Beschwerung

Die Bewertung der sportfunktionellen Eigenschaften auf verschiedenen Kunststoffrasensystemen erfolgt in acht verschiedenen Kategorien. Dabei gilt:

- gleicher Buchstabe: keine signifikanten Unterschiede,
- nicht gleicher Buchstabe: signifikante Unterschiede.

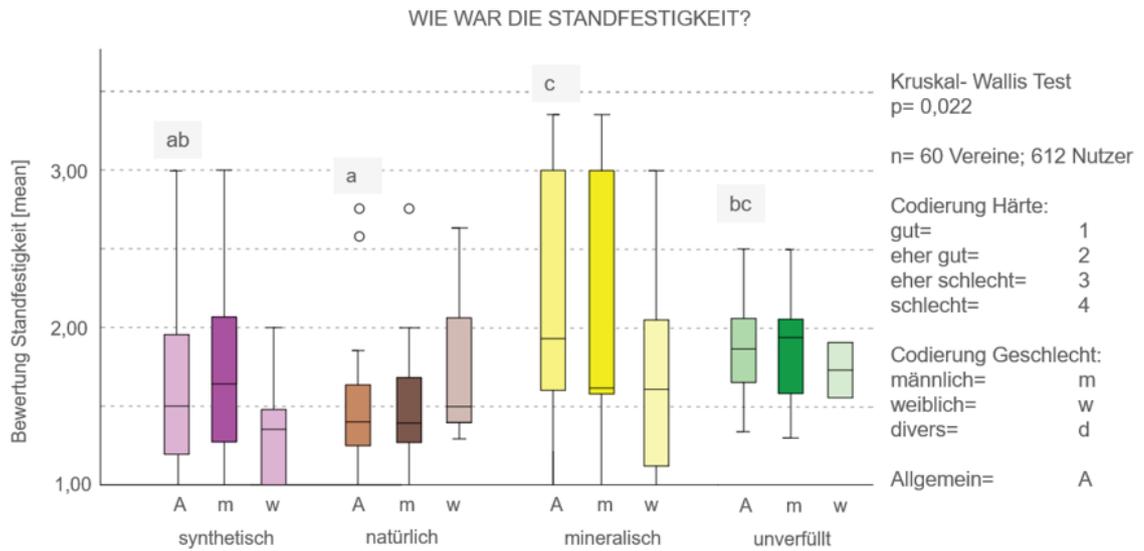


Abbildung 27: Bewertung der Standfestigkeit

Die Standfestigkeit zeigt innerhalb der vergleichenden Bewertung signifikante Unterschiede der Systeme auf. Bei der Betrachtung von Kork/ungefüllt/teilverfüllt ($p=0,045$), Kork/Sand ($p=0,007$) und synthetischer Füllstoff - Sand ($p=0,037$) liegen signifikante Unterschiede vor. Der natürliche Füllstoff und der synthetische Füllstoff werden bei der Standfestigkeit am besten bewertet. Ungefüllte/teilverfüllte Kunststoffrasensysteme hingegen haben eine schlechtere Standfestigkeit. Bei mineralisch gefüllten Kunststoffrasen variiert die Bewertung der Nutzenden stark. Die Umfrageergebnisse lassen darauf schließen, dass die Bewertung der Standfestigkeit maßgeblich mit der Art des Füllstoffs zusammenhängt (vgl. Abbildung 27).

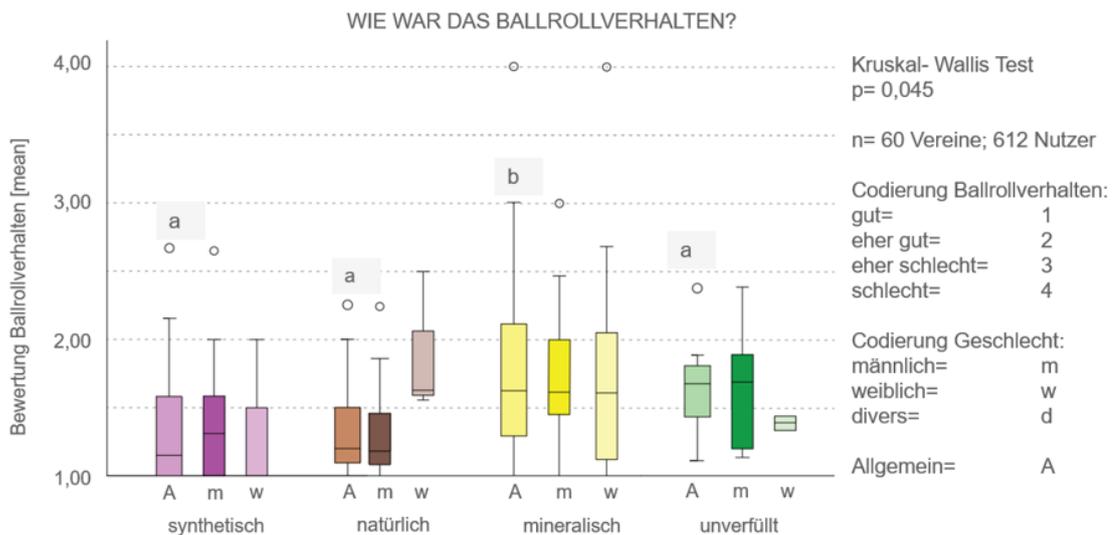


Abbildung 28: Bewertung des Ballrollverhaltens

Beim Ballrollverhalten ergibt sich ein schwach signifikanter Unterschied zwischen den Kunststoffrasensystemen ($p < 0,045$). Kunststoffrasenplätze mit synthetischem und mineralischem Füllstoff werden gut bis eher gut bewertet. Ein signifikanter Unterschied liegt zwischen synthetischer Füllstoff-Sand ($p=0,026$) und Sand-Kork ($p=0,035$) vor. Mineralisch verfüllte Kunststoffrasensysteme sind am schlechtesten bewertet worden (mean= 1,83) (vgl. Abbildung 28).

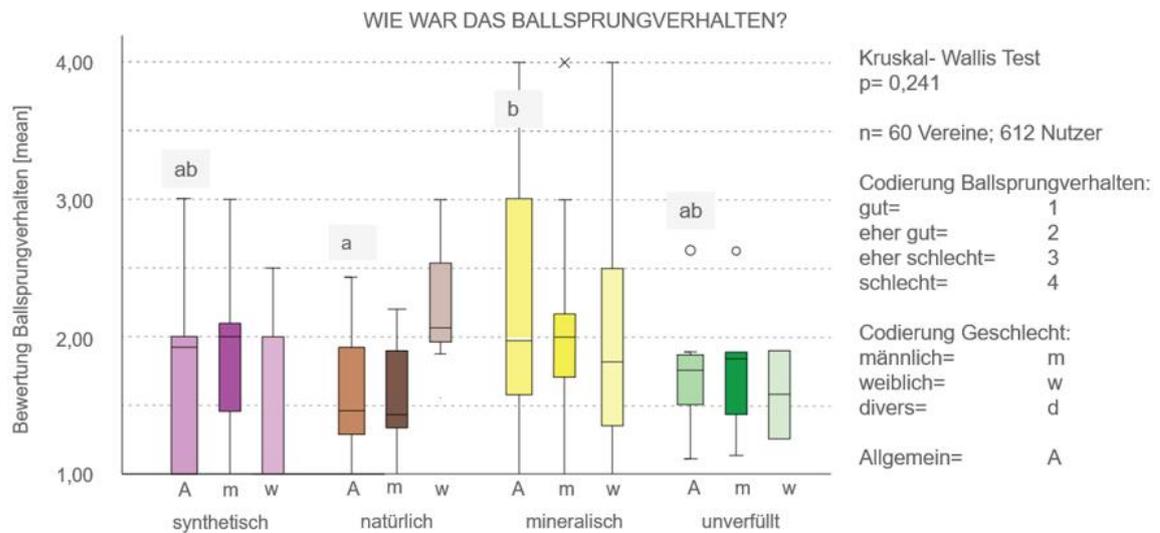


Abbildung 29: Bewertung des Ballsprungverhaltens

Zusätzlich zum Ballrollverhalten wurden die Nutzenden nach dem Ballsprungverhalten (Ballreflexion) befragt. Hierbei lässt sich nur ein tendenzieller Unterschied zwischen den Systemen feststellen. Der natürlich verfüllte Kunststoffrasen wird gut bis eher gut bewertet ($M= 1,57$). Bei mineralisch verfüllten Systemen wird das Ballsprungverhalten eher schlechter wahrgenommen ($M=2,1$) (vgl. Abbildung 29).

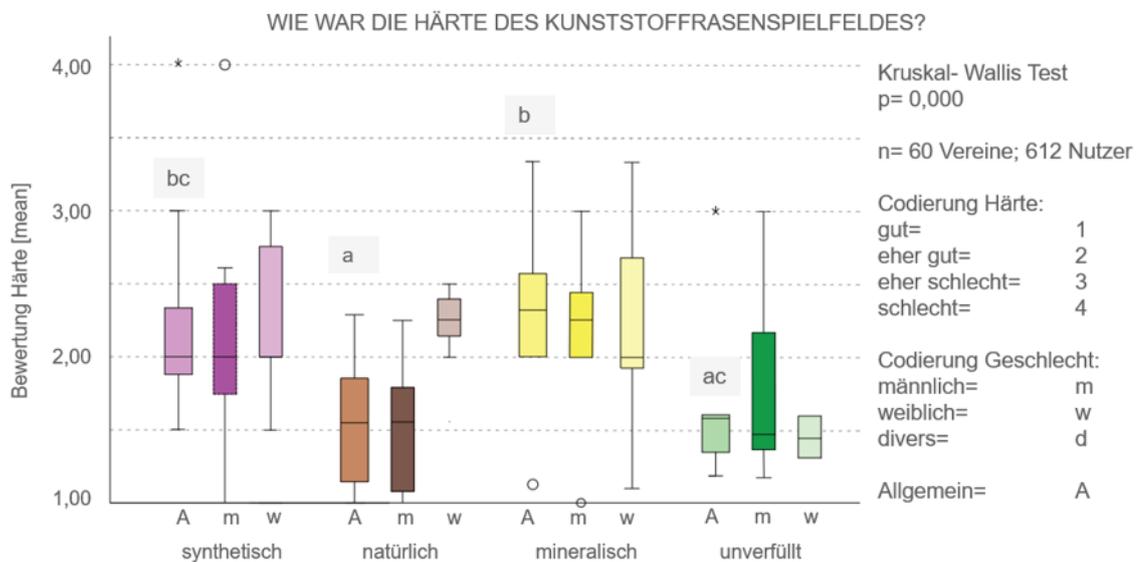


Abbildung 30: Bewertung der Platzhärte

Die Platzhärte wird ähnlich wie das Ballsprungsverhalten bewertet. Die mit natürlichen Stoffen verfüllten Systeme schneiden am besten ab (M=1,6). Ebenfalls wird das ungefüllte/teilverfüllte System gut bewertet, was die Eigenschaften der Platzhärte betrifft. Die ungefüllten und synthetisch gefüllten Systeme werden annähernd gleich bewertet.

Es wird deutlich, dass die Nutzenden eine Füllung des Platzes nicht benötigen, um die Platzhärte gut zu bewerten. Ebenfalls verdeutlicht die Umfrage, dass die Nutzenden ungefüllte Plätze den mineralischen Plätzen in Bezug auf die Platzhärte vorziehen. Es ist anzunehmen, dass die Platzhärte mit zunehmendem Platzalter schlechter bewertet wird (ÖISS o. J.). Mangelnde Instandhaltung und die Nutzungsintensität könnte die Platzhärte ebenfalls beeinflussen. Eine genaue Aussage ist hier jedoch nicht zu treffen (vg. Abbildung 30).

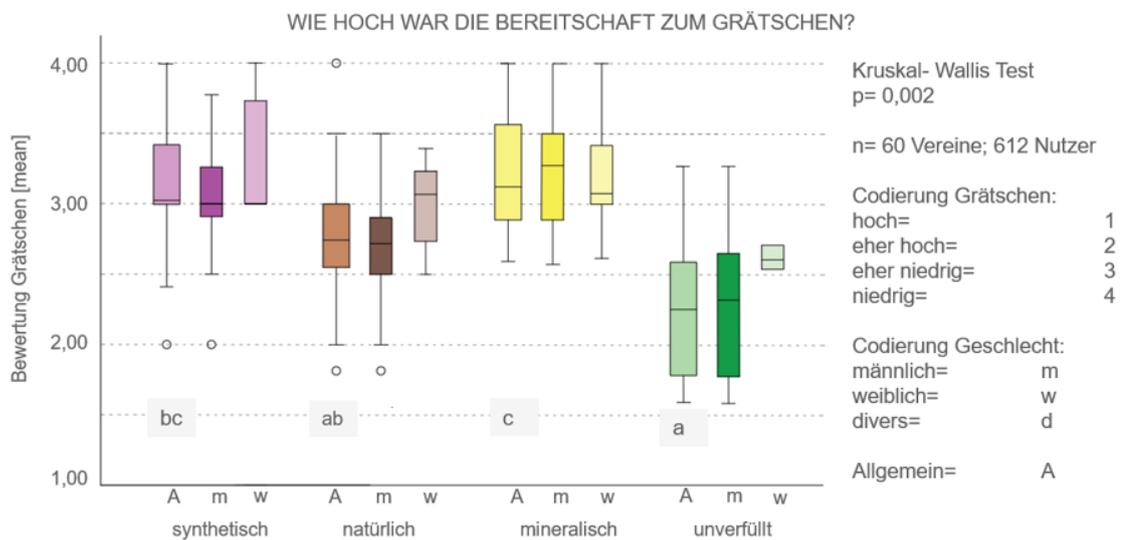


Abbildung 31: Bewertung der Bereitschaft zu Grätschen

Die Bereitschaft zum Grätschen wird je nach Kunststoffrasensystem signifikant unterschiedlich bewertet. Es liegen signifikante Unterschiede zwischen un-/teilverfüllten- synthetischen Füllstoffen (p= 0,003), un-/teilverfüllten- Sand- (p=0,001) und Kork-Sand-Systemen (p=0,020) vor. Ungefüllte/teilverfüllte Systeme werden bei der Bereitschaft zum Grätschen am besten bewertet (M = 2,3). Die Bereitschaft zum Grätschen wird auf gefüllten Plätzen, gerade bei mineralisch und synthetisch gefüllten Systemen eher niedrig bewertet. Hier ist die Bewertung von mineralisch gefüllten Systemen mit M= 3,2 am schlechtesten. Gerade bei synthetisch gefüllten Systemen variiert die Bewertung. 50 % der Befragten geben eine niedrige Bereitschaft zum Grätschen an. Es gibt aber auch Ausreißer, die mit 2,00 bewerten. Dies lässt darauf schließen, dass die Bereitschaft zum Grätschen stark von dem jeweiligen System abhängig ist und nicht zwangsläufig auf die Art des Kunststoffrasensystems zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 31).

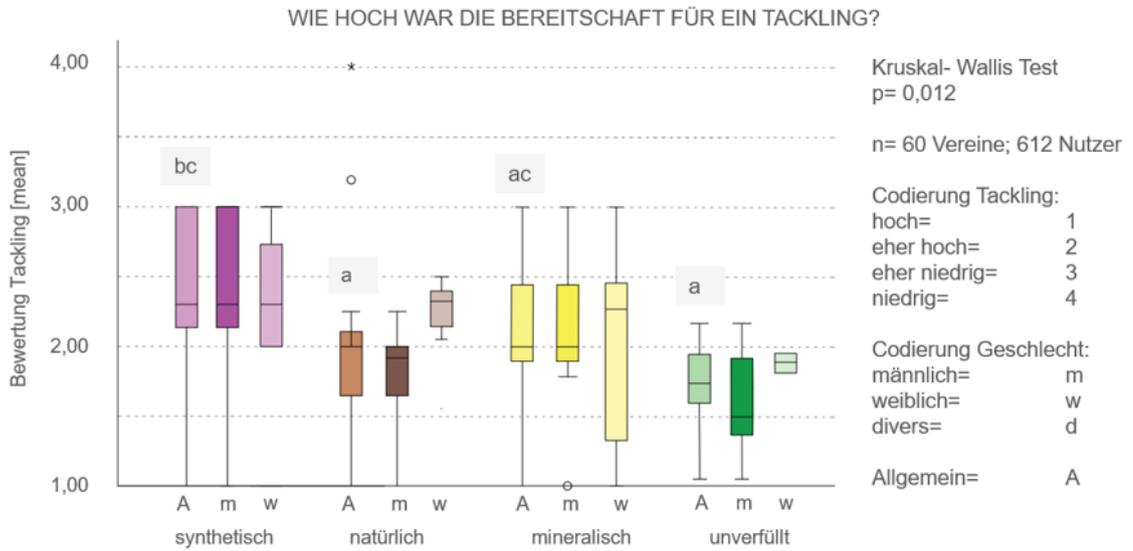


Abbildung 32: Bewertung der Bereitschaft für ein Tackling

Beim Tackling wird wie beim Grätschen ein aktives Verletzungsrisiko eingegangen. Grundlegend wird die Bereitschaft zum Tackling eher hoch bewertet (M=2,0). Beim direkten Vergleich zwischen un/teilverfüllten und synthetisch verfüllten Systemen wird ein starker Unterschied wahrgenommen. Ähnlich wie bei der Bereitschaft zum Grätschen wird der un-/teilverfüllte Kunststoffrasen mit 1,73 am besten bewertet. Die synthetisch gefüllten Plätze schneiden am schlechtesten ab. Hier spielen aber auch bei der Auswertung der Ergebnisse die allgemeinen Platzzustände eine wichtige Rolle. Da bei den Tendenzen häufiger Ausreißer zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 32).

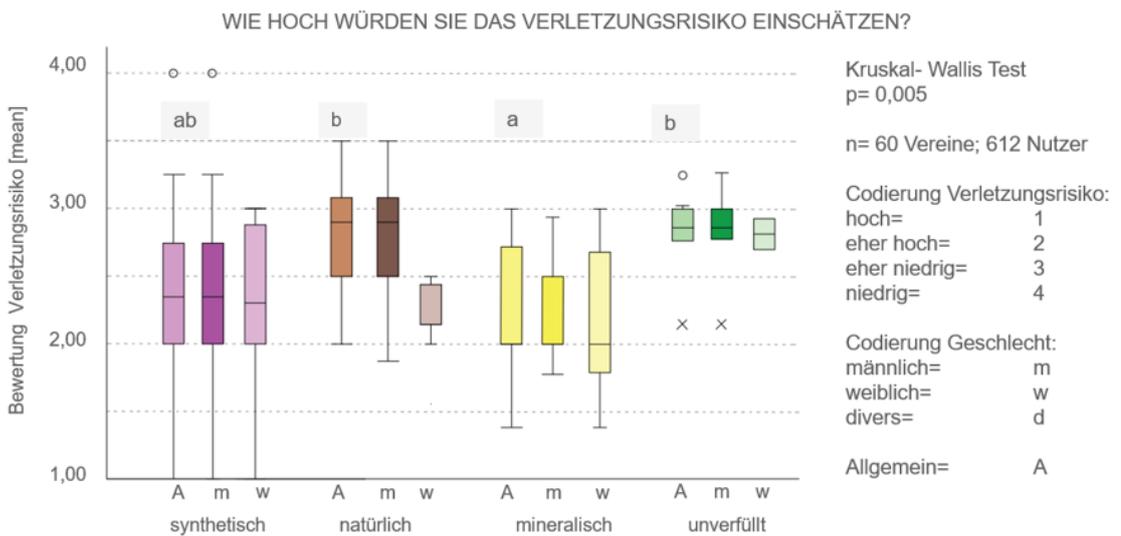


Abbildung 33: Bewertung des Verletzungsrisikos

Das Verletzungsrisiko auf Kunststoffrasenplätzen wird von den Nutzenden hoch eingeschätzt. Gerade zwischen Sand- Kork ($p=0,002$) und Sand- ungefüllten, bzw. teilverfüllten Systemen ($p=0,004$) ist ein statistischer Unterschied festzustellen. Bei natürlich verfüllten Systemen wird das Verletzungsrisiko im Mittel am niedrigsten eingeschätzt ($M= 2,8$). Auf un-/teilverfüllten Systemen wird das Verletzungsrisiko ebenfalls eher niedrig bewertet. Bei mineralisch- und synthetisch verfüllten Systemen wird das Verletzungsrisiko höher eingeschätzt (vgl. Abbildung 33).

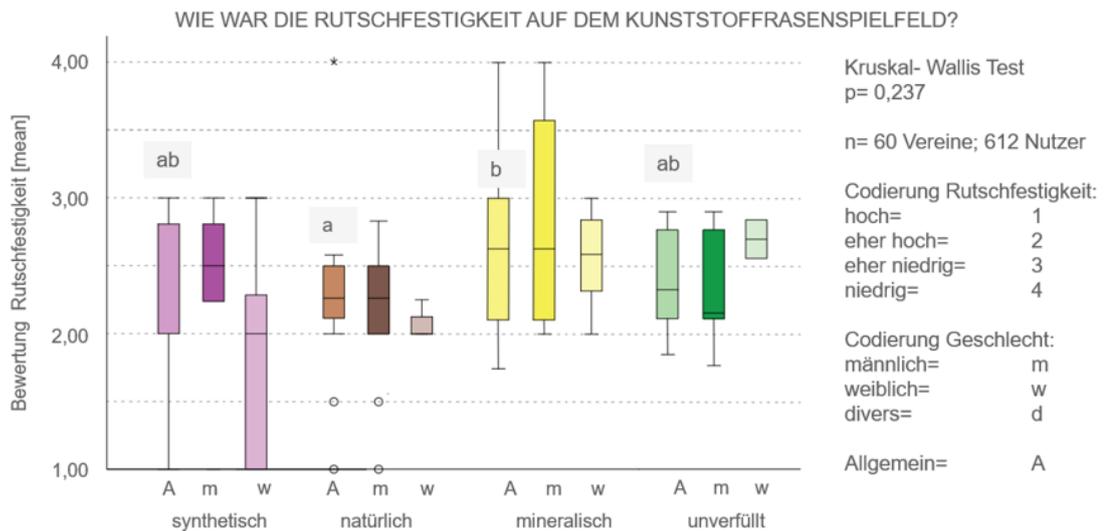


Abbildung 34: Bewertung der Rutschfestigkeit auf Kunststoffrasenspielfeldern

Neben dem Drehwiderstand und dem Kraftabbau hat die Rutschfestigkeit einen großen Einfluss auf die Aktionen der Nutzenden. Die Rutschfestigkeit wird bei allen Kunststoffrasensystemen im Bereich zwischen zwei und drei bewertet. Bei natürlichen und mineralischen Füllstoffen liegt ein signifikanter Unterschied vor (vgl. Abbildung 34).

Es kann festgehalten werden, dass Nutzende auf ungefüllten bzw. teilgefüllten Kunststoffrasensystemen die schutzfunktionellen Eigenschaften am besten wahrnehmen. Am schlechtesten werden die mineralisch verfüllten Systeme wahrgenommen. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Nutzenden als Ersatz zu synthetischen Füllstoffen die natürlichen Füllstoffe oder ungefüllten bzw. teilgefüllte Systeme bevorzugen würden. Abbildung 35 fasst die Ergebnisse zusammen.

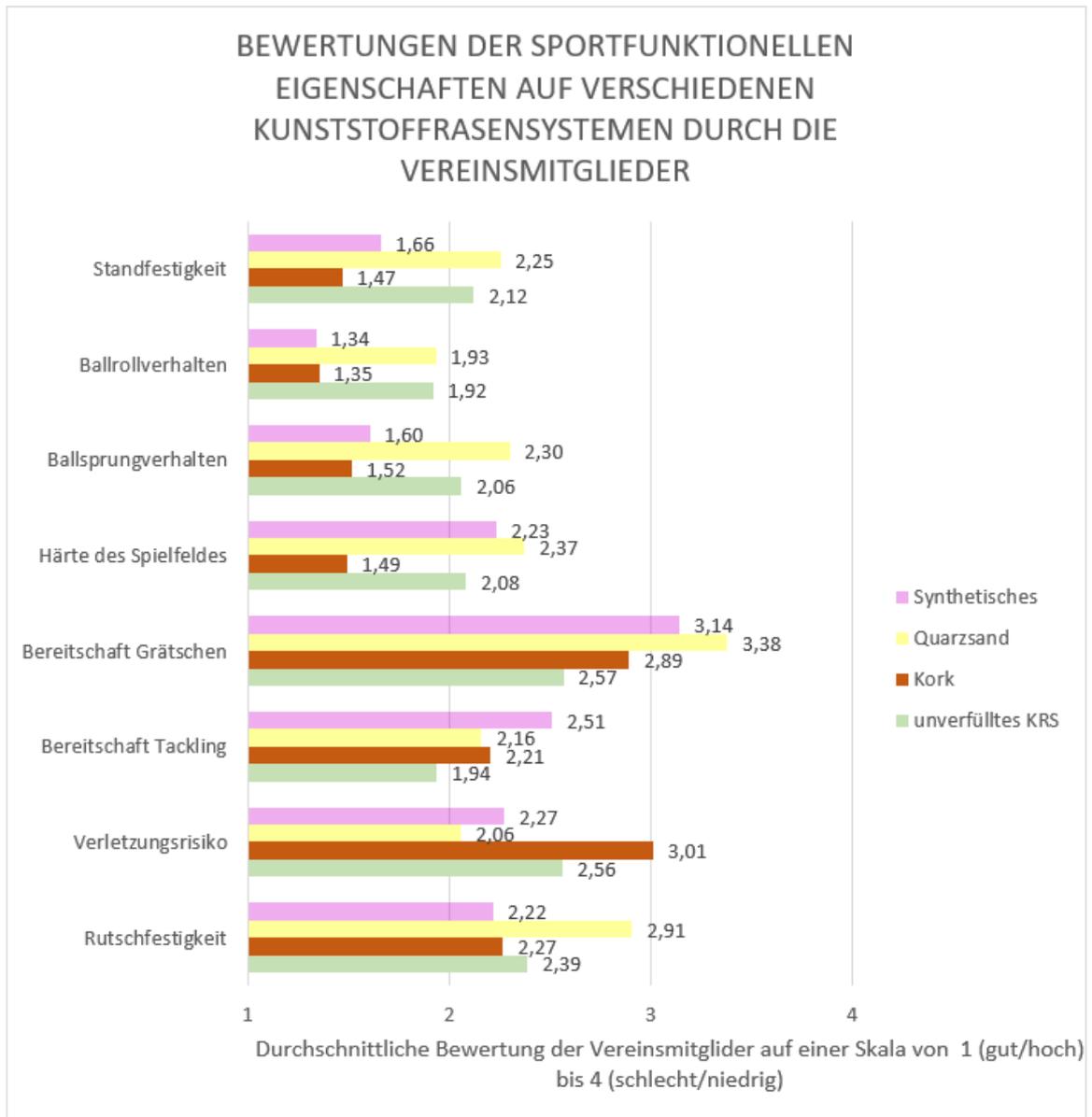


Abbildung 35: Zusammenfassende Darstellung der subjektiven Bewertung von Spieleigenschaften

6 Kunststoffrasensysteme ohne synthetischen Füllstoff

6.1 Kork als natürlicher Füllstoff

Die Korkeiche (*Quercus suber* L.) wird als Rohstoff für den natürlichen Füllstoff verwendet. Die Ergebnisse von acht kombinierten ökologischen Modellierungs- und zwei globalen Zirkulationsmodellen zeigen eine weitgehende Schrumpfung des potenziellen Verbreitungsgebiets der Art im einundzwanzigsten Jahrhundert, sowohl bei mittleren als auch bei hohen Emissionsszenarien. Gekoppelte Verschiebungen nach Norden, die hauptsächlich die iberische Halbinsel und Nordafrika betreffen. Synergien zwischen nischenbasierten, physiologischen und ökogenetischen Untersuchungen sind auf dem Gebiet der angewandten Forschung notwendig, um die Bewertung von Maßnahmen zur Erhaltung und Wiederaufforstungsmaßnahmen zu verbessern (Vessella et al. 2017). Im Zuge des Klimawandels sind die mediterranen Korkeichen-Wälder auf dem Rückzug: In Zukunft wird die Korkproduktion wahrscheinlich sinken.

Trotz der wirtschaftlichen Bedeutung der Korkeiche wurde die Ressource in den letzten Jahrzehnten vernachlässigt und zu wenig genutzt. Infolgedessen ist die Korkproduktion rückläufig und die Lebensräume werden mehr und mehr zerstückelt (Abbaci und Bekdouche 2019). In Algerien, Italien und Griechenland schrumpfen die Korkeichenwälder und damit die Korkproduktion, z. B. durch Zersiedlung, Abholzung, sehr geringe Aufforstung sowie generell geringe Wertschätzung.

Neupflanzungen in Bulgarien und der Türkei besitzen noch keinen Einfluss auf das Marktvolumen. Könnten in der Zukunft (50 bis 100 Jahre) aber eine Rolle spielen (Tsvetkov et al. 2017; Sen et al. 2016). Kork wird in der Weinindustrie verwendet, Tendenz steigend. Mengenanalyse zeigen, dass auf Dauer nur ein begrenzter, lokaler (insbesondere in Portugal) Einsatz im Baugewerbe o. ä. möglich sein wird (Göswein et al. 2021). Für die Verwendung von Kork als Füllstoff kann der Qualitätsunterschied des Rohstoffes problematisch sein. Der Kork, welcher in Bulgarien und der Türkei produziert wird, unterscheidet sich in der chemischen Zusammensetzung stark von Kork, welcher von der iberischen Halbinsel stammt. Die unterschiedliche Zusammensetzung wirkt sich später auf die mechanischen Eigenschaften des Füllstoffes aus. Gerade die Kompression des Füllstoffes ist davon betroffen (Sen et al. 2016). Auch Hauschild und Schneider (2017) geben die unterschiedliche Qualität des Rohstoffes als Problem an. Bei der Lebensdauer und dem damit verbundenen Erhalt der vollen technischen Eigenschaften von Korkfüllstoffen gibt Johansson (2018) vier Jahre an. Dies sind sechs Jahre weniger als die Lebensdauer von synthetischen Füllstoffen (Johansson 2018). Hierbei handelt es sich nicht um RAL-GZ 944:2022-10 zertifizierten Kork. Hauschild und Schneider (2017) sehen aus Erfahrungen und Untersuchungen Korkfüllstoffe als gute Alternative zu synthetischen

Füllstoffen im Bereich Schutz- und Sportfunktionen, führen aber die Witterungsanfälligkeit und vor allem das Fehlen von geeigneten Normen und Zertifizierungen als negativen Punkt für Korkfüllstoffe an.

Dickson et al. (2020a) untersuchen den Energieabbau und die Energierückgabe von einem Kork/Kokosnussfüllstoff und vergleichen diesen mit TPE und einem Füllstoff aus recycelten Sportschuhen. Für die Untersuchung wurde der gleiche Aufbau der Kunststoffrasensysteme gewählt und jeweils einer der drei Füllstoffe verwendet. Die Studie zeigt, dass der alternative Füllstoff ähnliche Energieabbau- und Energierückgabe-Eigenschaften aufweist wie der Füllstoff TPE (vgl. Abbildung 36). Außerdem haben die Partikelgröße und die Verteilung der Füllstoffe eine erhebliche Auswirkung auf den Energieabbau und die Energierückgabe von Kunststoffrasensystemen.

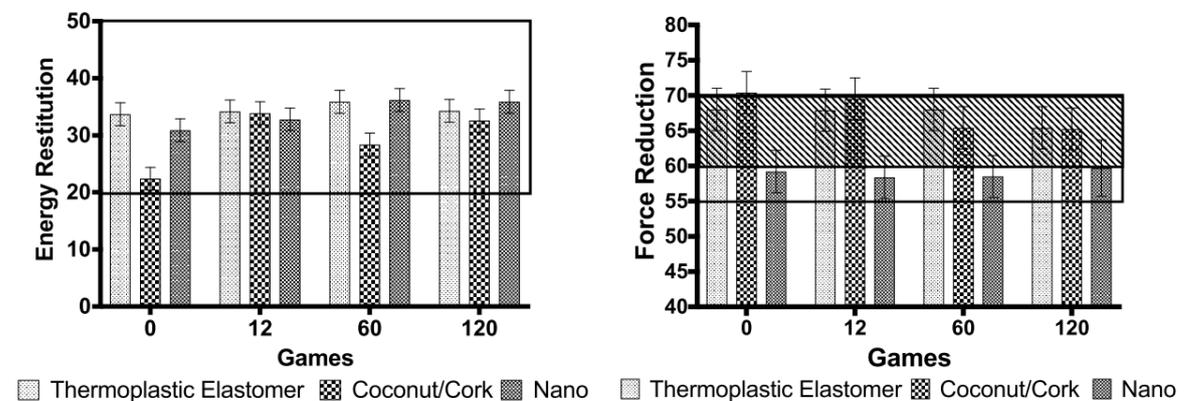


Abbildung 36: Vergleichende Untersuchung von Energieabbau und Energierückgabe bei Kork/Kokosnussfüllstoffen (Dickson et al. 2020a)

Kork hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Oberflächentemperatur des Kunststoffrasensystems geringer ist als bei synthetischen Füllstoffen. Aufgrund der Zellstruktur ist die Elastizität von Kork hoch und für den Spielbetrieb sehr gut geeignet (Hauschild und Schneider 2017). Andererseits bindet Kork Wasser durch Absorption und neigt bei Frost zur Aushärtung und Zerfall (Bauer et al. 2017). Bei heißen Temperaturen muss der Korkfüllstoff bewässert werden, ansonsten bleibt er an Schuhen und Kleidung hängen.

Bei der Verwendung von Korkfüllstoffen ist folgendes zu beachten:

- Bewässerungsempfehlung der DIN 18035-2:2020-09
- Trotz steigender Nachfrage und Preise konnte die europäische Korkproduktion in den letzten 15 Jahren nicht gesteigert werden (Göswein et al. 2021).
- In Algerien, Italien und Griechenland schrumpfen die Korkeichenwälder aufgrund von Zersiedlung, Abholzung, geringer Aufforstung (Abbaci und Bekdouche 2019).
- Neupflanzungen in Bulgarien und der Türkei besitzen noch keinen Anteil am Marktvolumen. Sie könnten frühestens in 50 Jahren einen Beitrag leisten (Tsvetkov et al. 2017; Sen et al. 2016).

- In Zukunft wird die Korkproduktion wahrscheinlich sinken, da aufgrund des Klimawandels die mediterranen Korkeichen-Wälder weniger werden (Vessella et al. 2017).

Unter Beachtung dieser Punkte kann folgender Korkbedarf berechnet werden:

Bedarf:

$1,5 \text{ kg/m}^2$ (Füllmenge) \times 8.000 m^2 (Platzgröße) \times 35.000 Plätze \times $1/8$ Jahre = **~50.000 t/Jahr**

Produktion bisher:

Die gesamte Produktion in der EU auf ca. **200.000 t/Jahr**

Ob es möglich ist solche Mengen für Kunststoffrasensysteme bereitzuhalten, muss an dieser Stelle offenbleiben.

6.2 Weitere natürliche Füllstoffe

Olivenkerne sind eine denkbare Alternative zu synthetischen Füllstoffen. Hierbei wird der Olivenpresskuchen, welcher als Restprodukt aus der Olivenölproduktion übrigbleibt, maschinell vom Fruchtfleisch getrennt, von Unreinheiten befreit, zermahlen und aufbereitet. Die Produktion verläuft rein mechanisch und es werden keine zusätzlichen Chemikalien verwendet. Der Füllstoff aus Olivenkernen hat eine hohe Stabilität, ist härte-, feuchtigkeits- und hitzebeständig. Die weichen Kanten des Füllstoffes sorgen für ein geringes Verletzungsrisiko. Ein Aufquellen oder eine Formveränderung bei wechselnden Temperaturen konnte nicht beobachtet werden (Stadionwelt 2023).

Ein weiterer natürlicher Füllstoff, wird aus **Zuckerrohr** gewonnen. Hierbei handelt es sich um einen sehr leichten Füllstoff, welcher ein erhöhtes Austragsrisiko aus dem System mit sich bringt. Außerdem neigt dieser bei Nässe zum kleben und verklumpen. Erste Versuchsfelder mussten zurückgebaut werden, da der Füllstoff an Kleidung und Schuhen zu sehr kleben blieb.

Auch **Holzfasern** könnten eine neue Alternative bei natürlichen Füllstoffen werden. Bislang fehlen Untersuchungen zu den technischen Eigenschaften und der Nutzbarkeit in Kunststoffrasensystemen.

Weltweit werden auch alternative Füllstoffe in der Praxis beprobt, die im Europäischen Raum noch keine Beachtung finden. So berichtet Redman (2021) von einem Kunststoffrasenplatz in Japan, der mit Restprodukten aus der Herstellung von grünem Tee gefüllt ist. Dieser wurde 2018 gebaut und bringt eine Einsparung von Kohlendioxid und eine niedrige Oberflächentemperatur mit sich. Der Füllstoffbedarf eines Kunststoffrasenplatzes mit 8.000 m^2 könnte aus den Restprodukten von der Herstellung aus 430.000 Flaschen grünem Tee gedeckt werden. Petrass et al. (2014) stellen fest, dass Kunststoffrasensysteme mit natürlichen Füllstoffen eine höhere Oberflächentemperatur aufweisen als Systeme mit TPE-Füllstoff. Die Kunststoffrasensysteme mit organischem Füllstoff haben wiederum eine niedrigere Oberflächentemperatur als SBR-gefüllte Plätze.

6.3 Patente für natürliche Füllstoffe

Für natürliche Füllstoffe existieren mittlerweile mehrere patentierte Produkte. Smollett et al. (2021) haben ein Patent für die Verwendung von speziell zerkleinerten Olivenkernen ohne antimikrobielle Zusatzstoffe angemeldet. In Zusammenhang mit der Gewichtsverteilung des Füllstoffes werden hier bessere technische Eigenschaften als bei herkömmlichen Füllstoffen angegeben.

Eine angepasste Füllmischung aus Korkteilchen und kleinerer glatter, harter Granulate, die dazwischen gefüllt werden, geben Harmeling et al. (2020) als Patent an. Aumonier et al. (2018) haben ein Patent für organische Füllstoffe, die unter anderem aus Olivenkernpartikel bestehen. Hierbei geht es unter anderem um eine geringe Siebkörnung der Partikel, die für den Füllstoff verwendet werden.

Bereits 2014 wurde das erste Patent für 100 % polymerfreien Füllstoff angemeldet, welcher aus einer Mischung von Kokosfasern, Kork und Reishülsen besteht.

Über die Füllstoffe hinaus gibt es auch Patente, die sich mit den Kunststoffrasenfasern beschäftigen. Siekmann und Sick (2019) meldeten ein Patent an, welches sich mit der Grundzusammensetzung für Kunststoffrasenfasern aus Naturrohstoffen beschäftigt. Hierbei wird eine Art von Polymerkomponente mit Hanffaser, Sackleinenfaser, Sisalfasern, Elefantengras, Baumwolle oder Kokosnusfasern kombiniert. Das Patent beinhaltet auch eine Mischung aus den natürlichen Rohstoffen.

6.4 Teilverfüllte Systeme

Niedrig mit Quarzsand verfüllte Plätze werden in DIN EN 15330-1:2013-12 als teilverfüllt bezeichnet. Der Quarzsand hat hier nur eine stabilisierende Wirkung, damit sich der Teppich nicht in der Fläche verschiebt. Der Sand hält die Kunststoffrasenfasern aber auch in aufrechter Position. Quarzsand hat abrasive und harte Eigenschaft. Zudem neigt Quarzsand dazu bei Nässe stärker zu verdichten als andere Füllstoffe (Scott 2016). Quarzsand hat eine höhere Dichte als andere Füllstoffe, muss aber auch im Laufe der Jahre nachgefüllt werden, da er durch die Nutzung und durch Witterung aus dem Kunststoffrasensystem ausgetragen wird.

6.5 Unverfüllte Systeme

Ungefüllte Kunststoffrasensysteme sind erst in den letzten Jahren in der Praxis umgesetzt worden und kommen ganz ohne Füllstoffe aus. Hier entfällt auch die Quarzsandfüllung, wie bei den niedrig verfüllten Kunststoffrasensystemen. Durch die fehlende Stabilisierungswirkung der Füllstoffe neigen die Kunststoffrasenfasern dazu sich bei Nutzung schneller abzulegen. Dies führt beispielsweise zu einer unerwünschten Erhöhung des Ballrollverhaltens (Bauer et al. 2017).

7 Vermeidung von sekundärem Mikroplastik

7.1 Fasern

Die Fasern eines Kunststoffrasensystemes müssen hohen äußeren Einwirkungen standhalten und gleichzeitig möglichst dauerhaft optimale Spieleigenschaften gewährleisten. Wichtige Eigenschaften sind neben der Lebensdauer und Verschleißfestigkeit die Elastizität, Garnfestigkeit, Bruchdehnung, Rückstellungsvermögen sowie die Weichheit (Hautfreundlichkeit) (DIN EN 15330-1:2013-12). Die ersten Kunststoffrasenfasern wurden aus Polyamiden (PA) hergestellt. Sie zeichneten sich durch optimale mechanische Eigenschaften aus, verursachten jedoch leicht Verletzungen durch Reibungsverbrennungen und besaßen eine geringe UV-Beständigkeit (Bauer et al. 2013). Als Alternative zu PA wurde bald das deutlich günstigere Polypropylen (PP) verwendet. Um die Eigenschaften von PP zu optimieren, wurde dieses mit PE zu einem Blockcopolymer gemischt, wobei der PP-Anteil deutlich überwog. Das Hauptproblem, die Reibungsverbrennungen, blieb jedoch bestehen (Bauer et al. 2013).

Der Wechsel zu einem hautfreundlichen Füllstoff ist zur Verbesserung des Gesamtsystems nicht zielführend, da die Fasern auf die Reibungseigenschaften einen deutlich höheren Einfluss als die Art der Füllung besitzen (Tay et al. 2015).

Als Lösung für das Problem bietet sich der deutlich hautfreundlichere PE an. Dieses neigt zu dauerhaften Verformungen. Um die Elastizität zu maximieren und gleichzeitig das Risiko von Hautabschürfungen zu minimieren, werden PA-PE-Bikomponentenfasern entwickelt. Die Hülle besteht aus hautfreundlichem PE und der Kern aus PA, welches die mechanischen Eigenschaften sicherstellt. Das Mischen unterschiedlicher Kunststoffe führt zu neuen Problemen beim Recycling (Hufenus et al. 2013).

Zunehmend werden aufgrund ihrer haptischen Attraktivität und Spielerfreundlichkeit „weiche“ Garne aus reinem PE verwendet. Dabei richtet sich die Wahl des PE-Typen nach den im FIFA-Qualitätskonzept für Kunststoffrasen festgelegten Anforderungen. Daher wird ein linearer Polyethylen mit niedriger Dichte (LLDPE) bevorzugt. Doch nicht nur das Material, sondern auch die Verarbeitungsbedingungen besitzen einen erheblichen Einfluss auf die Garnqualität. So wurde die Schrumpfung als wichtiges Maß für die entstehende Eigenspannung während des Extrusionsprozesses in LLDPE-Garnen identifiziert und kann mit der Leistung im Lisport-Test in Verbindung gebracht werden. Der Lisport-Test wird zur Bestimmung der Haltbarkeit von Kunststoffrasengarnen verwendet. Es hat sich gezeigt, dass eine verbesserte Haltbarkeit und Weichheit synergetisch mit einer überlegenden elastischen Rückstellung (Rückfederung) sind (Sandkuehler et al. 2010).

Trotz deutlich verbesserter Materialeigenschaften bleibt weiterhin die Hautverträglichkeit, Abrasion als Verletzungsrisiko, ein Hemmgrund für die Akzeptanz von Kunststoffrasenplätzen (Twomey et al. 2019).



Abbildung 37: Endlos extudierte LLDPE-Fasern für Kunststoffrasen

7.2 Langzeitverhalten

Das Fasermaterial wird über seine Lebensdauer starken Umwelteinflüssen ausgesetzt. In Kombination mit dauerhaft wechselhaften Belastungen führt diese zum Versagen technischer Eigenschaften des Materials. Die relevantesten Umwelteinflüsse sind Wärme, Sauerstoff, Strahlung und Feuchtigkeit. Sie führen zur autooxidativen Alterung des Polymers. Die Initiierung der Autooxidation erfolgt über die Bildung von Radikalen (Moleküle mit einem ungepaarten Elektron) infolge der verschiedenen Belastungen. Diese setzen eine autokatalytische (das Endprodukt besitzt eine katalytische Wirkung auf die Reaktion selbst) Kettenreaktion in Gang. Die größten Auswirkungen des Alterungsprozesses auf PE und PP sind eine Versprödung und Vergilbung des Materials. Damit verbunden ist eine Senkung der Festigkeiten und Zähigkeiten bis hin zur Entstehung von Oberflächenrissen. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist hierbei die Bildung von Hydroperoxiden (ROOH), welche zu einer Verzögerung der nachfolgenden Kettenreaktion führen. Die Induktionsperiode kann durch Einbringung von Stabilisatoren verlängert werden (vgl. Abbildung 38). Sie hemmen den Alterungsprozess und können die Gebrauchstüchtigkeit des Materials wesentlich verlängern. Es werden grundsätzlich vier verschiedene Typen von Stabilisatoren verwendet, welche üblicherweise im Bereich von 0,01 bis 2 % dosiert werden. Die Stabilisatoren werden in Abhängigkeit der Belastung

irreversibel verbraucht. Die Hauptstabilisatoren sind Antioxidantien, sie fungieren als Radikalfänger, die zum Abbruch der Kettenreaktion während des Autooxidationsprozesses führen. Weitere Stabilisatoren sind Costabilisatoren, welche die entstehenden Hydroperoxide zu Alkohol reduzieren und damit der Kettenreaktion entzogen werden. Lichtschutzmittel absorbieren die UV-Strahlung und wandeln sie in Wärme um, bevor die energiereiche UV-Strahlung (vor allem UV-A und UV-B) das Material schädigen kann. Die Lichtschutzmittel werden durch Lichteinwirkung nicht zerstört und bleiben daher über die ganze Lebensdauer erhalten. Als letzter Stabilisierungstyp werden Metalldesaktivatoren eingesetzt. Sie senken den schädlichen Einfluss von redoxaktiven Übergangsmetallen durch Komplexbildung mit geeigneten Chelatliganden (Krebs et al. 1998; Gugumus 2000; Zweifel 1997).

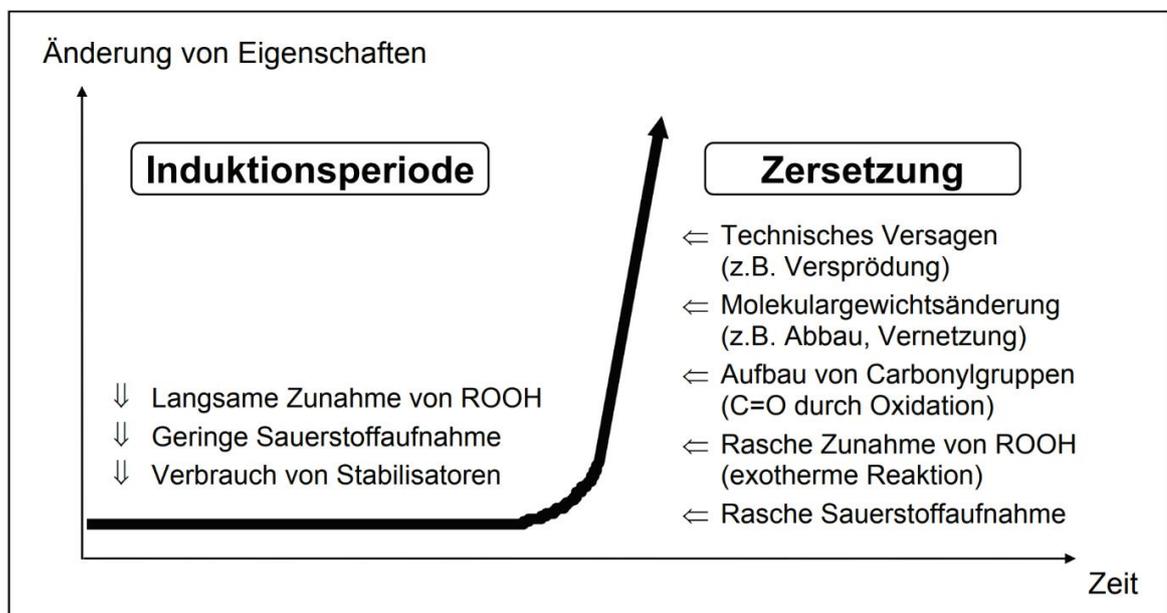


Abbildung 38: Einfluss der Zeit auf die Eigenschaftsänderung bei der Alterung von Thermoplasten (Zweifel 1997)

Übertragen auf Kunststofffasersysteme und dessen Auswirkungen auf die Umwelt bedeutet dies, dass die Dauer der Induktionsperiode die Lebensdauer der Fasern widerspiegelt. Sobald die Stabilisatoren verbraucht sind, die Eigenschaften sich schnell ändern und die Zersetzung des Materials beginnt, muss die Polschicht zurückgebaut werden. Falls das Kunststofffasersystem nach der Induktionsperiode weiterhin genutzt wird, kann dies zu einer schnellen Verschlechterung der Spieleigenschaften führen und zu einem deutlich höheren Faserverschleiß. Die Zunahme des Abriebs (sekundäres Mikroplastik) belastet unnötigerweise Mensch und Umwelt.

Baleki et al. (2008) weisen einen starken Einfluss der UV-Stabilisatoren auf die Haltbarkeit von Kunststoffrasenfasern nach. Schrier et al. (2022) konnten ein erhöhtes Risiko für kontaktlose Verletzungen bei gealterten Kunststoffrasensystemen identifizieren, wobei vor allem das Kniegelenk betroffen ist.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Langlebigkeit ist die Chemiebeständigkeit. Polymere können mit einwirkenden Medien reagieren. Dies kann zu Spannungsrissen führen, wodurch die einwirkenden Medien von der Oberfläche ins Innere der Polymere diffundieren und schließlich zum Bruch der Polymere führen. PE ist zwar gegenüber Säuren, Laugen und Alkoholen beständig, jedoch gegenüber Oxidationsmittel unbeständig. Daher ist bei der Verwendung von Bleich- oder Desinfektionsmitteln auf Kunststoffrasensystemen darauf zu achten, dass diese keine Oxidationsmittel enthalten. Typische Oxidationsmittel mit alltäglicher Bedeutung sind Ozon (O_3) und Peroxide, wie zum Beispiel Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Peroxyessigsäure (Abk. Peressigsäure) (Doležel 1978).

Im Rahmen des Winterdienstes wurde der Einfluss von Salz und UV-Strahlung auf das Fasermaterial untersucht. Dabei wurden keine Eigenschaftsänderungen durch Salzeinwirkung beobachtet. Eine UV-Bestrahlung zeigte hingegen unterschiedliche Veränderungen in der Zugfestigkeit und Dehnung. Da die Art und Menge von UV-Stabilisatoren eine wichtige Rolle bei der Degradation von PE-Fasern spielen, konnte keine spezifische Wirkung der UV-Strahlung festgestellt werden. Jedoch führte die Wärmeabsorption als Folge der UV-Bestrahlung zu einer erhöhten Dehnung und einer verringerten Steifigkeit, was zu einem Verlust an Reibung zwischen Ball und Rasen führen kann (Misund und Orvik 2020).

Es besitzen nicht nur Stabilisatoren einen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Aktive Füllstoffe können ebenfalls zur Eigenschaftsverbesserung beitragen. Hongling et al. (2014) untersuchten ein neues Fasermaterial aus LLDPE, welches mit 6 M-% Nanosiliziumdioxid (SiO_2) verfüllt ist. Das SiO_2 weist eine gute Dispersion in der Fasermatrix bei deutlich besseren mechanischen Eigenschaften auf. Vor allem in Bezug auf die maximale Zugkraft, die Bruchdehnung und den Abrieb können deutlich bessere Ergebnisse im Vergleich zu reinem LLDPE erzielt werden (Hongling et al. 2014).

Die Verschleißfestigkeit eines Kunststoffrasensystems hängt nicht nur vom Fasermaterial ab. In dem komplexen System können auch Fasergeometrie, Fasereinbindung, Tuftdichte, Fasergewicht und weitere Faktoren einen großen Einfluss ausüben. So besitzen zum Beispiel Fasern mit einer blattähnlichen Kubatur eine schlechtere Verschleißfestigkeit im Vergleich zu Fasern mit einer diamantförmigen Kubatur (Hufenus et al. 2010).

7.3 Prüfverfahren im System

Um die Verschleißfestigkeit von Kunststoffrasen zu bewerten, wird der Lisport-Tester nach DIN EN 15306:2014-07 verwendet (vgl. Abbildung 39). Dieser wurde speziell für Kunststoffrasensysteme

entwickelt und bietet eine realitätsnahe Belastungssimulation des kompletten Systems (inkl. Füllstoff). Diese Testmethode ist weitverbreitet und in der Industrie anerkannt. Sie weist jedoch mehrere Nachteile auf. So findet nur eine Sichtprüfung des Prüfkörpers statt. Dies führt dazu, dass Maserverluste nicht messbar sind und nur schwer eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Produkten möglich ist. Laut DIN EN 15306:2014-07 beträgt die aktuell geforderte Prüfdauer 20.200 Zyklen, dies simuliert eine Nutzung von etwa fünf Jahren. Es wird zur besseren Beurteilung der Lebensdauer dringend empfohlen die Zyklenzahl auf mindestens 200.000 zu erhöhen, dies würde eine Nutzung von 15 bis 20 Jahren simulieren, was der Nutzungsdauer von Kunststoffrasensystemen eher entsprechen würde. Des Weiteren wird empfohlen vor dem Verschleißtest eine künstliche Bewitterung des Probekörpers nach DIN EN ISO 4892-1:2016-10 durchzuführen. Zeitraffende Alterungsversuche an Polymerwerkstoffen führen zwar, aufgrund der Komplexität von Alterungsprozessen im Material, in der Regel nicht zwingend zu verlässlichen Vorhersagen hinsichtlich realistischer Gebrauchsdauer von Produkten, können aber einen orientierenden Charakter besitzen. (DIN EN 15306:2014-07; DIN EN ISO 4892-1:2016-10; Gugumus 2000).

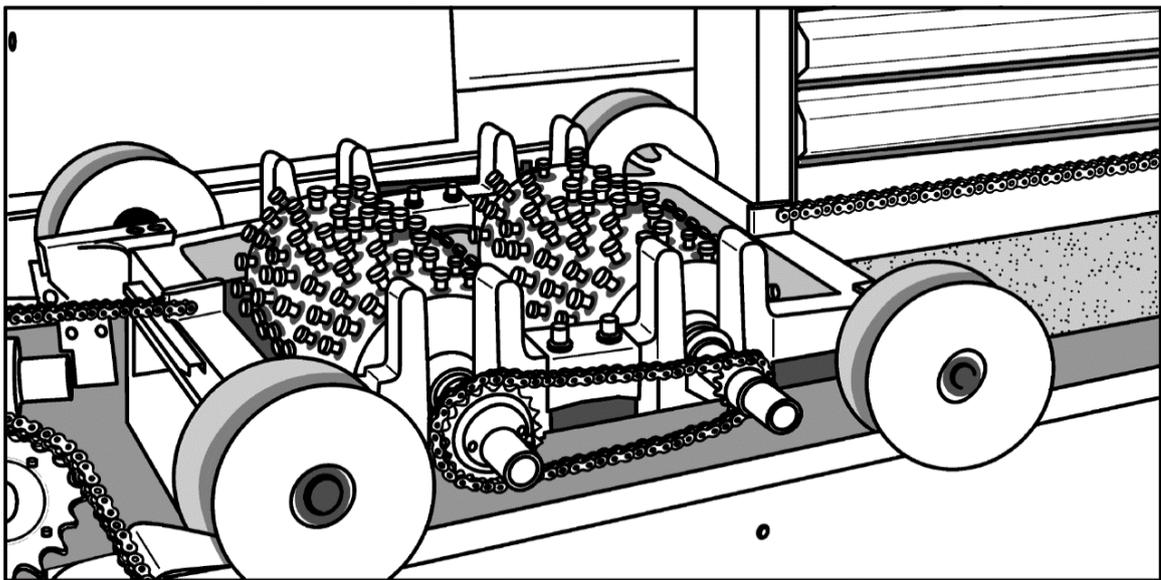


Abbildung 39: Verschleißmaschine (Lisport-Tester) nach DIN EN 15306:2014-07

7.4 Prüfverfahren zur Faserbeständigkeit

Der bisher verwendete Lisport-Tester nach DIN EN 15306:2014-07 zielt insbesondere auf die Schutz- und Sportfunktion eines Kunststoffrasensystems ab. Die Tatsache, dass hier nur eine optische Bewertung erfolgt, lässt keine Aussagen zur Faserqualität in Bezug auf die Vermeidung von sekundärem Mikroplastik zu. So wurde schon früh im FLL Arbeitskreis „Kunststoffe im Landschaftsbau“ erkannt, dass es einen speziellen Test für die Abriebbeständigkeit der verwendeten Kunststofffasern bedarf. Ein erster Entwurf eines solchen Tests ist mit dem Gelbdruck einer Technischen

Prüfbestimmung „TP-Synthetic Artificial Turf, Technical Conditions of Examination to determine microplastic emissions due to wear using the Lisson Tretrad machine“ im Juni 2023 vorgeschlagen worden. Dieser modifizierte Lisson Tretrad-Test zeigt valide Ergebnisse beim Vergleich der bekannten langlebigen Fasern und der weniger dauerhaften Fasern. Der Versuchsaufbau basiert auf dem Versuchsaufbau nach Lisson Tretrad nach DIN EN ISO 12951:2020-10 und wird ergänzt um eine Absauganlage zur Bestimmung der Masse des Faserabriebs. Abbildung 40 zeigt die modifizierte Tretrad Maschine.

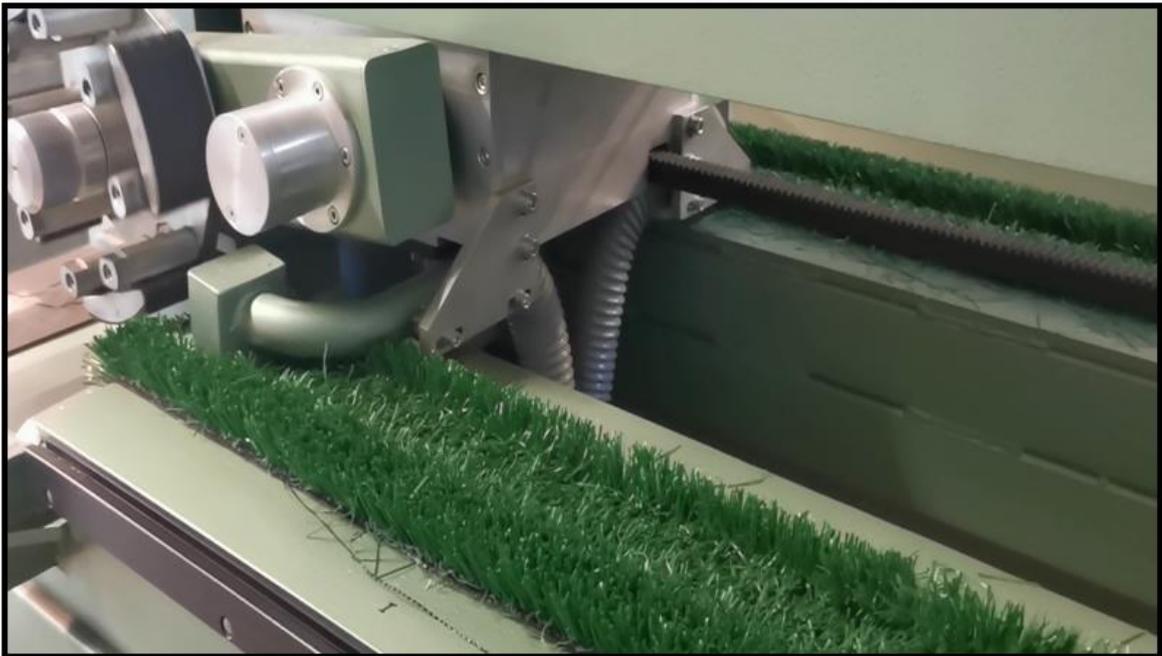


Abbildung 40: Durch Absauganlage modifizierter Lisson Tretrad-Test nach DIN EN ISO 12951:2020-10

Durch die definierte Absauganlage mit definiertem Filter wird nach 5.000, 10.000, 15.000 und 20.000 Zyklen die abgesaugte Masse bestimmt (vgl. Abbildung 41).



Abbildung 41: Kunststoffabrieb in der Absauganlage des modifizierter Lisson Tretrad-Test nach DIN EN ISO 12951:2020-10

Die vielversprechenden Ergebnisse werden zurzeit in einem Ringversuch auf Reproduzierbarkeit überprüft. Die bisher durchgeführten Versuche konnten die bekanntlich strapazierfähigen Fasern von den weniger verschleißbeständigen gut identifizieren. Offen ist noch die Frage, welche Kunststofffasersysteme in welcher Konfiguration in den Test eingebracht werden.

Nach den Angaben der Mitglieder im FLL Arbeitskreis ist dieser Versuchsansatz der einzig brauchbare Versuch zur Bestimmung des Faserabriebs zur Ermittlung von abriebbeständigen Fasern. Sofern dieser Test eingeführt werden kann, sind in einem weiteren Arbeitsschritt Grenzwerte festzulegen.

7.5 Abwasserbehandlungssysteme

Der Ansatz nach PD CEN/TR 17519:2020-07-29 den Austrag von Mikroplastik durch weitere bauliche Anlagen auf dem Kunststofffasersystem zuhalten, wird ergänzt durch Abwasserbehandlungsanlagen. Ursprünglich in Einzelfällen zur Rückhaltung eines möglichen PAK-Austrages angelegt, kam der Gedanke auf, damit auch den Austrag von Mikroplastik in die Umwelt zu verringern. Einer der Lösungsansätze ist die Verwendung von Filtersubstraten in platzbegleitenden Rinnen. Hier funktioniert das Filtersubstrat nach dem Prinzip der Oberflächenentwässerung. Es sollen abfiltrierbare

Feststoffe bis zu einer Größe von 0,45 μm , die zu der Feinkorngruppe AFS63 gehören, zurückgehalten werden. Darüber hinaus können auch Schwermetalle und Schadstoffe, wie PAKs aus dem abgeleiteten Wasser zurückgehalten werden.

Ein anderer Ansatz sind Abwasserbehandlungsanlagen, die sich an DWA-A 102 orientieren. Diese Abwasserbehandlungsanlagen sind in der Regel mit bauaufsichtlicher Zulassung versehen. Die danach zu erfüllenden Anforderungen richten sich jedoch nicht an eine Belastung des Abwassers mit Mikroplastik, sondern ausschließlich an Schadstoffe wie PAK, Zink u. a..

Die besondere Herausforderung für die Abwasserbehandlungsanlagen zur Rückhaltung von Mikroplastik ergibt sich aus dem spezifischen Gewicht (Wichte) der Kunststoffe, welches sich je nach Polymer und stofflicher Zusammensetzung um 1 N/m^3 bewegt und ermöglicht, dass diese in Wasser absinken können, auf der Oberfläche schwimmen oder im Wasser schweben. Kamerabefahrungen in solchen Anlagen zeigen dies deutlich. Eine weitere Herausforderung ergibt sich durch die Verwendung alternativer Füllstoffe. Diese können schnell zu Überlastungen der Anlage führen, wie Besichtigungen bestehender Anlagen vor Ort gezeigt haben.



Abbildung 42: Überlastete Abwasserbehandlungsanlage

Im Rahmen des Projektes wurde eine Arbeitsgruppe bei der FLL initiiert, da bisher Regelungen fehlten, welche Anforderungen an Rückhaltesysteme für sekundäres Mikroplastik zu stellen sind.

Ziel war es einen Prüfablauf zu entwickeln, damit die Wirksamkeit solcher Abwasserbehandlungsanlagen unabhängig geprüft werden kann. Aufgrund des zu erwartenden Inverkehrbringungsverbots von synthetischen Füllstoffen (Europäische Kommission o. J.) können die in der Literatur zu findenden Angaben, von 0,12 bis 6,5 Tonnen pro Jahr und Platz primärem Mikroplastik, nicht mehr zur Grundlage einer solchen Prüfung gemacht werden. Für eine Abwasserbehandlungsanlage zum

Rückhalt von sekundärem Mikroplastik aus Faserverschleiß sind aufgrund der oben anzunehmenden Mengen im worst-case $90 \text{ kg}/(\text{Platz} \times \text{a})$, also etwa $125 \text{ kg}/(\text{ha} \times \text{a})$ als zu erwartenden Mengen zugrunde zu legen.

Nach Arbeitsblatt DWA-A 102-2:2020-12 werden als Rechenwerte zu mittleren Konzentrationen im Regenwasserabfluss und flächenspezifischem jährlichem Stoffabtrag ($b_{R,a,AFS63}$) bei einer Bezugsgröße der angeschlossene befestigte Fläche ($A_{b,a} \cdot h_{Na,eff} = 560 \text{ mm/a}$) drei Belastungskategorien beschrieben. Diese reichen von 280 bis $760 \text{ kg}/(\text{ha} \times \text{a})$ und liegen damit weit über den, nach heutigem Stand, zu erwartenden Belastungen aus sekundärem Mikroplastik von Kunststoffrasensystemen.

8 Abfallbehandlung und Recycling

8.1 Problemstellung

In Deutschland existiert bisher kein umfangreicher Sportstättenatlas, sodass die Anzahl der Kunststoffrasenplätze nur geschätzt werden kann. Mit Hilfe von Satellitenbildern konnten Bertling et al. (2021) über 9.500 Kunststoffrasenplätze in Deutschland identifizieren. Dies entspricht 13 % aller Sportanlagen. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl in den nächsten Jahren zunehmen wird, da konstant neue Plätze gebaut werden und alte Plätze in der Regel instandgesetzt und nicht gänzlich zurückgebaut werden. In der Vergangenheit wurde während der Planung und beim Bau das Ende des Lebenszyklus meist nicht ausreichend bedacht. Inzwischen wurden zwar verschiedene Lösungsansätze entwickelt, um mit der großen Anzahl der Plätze umzugehen, welche in den nächsten Jahren zurückgebaut werden müssen. Aktuell wird jedoch noch ein Großteil der entstehenden Abfallmengen einer energetischen Verwertung zugeführt (Vacano et al. 2021). Da Kunststoffrasensysteme keinen eigenen Abfallschlüssel besitzen, wird das Aufkommen derzeit nicht getrennt statistisch erfasst. In einer Schätzung, welche von 58.000 existierenden Kunststoffrasenplätzen in Deutschland ausgeht, müssten jährlich 400 bis 450 Plätze erneuert werden (Leers 2020; Dufft 2020 in Wagner et al. 2022). Zusätzlich werden jährlich rund 150 neue Kunststoffrasenplätze angelegt. Demnach wird geschätzt, dass sich die Erfassungsmenge von aktuell 40.000 bis 62.500 t/a auf 70.000 bis 100.000 t/a bis 2030 steigern dürfte (Wagner et al. 2022). Dabei gelten die Schonung der natürlichen Ressourcen und der Schutz von Menschen und Umwelt bei der Bewirtschaftung von Abfällen als maßgebliche Ziele.

8.2 Abfallhierarchie

Nach dem Ende einer durchschnittlichen Lebensdauer von ungefähr 12 bis 15 Jahren wird das System durch den Rückbau seiner ursprünglichen Nutzung entzogen (Hahn 2020). Die verwendeten Komponenten gelten nach dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz als Abfall und sind nach der fünfstufigen Abfallhierarchie der europäischen Abfallrahmenrichtlinie zu behandeln (vgl. Abbildung 43). Dazu gehört die Vermeidung von Abfall, die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling, sowie die sonstige Verwertung und als letzte Stufe die Beseitigung.



Abbildung 43: Die fünfstufige Abfallhierarchie der europäischen Abfallrahmenrichtlinie

8.3 Abfall Vermeidung

Bei dem Bau eines Kunststoffrasensystems werden große Mengen an synthetischen Stoffen benötigt. Die höchste Priorität in der Abfallhierarchie besitzt die Vermeidung von Abfall. Daher sollte im Vorfeld sorgfältig überlegt werden, ob der Bedarf für ein Kunststoffrasensystem gegeben ist.

Während des Betriebs besitzt ein Naturrasenplatz, aufgrund des erforderlichen Mineraldüngers und des generell höheren Instandhaltungsaufwands höhere Umweltauswirkungen im Vergleich zu einem Kunststoffrasensystem bei voller Auslastung. Denn bei optimaler Auslastung besitzen Kunststoffrasenplätze eine geringere Umweltauswirkung pro Nutzungsstunde als Naturrasenplätze. Wird ein Kunststoffrasenplatz jedoch nicht optimal genutzt, ist aus ökologischer Sicht ein Naturrasenplatz häufig die bessere Wahl (Itten et al. 2020).

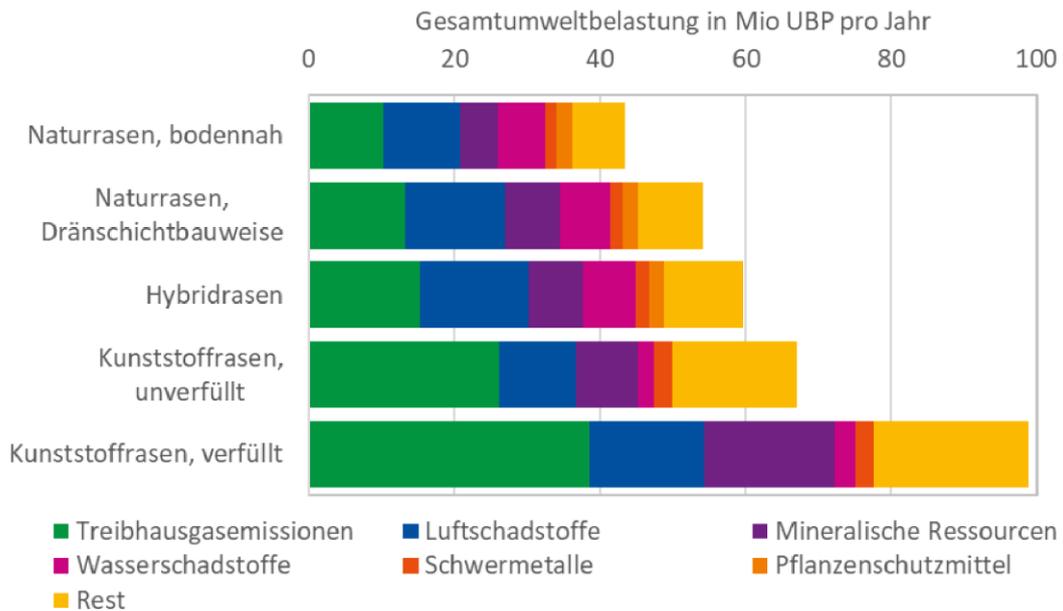


Abbildung 44: Umweltbelastung verschiedener Rasenspielfelder pro Jahr im Vergleich (Itten et al. 2020)

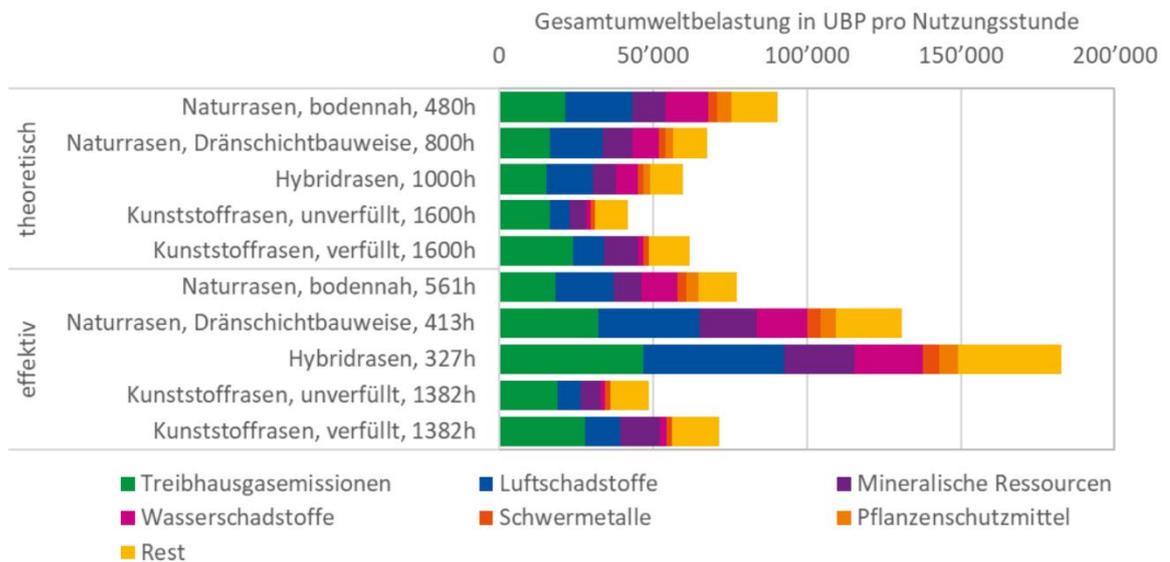


Abbildung 45: Umweltbelastung verschiedener Rasenspielfelder pro theoretischer und effektiver Nutzungsstunde im Vergleich (Itten et al. 2020).

Es existieren verschiedene Alternativen zu einem Kunststoffrasensystem, welche in Betracht gezogen werden sollten. Dazu zählt die Nutzung eines Kiesplatzes durch Ansaat als Wintertrainingsplatz, sowie mobile Kunststoffrasensysteme, welche auf Parkplätzen, Tennenflächen oder Industrieflächen installiert werden können. Die Kombination von Naturrasen und Kunststoffrasen in Form von Hybridplätzen sind für Trainingsfelder für den Breitensport bisher keine Alternative (Schwarz 2014).

8.4 Vorbereitung zur Wiederverwertung

Das Ende des Lebenszyklus muss bereits am Anfang bei der Planung und dem Design berücksichtigt werden (Design for Recycling). Ein großes Problem beim späteren Recyceln von Kunststofffasenplätzen ist die Verwendung unterschiedlicher Materialien.

So ist es zum Beispiel nur sehr schwer möglich die Latex-Beschichtung, welche das Trägergewebe mit den Fasern verbindet, wieder zu entfernen. Dies wäre nur mit Hilfe von umwelt- und humantoxischen Lösungsmitteln unter einem enormen Aufwand mit hochleistungsfähigen Filtereinheiten zu realisieren (Bottenberg et al. 2014).

Durch rein mechanische Verfahren können unterschiedliche Polymere nicht ganz getrennt werden. So eignen sich Rezyklate, welche zum Beispiel aus einer Mischung von PE, PP oder PA bestehen, nicht für den Einsatz in der Faserextrusion (Wagner et al. 2022).

In der Abbildung 46 ist exemplarisch eine mikroskopische Aufnahme eines PE/PA Compound mit 80 % PE und 20 % PA abgebildet. Rechts ist die Neuware zu sehen und links das gleiche Material nach einem Recyclingdurchgang. Zu erkennen ist die Entmischung, welche zu deutlich schlechteren Materialeigenschaften führt.

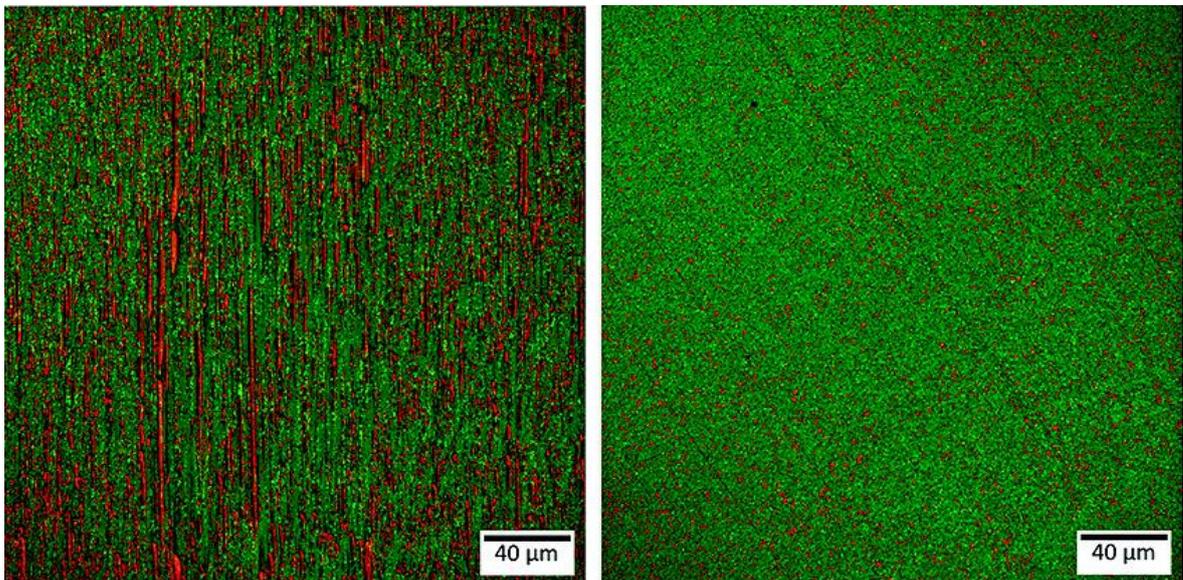


Abbildung 46: Mikroskopische Aufnahme eines PE/PA Compound. PE (grün) und 20 % PA (rot). Rechts: Neuware. Links: Rezyklat. (Bildquelle: BASF o. J.)

Eine Herausforderung am Design eines Kunststofffasensystems aus nur einer Polymersorte ist die Befestigung der Fasern im Trägergewebe ohne Verwendung von Latex oder Polyurethan-Klebern. Auf diesem Gebiet wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Nicht trennbare Materialgemische sind schlecht für ein hochwertiges Recycling, daher sind Kunststofffasensysteme aus einem Polymer zu bevorzugen (Knebel 2021).

8.5 Recycling

Am Ende des Lebenszyklus wird ein Kunststoffrasensystem zurückgebaut. Das vollständige Recycling aller Komponenten zu qualitativ hochwertigem Rezyklat ist technisch anspruchsvoll und wird aktuell nur von wenigen Firmen angeboten.

Die stoffliche Verwertung beschränkte sich in der Vergangenheit auf die Füllung. Diese kann durch Sieben und Klopfen relativ einfach vom restlichen System getrennt werden. Bei rein sandgefüllten Plätzen kann der Sand häufig wieder im Sportplatzbau verwendet werden, auch wenn dieser schon mit Mikroplastik versetzt ist. Bei gemischten Füllungen ist ein Trennen des Sandes vom elastischen Füllstoff aufgrund der verbleibenden Verunreinigung nur schwer zu realisieren. Das Füllstoffgemisch wird meistens entweder an andere Nutzenden, wie die Bauindustrie, weitergegeben oder muss komplett entsorgt werden. Deutlich einfacher gestaltet sich der Rückbau ungefüllter Systeme, da dort die oben beschriebenen Probleme nicht auftreten (Wagner et al. 2022).

Seit 2 bis 3 Jahren ist es üblich, den abgespielten Kunststoffrasen stofflich durch mechanisches Recycling zu verwerten. Dort wird das Material in der Regel geschreddert, ggf. weiter thermisch behandelt und das gewonnene Rezyklat in der Kunststoffindustrie weiterverwendet. Diese Stoffe eignen sich aufgrund der minderen Qualität nur begrenzt zur Herstellung von neuen Kunststoffrasenfasern. In kleineren Mengen kann dieser bereits in neues Fasermaterial gemischt werden.

Um den Anteil des Rezyklats im Kunststoffrasensystem deutlich zu erhöhen, bietet sich neben dem bereits großtechnisch etablierten mechanischen Recycling als Ergänzung das chemische Recycling an. Durch Verfahren des **chemischen Recyclings** gelangt man zurück zu Monomeren oder den Rohstoffen, so dass am Ende wieder Neuware für alle Einsatzgebiete von Kunststoffen entsteht. Die Vielfalt von chemischen Recyclingverfahren ist groß. Die Kapazitäten der Anlagen sind heute noch gering und die Wirtschaftlichkeit wird stark vom Ölpreis beeinflusst. Die Rentabilitätsgrenze liegt derzeit bei einem Preis zwischen 50 und 60 US-\$ pro Barrel, was bedeutet, dass diese Verfahren zurzeit nicht wirtschaftlich sind (Maisels et al. 2021).

Versuche in der Automobilbranche haben gezeigt, dass das Verfahren der Pyrolyse rein technisch möglich ist. Es konnten bei den Versuchen 55 % des gebundenen Kohlenstoffes als chemischer Grundstoff zurückgewonnen werden. Hohes Potential und Wirtschaftlichkeit der Prozesskette könnte in naher Zukunft gegeben sein (Hennig et al. 2022).

Mit einer Kombination aus mechanischem und chemischem Recycling kann ein hoher Rezyklatanteil auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft realisiert werden. Im Bereich Kunststoffrasen sind diese Verfahren bisher aus der Marktbeobachtung nicht bekannt.

8.6 Rezyklat

Aufgrund der schlechten Rezyklatqualität, welche durch das Materialgemisch eines typischen Kunststoffrasensystemes bedingt ist, ist der Markt für Kunststoffrasen-Rezyklate eher begrenzt. Um die Rezyklatqualität zu steigern, wäre es sinnvoll, alle Bestandteile des Kunststoffrasensystems zu deklarieren. So kann mit Hilfe von Readditivierung im Recyclingprozess, welche stark vom jeweiligen Eingangsstrom abhängt, die notwendige Qualität im geforderten Maß sichergestellt werden (Hanel und Roth 2021).

Um die Etablierung von Rezyklat-Märkten zu ermöglichen, ist nicht nur die Deklaration des Ausgangsstoffs wünschenswert, sondern ebenso wichtig die Deklaration des Rezyklats. Es existieren bereits erste Normen zur Charakterisierung von Kunststoffabfällen. Exemplarisch wird auf die DIN EN 15347:2008-02 verwiesen. Zu empfehlen ist des Weiteren eine Anlehnung an die DIN SPEC 91446:2021-12 (vgl. Abbildung 47). Dieses „intelligente“ Etikett speichert Informationen wie Faserherkunft, Materialkomposition und Beschaffenheit des Materials und sortiert die Materialien nach unterschiedlichen Datenqualitätsleveln. Dadurch können Recyclingunternehmen die Produkte besser sortieren, den Rezyklatanteil erhöhen und aufwerten.

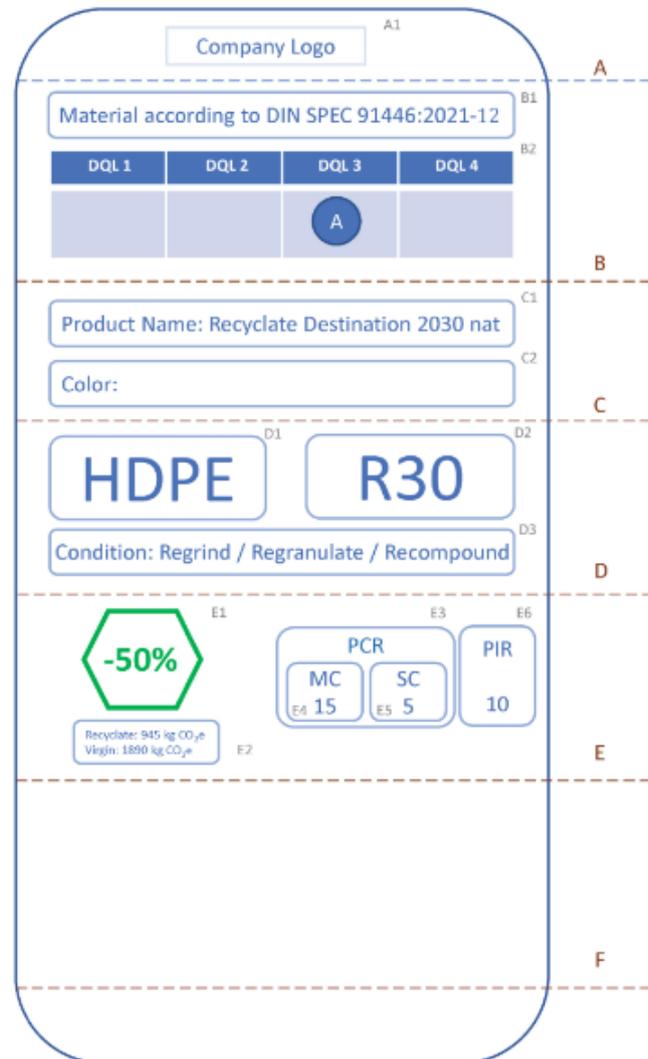


Abbildung 47: Deklarationsetikett mit Datenqualitätsleveln nach DIN SPEC 91446:2021-12

8.7 Sonstige Verwertung und Beseitigung

Aufgrund mangelnder Verwertungskapazitäten und aus wirtschaftlichen Gründen wurde, in der Vergangenheit, der anfallende Abfall meistens thermisch verwertet. Da die Abfallströme nicht statistisch erfasst werden, ist der Verbleib von einem Großteil der zurückgebauten Plätze fraglich. Es liegt die Vermutung nahe, dass zum Teil alte Plätze exportiert und deponiert werden. Derzeit beruhen alle Angaben zum Aufkommen und zu Verwertungswegen auf Expertenschätzungen und Angaben einzelner Kommunen. Damit in Zukunft die Abfallströme erfasst werden können und eine Nachverfolgung zurückgebauter Kunststoffrasensysteme möglich ist, empfiehlt das Forscherteam alle Kunststoffrasensysteme in einem Sportplatzkataster zu erfassen.

Dieses sollte folgende Angaben enthalten:

- Standort,
- Eigentümer die Fläche,
- Produktbezeichnungen mit Eigenschaften wie Höhe und Art des Füllstoffes,
- Einbaudatum,
- geplantes Ausbaudatum,
- Art der geplanten Verwertung.

Ergänzend zu diesem Kataster ist ein eigener Abfallschlüssel für Kunststoffrasensysteme einzuführen. Aktuell wird gefüllten Kunststoffrasensystemen der Abfallschlüssel 17 02 03 (Bau- und Abbruchabfälle – Kunststoff) und Kunststoffrasensysteme ohne Füllstoff der Abfallschlüssel 19 12 04 (Abfälle aus der mechanischen Behandlung – Kunststoff und Gummi) zugeordnet. Nur mit einem eigenen Abfallschlüssel kann eine klare Nachverfolgung gewährleistet werden und illegale Lagerung oder unerwünschte Exporte verhindert werden (Wagner et al. 2022).

Gleichzeitig existiert ein kleiner Markt für gebrauchte Kunststoffrasenplätze. So wird geschätzt, dass 2017 maximal 10 % der zurückgebauten Plätze als Gebrauchtware weiterverkauft wurden. Aufgrund des hohen Transportaufwandes und des schlechten Zustandes von alten Plätzen ist davon jedoch abzuraten. Vor allem vor dem Hintergrund, dass nach dem Ende der maximalen Nutzungsdauer die Mikroplastikemission deutlich steigt (Eunomia Research & Consulting Ltd 2017). Die Kunststoffrasenweitergabe, wie sie zum Beispiel vom europäischen Hockeyverband organisiert wird, ist somit kritisch zu hinterfragen (EHF 2018 nach Wagner et al. 2022).

Die aktuell aufkommende Idee Kunststoffrasensysteme aus kompostierbaren Materialien herzustellen, wurde in diesem Projekt nicht untersucht.

Bisher existieren keine Ökobilanzen für die unterschiedlichsten Verwertungsverfahren von Kunststoffrasensystemen, da ein umfassendes Recycling erst seit wenigen Jahren verfügbar ist. International werden die meisten Kunststoffrasensysteme am Ende ihrer Lebensdauer deponiert. In Deutschland ist das Deponieren von Kunststoffabfällen verboten. Er darf nur thermisch oder stofflich verwertet werden (Wagner et al. 2022).

8.8 Fazit Kunststoffrasen-Recycling

Aus den gefundenen Studien zum Thema Kunststoffrasen-Recycling lassen sich im Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft folgende Schlüsse ziehen:

- Zur Vermeidung von Abfall sollten umweltgerechte **Alternativen** zu Kunststoffrasensystemen während der Planungsphase geprüft werden.
- Für die aktuellen Recyclingverfahren sind **ungefüllte** Kunststoffrasensysteme, welche aus **nur einer Polymersorte** bestehen und dessen Additive deklariert sind, zu bevorzugen.
- Eine **Deklaration des Rezyklats** unterstützt die entstehenden Rezyklat-Märkte.
- Zur weiteren Unterstützung entstehender Rezyklat-Märkte sollten Produkte, unabhängig von Kunststoffrasen, mit **hohem Rezyklatanteil** bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften bevorzugt werden.
- Ein umfassendes **Sportplatzkataster** und ein eigener **Abfallschlüssel** für Kunststoffrasensysteme schafft die Möglichkeit zur Erfassung der bestehenden Plätze und deren Abfallströme.
- Kunststoffrasensysteme, welche ihre maximale Lebensdauer überschritten haben, müssen **zeitnah zurückgebaut** werden, um eine erhöhte Umweltbelastung durch deutlich höhere Mikroplastikemissionen zu vermeiden.

9 Hinweise für Normungsarbeit

9.1 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Bisher werden in der europäischen Normung, z. B. DIN EN 15330-1:2013-12, keine umweltrelevanten Anforderungen gestellt. In DIN 18035-7:2019-12 werden Anforderungen nur in einem informativen Anhang empfohlen. Verbindliche Anforderungen gibt es auch hier nicht. Dies kann auch damit begründet werden, dass nationale Normungen nicht den Bauproduktverordnungen der Europäischen Union widersprechen dürfen. Es geht unter anderem um Vermeidung von Marktzugangsbeschränkungen durch nationale Regelungen. Es ist anzustreben, dass zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Kunststoffsystemen zumindest die Regelungen in DIN 18035-7:2019-12 in Tabelle B.1 als verbindlich in die Europäische Normung überführt werden.

Einen ersten Ansatz liefert die Arbeitsgruppe rund um die Einführung eines Blauen Engels und entspricht dem, was die Auswertung der Literatur in diesem Projekt zeigt. Zu ergänzen sind diese Anforderungen um das Verbot der Verwendung folgender Stoffe (vgl. Blauer Engel 2023):

- Einstufung gemäß der Verordnung 1272/2008 oder Erfüllung von Kriterien für eine solche Einstufung,
- Identifikation unter der REACH-Verordnung als besonders besorgniserregend identifiziert und Aufnahme in die gemäß REACH Artikel 59 Absatz 1 erstellte Liste (sogenannte „Kandidatenliste“),
- PFAS als konstitutioneller Bestandteil oder als Hilfsmittel im Produktionsprozess,
- weichmachende Substanzen aus der Klasse der Phthalate,
- unzulässige Farbstoffe und Pigmente nach gesonderter Liste.

Der Blaue Engel (2023) schlägt außerdem Grenzwerte für weitere Stoffgruppen in den verwendeten Kunststoffen vor:

- Benzo(a)pyren
- PAK₁₆
- Summe aus PCB₆ und PCB-118
- PAK₁₅ (PAK₁₆ ohne Naphthalin und Methylnaphthaline)
- Thallium
- Nickel
- Kupfer
- Quecksilber
- Arsen
- Halogene (EOX)
- Blei
- Zink

Der Blaue Engel (2023) schlägt weiter zur Prüfung der Ökotoxizität folgende Prüfungen vor:

- Leuchtbakterien (*Vibrio fischeri*),
- Algen (*Raphidocelis subcapitata* oder *Desmodesmus subspicatus*),
- Krustentiere (*Daphnia magna*),
- umu-Test.

Der Blaue Engel (2023) schlägt auch Grenzwerte für weitere Stoffgruppen in Sand vor:

- 2,4-Dinitrotoluol,
- 2,6-Dinitrotoluol,
- DDT (Dichloridphenyltrichlorethan),
- Hexachlorbenzol,
- Hexachlorcyclohexan (HCHGemisch oder Beta-HCH),
- 2,2', 4,4',6,6'-Hexanitrodiphenylamin (Hexyl),
- 1,3,5-Trinitro-hexahydro-1,3,5-triazin (Hexogen),
- Nitropenta,
- Pentachlorphenol,
- PAK16 vertreten durch Benzo(a)pyren,
- PCB6,
- 2,4,6 Trinitrotoluol (TNT).

Weitere Stoffe, die in Zukunft zu betrachten sind, könnten Fluortelomeralkohole (FTOH) sein.

Wenn die europäischen Normungsgremien, z. B. aus Marktinteressen, hier keine Bereitschaft zur Anpassung zeigen, müssten Auftraggebende selber aktiv werden und entsprechend der o.g. Liste Anforderungen in den Vergabeunterlagen formulieren. Auch ist denkbar, dass hier außerhalb des Deutschen Instituts für Normung Regelwerkgebende bereit sind, aktiv zu werden. Zudem wäre es denkbar, ein neues Europäisches Normungsgremium zu initialisieren, welches sich mit Umweltanforderungen von Kunststoffsportflächen beschäftigt, die im Freien verwendet werden.

Weitere Informationen sind im LANUV Arbeitsblatt 53 „Kunststoffhaltige Tretschichten auf Reitplätzen“ herausgegeben vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021) nachzulesen.

9.2 Deklarationspflicht

Eine Pflicht zur umfassenden Deklaration aller Inhaltsstoffe ergibt sich aus zwei Gründen:

- Nur bei Kenntnis aller Inhaltsstoffe ist ein Recycling der End-of-Life/Post-Consumer-Kunststoffe in einer hochwertigen Wiederverwendung möglich. Sind die Inhaltsstoffe nicht bekannt, erfolgt in der Regel ein Downcycling von Stoffen.

- Die Bewertung, welche Stoffe toxisch sein können, ändert sich sehr schnell. Nur wenn alle Stoffe deklariert werden, können Kunden angemessen und schnell reagieren.

Demgegenüber steht das betriebseigene Knowhow der produzierenden Industrie, die laufend versuchen, die verwendeten Polymere zu verbessern. Es ist zu vermuten, dass auf deutschen Kunststofffrasensystemen mehrere tausend unterschiedliche Polymer-Rezepturen zu finden sind, die allesamt als Betriebsgeheimnis gelten.

Eine Mindestforderung an die Deklaration könnte die Reinheit der Polymere sein. Je reiner, also je weniger Additive in einem Kunststoff enthalten sind, desto weniger umweltgefährdende Stoffe – zumindest der Menge nach – können enthalten sein. Dies könnte aber der Forderung nach Verschleißbeständigkeit und damit der Bildung von sekundärem Mikroplastik entgegenstehen (s. oben). Es ist zu erwarten, dass es zu Abwägung zwischen den Spieleigenschaften und den Umweltaspekten kommt. Insbesondere stehen Ansprüche an das Kunststofffrasensystem wie z. B.

- Gleitverhalten,
- Weichheit,
- Hautfreundlichkeit,
- Elastizität,
- elastischen Rückstellung (Rückfederung)
- und Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse

häufig Anforderungen wie

- Lebensdauer,
- Recyclierbarkeit,
- Reinheit der Stoffe,
- Frei von toxischen Stoffen,
- Vermeidung von sekundärem Mikroplastik,
- Vermeidung der Bildung von Radikalen, Hydroperoxide (ROOH), Stabilisatoren, Lichtschutzmittel, Metalldesaktivatoren (s. oben)

und nicht zuletzt Anforderungen an die Kosten entgehen.

Zur Umsetzung einer Deklaration liefert DIN EN ISO 24187:2022-01, welche sich aktuell noch in der Entwurfsphase (Stand 02.05.2023) befindet, einen ersten Ansatz. Diese Norm beschreibt die Grundsätze für die Analyse von Kunststoffen und Mikroplastik in der Umwelt. Die DIN EN ISO 24187:2022-01 legt grundsätzliche Voraussetzungen zur Untersuchung von Mikroplastik in der Umwelt fest. Daraus sollen spezifische Verfahren zur Probenentnahme, der Probenaufbereitung und der Detektion entwickelt werden. Außerdem werden in der DIN EN ISO 24187:2022-01 Begriffe wie

beispielsweise Mikroplastik definiert. Die Abbildung 48 zeigt die schematische Darstellung der Wechselbeziehungen bei der Mikroplastik-Analyse in Umwelt und zugehörigen Matrices.

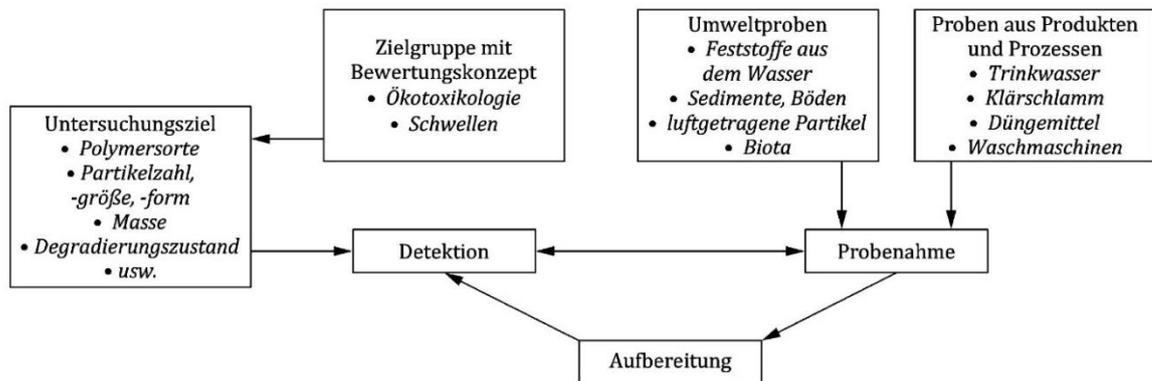


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Wechselbeziehungen bei der Mikroplastik-Analyse DIN EN ISO 24187:2022-01

9.3 Kontrollprüfungen

Sowohl in DIN EN 15330-1:2013-12 als auch in DIN 18035-7:2019-12 werden keine Hinweise zum Umfang von Kontrollprüfungen in Umweltfragen beschrieben. Nur Kontrollprüfungen, mit klaren Prüfbestimmungen und Grenzwerten bei Prüfungen im Feld versetzen Auftraggeber in die Lage nachzuprüfen, ob die in Dokumenten dargelegten Grenzwerte auch im konkreten Fall eingehalten werden.

Insbesondere sind Regelungen zu Kontrollprüfungen für umweltrelevante Stoffe in Kunststoffrasensystemen in der Normung zu erarbeiten.

9.4 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit der verwendeten Kunststofffasern wird aktuell durch das Lisport-Verfahren nach DIN EN 15306:2014-07 geprüft und lediglich visuell bewertet. Laut DIN EN 15306:2014-07 beträgt die aktuell geforderte Prüfdauer 20.200 Zyklen und simuliert eine Nutzung von etwa fünf Jahren. Es wird zur besseren Beurteilung der Lebensdauer empfohlen, die Zahl der Zyklen zu erhöhen. Eine Erhöhung auf 200.000 Zyklen würde eine Nutzung von 15 bis 20 Jahren simulieren, welches der Nutzungsdauer von Kunststoffrasensystemen eher entsprechen würde. Denkbar sind auch noch höhere Anzahl der Zyklen um die Dauerhaftigkeit der Fasern zu erhöhen.

Es ist eine künstliche Bewitterung vor dem Verschleißtest des Probekörpers nach DIN EN ISO 4892-1:2016-10 durchzuführen. Zeitraffende Alterungsversuche an Polymerwerkstoffen führen zwar, aufgrund der Komplexität von Alterungsprozessen im Material, in der Regel nicht zwingend zu ver-

lässlichen Vorhersagen hinsichtlich realistischer Gebrauchsdauer von Produkten, können aber einen orientierenden Charakter besitzen (DIN EN 15306:2014-07; DIN EN ISO 4892-1:2016-10; Gugumus 2000). Darüber hinaus soll zur Prüfung der Faser (ausdrücklich nicht des Kunststoffrasensystems) die Einbindung der Technischen Prüfbestimmung „TP-Synthetic Artificial Turf, Technical Conditions of Examination to determine microplastic emissions due to wear using the Lisson Tretrad machine“ als modifizierter Lisson Tretrad-Test in die Normung von Kunststoffrasen erfolgen. Damit in Zukunft die Abfallströme erfasst werden können und eine Nachverfolgung zurückgebauter Kunststoffrasenplätze möglich ist, wird empfohlen alle Kunststoffrasenplätze in einem Sportplatzkataster zu erfassen. Der aktuell beim BISP in Vorbereitung befindliche Sportstättenatlas könnte eine Plattform für ein solches Sportplatzkataster sein.

10 Hinweise für Besteller

Beim Streben nach einem umweltgerechten Kunststoffrasensystem kommt neben dem Gesetzgebenden (z. B. Verbote von Stoffen), dem Regelwerkgebenden (z. B. Bestimmung von Grenz- und Prüfwerten) auch dem Besteller (Auftraggeber) (z. B. Ausschreibung von Sportböden) eine besondere Rolle zu. Während Gesetzgebende politischen Restriktionen unterliegen, können Regelwerkgebende von Industrieinteressen geprägt sein., wohingegen Auftraggebende am konkreten Einzelprojekt in der Lage sein können, die Abwägung der verschiedenen Interessen zwischen Sportfunktionalität, Ökonomie und Umwelt durchzuführen.

10.1 Sportbodenauswahl

Kann ein Kunststoffrasensystem überhaupt umweltgerecht sein? Diese Frage aus dem Projektbeirat macht deutlich, dass mit jedem Kunststoffrasen, der nicht gebaut wird, einen Beitrag zur Umweltgerechtigkeit geleistet werden kann. Demgegenüber steht die Sportfunktionalität mit seinen Anforderungen an einen besonders strapazierbaren Sportboden. Umweltgerecht kann demnach auch ein Kunststoffrasensystem sein, wenn alle anderen Sportböden aus guten Gründen ausgeschlossen wurden.

Zur Verdeutlichung der sehr hohen Bedeutung der sorgfältigen Sportbodenauswahl, wie diese schon in den Sportplatzpflegerichtlinien der FLL (2014) hinreichend beschrieben ist, wird hier nochmals hingewiesen.

10.2 Vergabeverfahren

Die Entscheidung für ein Produkt erfolgt meist erst im Rahmen der Auftragsvergabe, da in der Regel öffentliche Auftraggebende oder durch öffentliche Mittel geförderte Projekte zur produktneutralen Vergabe verpflichtet sind. Daher ist es in der Regel nicht möglich, einfach ein bestimmtes Produkt auszusuchen. Wünschenswert wäre, wenn Auftraggebende Gütesiegel wie z.B. den geplanten Blauen Engel (2023) zur Grundlage der Vergabeverfahren machen. Die Vorgabe solcher Umweltgüte-Gütesiegel ist vom Vergaberecht gedeckt. Gleiches gilt für die Güteüberwachung im RAL-GZ 944:2022-10 in allen Teilen. Auch hier gibt es eine Qualitätsverbesserung gegenüber den Anforderungen aus der Norm.

Ideal wären Vergabeverfahren, die z. B. auf Grundlage dieses Berichtes, eigene Kriterien am Markt erproben. Zu unterscheiden wären:

- Mindestanforderungen, die zu erfüllen sind und bei Nichterfüllung zum Ausschluss aus dem Vergabeverfahren führen,
- Wertungskriterien, die bei besseren Umwelteigenschaften anbietenden Unternehmen einen Vorteil im Wettbewerb bringen.

Mindestanforderungen könnten z. B. Anforderungen aus dem Gütesiegel Blauer Engel (2023), RAL-GZ 944:2022-10 oder weitere eigene Anforderungen sein:

- frei von PFAS als konstitutioneller Bestandteil oder als Hilfsmittel im Produktionsprozess,
- frei von weichmachenden Substanzen aus der Klasse der Phthalate,
- frei von FTOH,
- Grenzwerte für Schwermetalle, Ökotoxizität, PAK.

Die Erfüllung solcher Mindestanforderungen erfolgt im Vergabeverfahren durch die Vorlage von Zertifikaten in Form von Eignungsprüfungen. Im Bauablauf sind diese dann im Rahmen von Kontrollprüfung auf Einhaltung zu überprüfen.

Darüber hinaus schlägt die Freie und Hansestadt Hamburg (Hauschild 2023) weitere **Wertungskriterien** vor und wendet bereits eine Bewertungsmatrix an und berücksichtigt darin 1/3 preisliche und 2/3 baufachliche/umweltrelevante Zuschlagskriterien. Darin werden berücksichtigt:

- Preis,
- Anteil der rezyklierten Kunststoffe bei der Herstellung in %,
- Verschleißverhalten nach Anzahl der Zyklen im Lisport-Verfahren mit Bewertung mit und ohne Sonnensimulation,
- Sortenreinheit nach Anzahl der verwendeten Werkstoffe.

Auch hier erfolgt im Rahmen des Vergabeverfahrens der Nachweis durch Vorlage von Zertifikaten. Der Nachweis zur Verwendung **rezyklierter Kunststoffe** erfolgt in Hamburg über eine Zertifizierung, aus der Anteil von Recyclingkunststoffen sowie das Ursprungsland dieser Recyclingkunststoffe hervorgeht, z. B. ISCC Plus, RecyClass, DIN CERTCO/flustix-Zertifikat oder gleichwertig.

Denkbar sind Nachweise nach dem EuCertPlast-Zertifizierungsschema, dem RecyClass-Zertifizierungsschema (für „Recycling Process“ oder „Recycled Plastic“) oder einem gleichwertigen Zertifizierungsschema gemäß DIN EN 15343:2008-02.

Der Nachweis des **Verschleißverhaltens** erfolgt im Lisport-Verfahren gemäß DIN EN 15306:2014-07 sowie unter Einfluss von Wärme und UV-Licht mittels Sonnensimulation gemäß Anlage B, RAL-GZ

944:2022-10 und einer anschließenden Bewertung mit einer Note von mind. 2-3 gemäß Anlage A, RAL-GZ 944:2022-10.

Nach Stand des Wissens sind **sortenreine** Kunststoffrasensysteme mit nur einer Polymergruppe, bzw. einer Polymerfamilie für die aktuellen Recyclingverfahren deutlich besser geeignet. Bei ungefüllten Kunststoffrasensystemen fällt die Verschmutzung durch die Füllstoffe und die anschließende Trennung der Stoffe weg. Hier wäre aber auch eine Mindestanforderung in den Vergabeunterlagen denkbar.

10.3 Kontrollprüfungen

Da sich Rezepturen von Kunststoffen in Kunststoffrasensystemen häufig ändern, auch weil die Zulieferung aus der chemischen Industrie laufend Verbesserungsprozesse anstrebt, ist zu erwarten, dass sich die Stoffe, die im Rahmen einer Eignungsprüfung geprüft werden und denjenigen, die auf der Baustelle verwendet werden, regelmäßig unterscheiden. Daher sind Wareneingangsprüfungen in Form von Kontrollprüfungen durch Auftraggebende durchzuführen. Sofern solche Prüfungen nicht in der Normung erarbeitet werden, sind diese durch Auftraggebende, ggf. in Zusammenarbeit mit Laboren baustellenindividuell festzulegen.

10.4 Pflege, Betrieb und Nutzung

Nicht neu ist die Erkenntnis, dass die hinreichende Instandhaltung von Kunststoffrasenflächen die Lebensdauer verlängert (vgl. FLL 2014). Darüber hinaus wird auch durch regelmäßiges Aufnehmen von Verunreinigungen Mikrokunststoffe am Austrag in die Umwelt gehindert und können einer gezielten umweltgerechten Entsorgung zugeführt werden. Zum Umfang gibt die FLL (2014) weitreichende Hinweise.

Aus den Daten der Emission von sekundärem Mikroplastik der vorliegenden Untersuchung ergibt sich, dass es nicht sinnvoll ist, Kunststoffrasensysteme über die Maße lange zu nutzen. Die Emission von Mikroplastik nimmt offenbar nach 10 bis 15 Jahren exponentiell zu. Eine frühzeitige Erneuerung kann die Emissionen in die Umwelt verringern.

11 Ausblick

Am Ende eines jeden Forschungsprojektes, insbesondere wenn es wie hier schon breit angelegt wurde und durch Wünsche der Gutachter und Beiräte noch weiter gefasst wurden, bleiben deutlich mehr Fragen offen, als beantwortet werden konnten.

Unbefriedigend ist insgesamt die Situation beim Recycling. Offenbar ist nicht nur beim Recycling von Kunststoffrasen das Bewusstsein wenig ausgeprägt, was am Ende mit den Stoffen passiert. Die Industrie bietet zwar in der Theorie viele Verfahren an, aber durch den geringen Rohstoffpreis und die schlechtere Qualität gibt es kaum Märkte für recycelte Stoffe. Die Frage, wie das beim Kunststoffrasen geändert werden kann, muss offenbleiben.

Nicht untersucht werden konnten Biokunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder abbaubare Kunststoffe. Theoretisch soll es diese auf dem Markt geben, erkennbar oder in nennenswerten Stückzahlen feststellbar waren diese im Rahmen dieses Projektes allerdings nicht.

Ebenfalls ganz unbeachtet sind die Fragen rund um den Carbon Footprint der Kunststoffrasensysteme. Akteure im Markt haben die Berechnung von CO₂e zwar begonnen, welche Unterschiede und welche Optimierungsmöglichkeiten es geben könnte, ist hier offengeblieben.

Die Untersuchungen zu den Austragsmengen durch sekundäres Mikroplastik aus Kunststoffrasensystemen müssen als Anfang betrachtet werden, da lediglich zwei Systeme untersucht wurden. Ungefüllte Systeme für Fußball und Hockey sind ganz unbeachtet geblieben. Auch ist nicht klar, ob die eigens entwickelte Methode überhaupt valide Ergebnisse bringt. Hier wäre die Erprobung weiterer Methoden in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen wünschenswert.

Auch wenn erkannt wurde, dass Kunststoffe eine Vielzahl von unerwünschten, nicht umweltgerechten Stoffen enthalten können, konnten keine Vorschläge für einen vollständigen Prüfkatalog mit wissenschaftlich fundierten Grenzwerten vorgestellt werden.

Die sehr wünschenswerte Deklarationspflicht ist zwar erkannt worden, es steht aber zu befürchten, dass dieses bei den Herstellern nicht durchsetzbar ist, auch weil es für die Industrie jegliche Entwicklungsarbeit hemmen würde.

Die relativ kleine Umfrage mit lediglich 600 Personen kann zwar belegen, dass anderes als zunächst von der Industrie und wenigen Sportverbänden angenommen, ein Verbot von synthetischen elastischen Füllstoffen, keine erheblichen Einschränkungen für den Sport bedeuten.

Zu begrüßen ist, dass erstmalig unabhängig von der Industrie in Deutschland Forschung rund um das Thema Kunststoffrasen gefördert worden ist. Wünschenswert wäre, wenn Fördermittelgeber hier gesonderte Forschungsprogramme auflegen, um den Umweltfragen rund um den Allwetterbelag Kunststoffrasen tiefer auf den Grund zu gehen, um dem Sport in Zukunft einen unbedenklichen Belag bereitstellen zu können.

12 Literaturverzeichnis

Abbaci, Hocine; Bekdouche, Farid (2019): The Cork Oak, a Neglected Tree Resource in Algeria. In: Nabti Elhafid und Hocine Abbaci (Hg.): *Algeria: Agriculture, Water Supply and Vegetation*: Nova, S. 111–132. Online verfügbar unter http://staff.univ-batna2.dz/bekdouche_farid/publications/cork-oak-neglected-tree-resource-algeria, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Abdalazem, Reem; Roche, Calum (2022): What NFL stadiums have real grass? What kind of grass do they have? NFL Stadiums have featured artificial turf over the years, with more than half the franchises still using it. But where can you find real grass? Hg. v. *Diario AS*. Online verfügbar unter <https://en.as.com/nfl/what-nfl-stadiums-have-real-grass-what-kind-of-grass-do-they-have-n-2/>, zuletzt aktualisiert am 17.11.2022, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Alderman, Nancy; Taylor, Patricia; Brown, David R.; Bradley, Jane M.; Addiss, Susan (2017): Synthetic Turf - Industry's Claims versus the Science. A careful analysis of studies 'that industry uses to justify safety claims. Hg. v. *Environment and Human Health, Inc.* Online verfügbar unter https://www.ehhi.org/NewTurf_Final.pdf, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Allgeuer, Thomas; Torres, Enrique; Bensason, Selim; Chang, Andy; Martin, Jill (2008): Study of shockpads as energy absorption layer in artificial turf surfaces. In: *Sports Technology*, S. 29–33. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/254368991_Study_of_shockpads_as_energy_absorption_layer_in_artificial_turf_surfaces, zuletzt geprüft am 09.10.2023.

Andrady, Anthony L. (2011): Microplastics in the marine environment. In: *Marine Pollution Bulletin* 62 (8), S. 1596–1605. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11003055>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

ATV DIN 18320:2019-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Landschaftsbauarbeiten.

Aumonier, Nicolas; Gill, Darren; Smollett, Jason (2018): Organic infill for artificial turf fields. Anmeldenr: 15/709431. Veröffentlichungsnr: 20180080183. E01C 13/08 (20060101).

Baleki, Roberto; Courter, Jeanne; Ruiz, Patricia; Sanders, Brent; Steele, Tom; Vulic, Ivan (2008): Fielding the challenges of artificial turf stabilization. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Ivan-Vulic/publication/291078024_Fielding_the_challenges_of_artificial_turf_stabilization/links/5c0eb543299bf139c74fa9c1/Fielding-the-challenges-of-artificial-turf-stabilization.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Barnes, David K. A.; Galgani, Francois; Thompson, Richard C.; Barlaz, Morton (2009): Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 364 (1526), S. 1985–1998.

BASF (Hg.) (o. J.): Mechanical recycling of polyamide-containing multilayer structures. Online verfügbar unter https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide_intermediates/sustainable_polyamide_solutions/mechanical_recycling.html#accordion_v2-232a580b54-item-7227f9e6e4, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

Bass, Jason J.; Hintze, David W. (2013): Determination of Microbial Populations in a Synthetic Turf System. In: *Skyline - The Big Sky Undergraduate Journal* 1 (1), S. 1–18. Online verfügbar unter http://www.synturf.org/images/Bass_and_Hintze_viewcontent.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Battulga, Batdulam; Kawahigashi, Masayuki; Oyuntsetseg, Bolormaa (2019): Distribution and composition of plastic debris along the river shore in the Selenga River basin in Mongolia. In: *Environmental Science and Pollution Research*, S. 14059–14072.

Bauer, Bjørn; Egebæk, Kia; Aare, Ane Kirstine (2017): Environmentally friendly substitute products for rubber granulates as infill for artificial turf fields. Hg. v. Norwegian Environmental Agency. Veksø, Trondheim. Online verfügbar unter <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M955/M955.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Bauer, Erwin; Brinkmann, Sigrid; Osswald, Tim A.; Rudolph, Natalie; Schmachtenberg, Ernst (2013): Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Ausgabe. München: Carl Hanser.

Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Oberhausen. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Bertling, Jürgen; Dresen, Boris; Bertling, Ralf; Aryan, Venkat; Weber, Torsten (2021): Kunstrasenplätze – Systemanalyse unter Berücksichtigung von Mikroplastik- und Treibhausgasemissionen, Recycling, Standorten und Standards, Kosten sowie Spielermeinungen. Hg. v. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen. Online verfügbar unter <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/4da18c8f-90fe-44ce-8603-fa9ca6559b3b/content>, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Blauer Engel (2023): Kunststoffrasensysteme und -sportplätze. Vergabekriterien - Entwurf Stand 30.03.2023. unveröffentlicht.

Bø, S. M.; Bohne, Rolf André; Aas, Bjorn; Hansen, Linda Marie (2020): Material flow analysis for Norway's artificial turfs. Conference Paper (IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 588). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/346082070_Material_flow_analysis_for_Norway%27s_artificial_turfs_Material_flow_analysis_for_Norway%27s_artificial_turfs, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Bonnet, Martin (2014): Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer.

Bottenberg, E.; Bouwhuis, G. H.; Brinks, G. J. (2014): The case of latex removal for carpet and artificial turf recycling. Online verfügbar unter https://hbo-kennisbank.nl/details/saxion_kenniscentra:02DD3EFD-DA16-451D-89D56B4E643CEC0E?q=turf+recycling&p=1, zuletzt geprüft am 18.12.2023.

Brosius, Felix (2018): SPSS. Umfassendes Handbuch zu Statistik und Datenanalyse. 8. Auflage. Frechen: mitp.

Brown, David R. (2007): Artificial Turf. Exposures to ground-Up rubber tires. Athletic fields - Playgrounds - Gardening Mulch. Hg. v. Nancy Alderman und Susan Addiss. Environment and Human Health, Inc. Online verfügbar unter https://www.ehhi.org/turf_report07.pdf, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Bühl, Achim (2018): SPSS: Einführung in die moderne Datenanalyse ab SPSS 25. 16., aktualisierte Auflage. Hallbergmoos: Pearson.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hg.) (o. J.): Erfolge im Kampf gegen Mikroplastik und andere Kunststoffe. Online verfügbar unter <https://www.bund.net/meere/mikroplastik/erfolg/>, zuletzt aktualisiert am 08.2019, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Canepari, Silvia; Castellano, Paola; Astolfi, Maria Luisa; Materazzi, Stefano; Ferrante, Riccardo; Fiorini, Dennis; Curini, Roberta (2018): Release of particles, organic compounds, and metals from crumb rubber used in synthetic turf under chemical and physical stress. In: *Environmental Science and Pollution Research*, S. 1448–1459. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-0377-4>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Castan, Stephanie; Henkel, Charlotte; Hüffer, Thorsten; Hofmann, Thilo (2021): Microplastics and nanoplastics barely enhance contaminant mobility in agricultural soils. In: *communications earth & environment*, S. 1–9. Online verfügbar unter <https://www.nature.com/articles/s43247-021-00267-8>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

- Celeiro, Maria; Dagnac, Thierry; Llompарт, Maria (2018): Determination of priority and other hazardous substances in football fields of synthetic turf by gas chromatography-mass spectrometry: A health and environmental concern. In: *Chemosphere*, S. 201–211. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517320349>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.
- Cheng, Hefa; Hu, Yuanan; Rinhard, Martin (2014): Environmental and Health Impacts of Artificial Turf: A Review. In: *Environmental Science & Technology*, S. 2114–2129. Online verfügbar unter <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4044193>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.
- Chia, Rogers Wainkwa; Lee, Jin-Yong; Kim, Heejung; Jang, Jiwook (2021): Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. In: *Environmental Chemistry Letters*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/354106734_Microplastic_pollution_in_soil_and_groundwater_a_review, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Cole, Matthew; Lindeque, Pennie; Halsband, Claudia; Galloway, Tamara S. (2011): Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. In: *Marine Pollution Bulletin* 62 (12), S. 2588–2597. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11005133>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.
- Deutscher Fußball-Bund e.V. (DFB) (Hg.) (2006): DFB-Empfehlungen für Kunststoffrasenplätze. Fragen und Antworten. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www.kreissportbund-hildesheim.de/images/pdf/4_3_4_Empfehlung_Kunststoffrasenplaetze_DFB.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2023.
- Deutscher Fußball-Bund (DFB) (Hg.) (2021): Mikroplastikaustrag bei bestehenden Kunststoffrasenplätzen. DFB-Handlungsempfehlung für Fußballvereine & Kommunen. Online verfügbar unter https://assets.dfb.de/uploads/000/245/080/original_Mikroplastik-Handlungsempf_03-08-2021_final.pdf?1629388272, zuletzt geprüft am 17.08.2023.
- Deutscher Hockey Bund e. V. (Hg.) (o. J.): Fairness, Regeln und Zusammenhalt. Faszination Hockey. Online verfügbar unter <https://magazin.hockey.de/faszination-hockey>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2023.
- Deutscher Olympischer Sportbund e.V. (DOSB); Deutscher Fußball-Bund e.V. (DFB) (Hg.) (2019): Positionen für eine gemeinsame Stellungnahme von DOSB und DFB im Rahmen der Konsultation zum ECHA-Beschränkungsvorschlag „Mikroplastik“.
- Deutsches Zentrum für Infektionsforschung (DZIF) (Hg.) (o. J.): Staphylococcus aureus. Online verfügbar unter <https://www.dzif.de/de/glossar/staphylococcus-aureus>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Dickson, Kyley; Sorochan, John C.; Strunk, William (2020a): Impact of Alternative Synthetic Turf Infills on Athlete Performance and Safety. In: *Proceedings*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/342205090_Impact_of_Alternative_Synthetic_Turf_Infills_on_Athlete_Performance_and_Safety, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Dickson, Kyley; Sorochan, John C.; Strunk, William; Williams, Taylor (2020b): Impact of Brushing and Infill Maintenance on Field Safety of Third Generation Synthetic Turf. In: *Proceedings*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/342204370_Impact_of_Brushing_and_Infill_Maintenance_on_Field_Safety_of_Third_Generation_Synthetic_Turf, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

DIN 18035-2:2020-09: Sportplätze - Teil 2: Bewässerung.

DIN 18035-7:2019-12: Sportplätze - Teil 7: Kunststoffrasensysteme.

DIN 18128:2002-12: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes.

DIN 51006:2005-07: Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen.

DIN EN 15306:2014-07: Sportböden für den Außenbereich - Simulierter Verschleiß von Kunststoffrasenflächen.

DIN EN 15330-1:2013-12: Sportböden - Überwiegend für den Außenbereich hergestellte Kunststoffrasenflächen und Nadelfilze - Teil 1: Festlegungen für Kunststoffrasenflächen für Fußball, Hockey, Rugbytraining, Tennis und multifunktionale Kunststoffrasenflächen.

DIN EN 15343:2008-02: Kunststoffe - Kunststoff-Rezyklate - Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung der Konformität und des Rezyklatgehalts.

DIN EN 15347:2008-02: Kunststoffe - Kunststoff-Rezyklate - Charakterisierung von Kunststoffabfällen.

DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung.

DIN EN ISO 12951:2020-10: Textile Bodenbeläge - Bestimmung des Masseverlusts, der Fasereinbindung und der Änderung des Aussehens textiler Bodenbeläge an Treppenkanten mittels Lissontretradgerät.

DIN EN ISO 139:2011-10: Textilien - Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung.

DIN EN ISO 24187:2022-01: Grundsätze für die Analyse von Kunststoffen und Mikroplastik in der Umwelt (ISO/DIS 24187:2021).

DIN EN ISO 291:2008-08: Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung.

- DIN EN ISO 4892-1:2016-10: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung.
- DIN SPEC 91446:2021-12: Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel.
- Dissemond, J.; Koppermann, M.; Esser, S.; Schultewolter, T.; Goos, M.; Wagner, S. N. (2002): Therapie eines Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA) im Rahmen der Behandlung eines chronischen Ulkus mittels Biochirurgie. In: *Der Hautarzt* 53, S. 608–612.
- Doležel, Břetislav (1978): Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi. München: Hanser.
- Donald, Carey; Scott, Richard P.; Wilson, Glenn; Hoffman, Peter (2019): Artificial turf: chemical flux and development of silicone wristband partitioning coefficients. In: *Air Quality Atmosphere & Health*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/331593217_Artificial_turf_chemical_flux_and_development_of_silicone_wristband_partitioning_coefficients, zuletzt geprüft am 14.09.2023.
- DWA-A 102-2:2020-12: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen.
- Ehrenstein, Gottfried Wilhelm; Pongratz (2007): Beständigkeit von Kunststoffen. München: Carl Hanser (1).
- Ekstrand, J.; Hägglund, M.; Fuller, C. W. (2011): Comparison of injuries sustained on artificial turf and grass by male and female elite football players. In: *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, S. 824–832. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0838.2010.01118.x>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.
- Elvidge, Thomas; Brown, Sean; Valenzuela, Kevin; Sorochan, John; Weinhandl, Joshua T.; Zhang, Songning (2022): Knee and ankle biomechanics in 90° side cutting on synthetic turf with shock pad. In: *Footwear Science*, S. 173–183. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19424280.2022.2077842>, zuletzt geprüft am 09.10.2023.
- Esfandiari, Atefeh; Abbasi, Sajjad; Peely, Ahmad Behrouj; Mowla, Dariush; Ghanbarian, Mohammad Ali; Oleszczuk, Patryk; Turner, Andrew (2022): Distribution and transport of microplastics in groundwater (Shiraz aquifer, southwest Iran). In: *Water Research*.
- Eunomia Research & Consulting Ltd (2017): Environmental impact study on artificial football turf. Hg. v. Fédération Internationale de Football Association (FIFA). Online verfügbar unter

https://footballvictoriafacilities.com.au/wp-content/uploads/2020/01/artificial_turf_recycling.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Europäische Kommission (Hg.) (o. J.): COMMISSION REGULATION (EU) .../... of XXX amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/transparency/comitology-register/screen/documents/083921/1/consult?lang=de>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

European Chemicals Agency (ECHA) (Hg.) (o. J.): Mikroplastik. Online verfügbar unter <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/microplastics>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard (2016): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Fédération Internationale de Football Association (FIFA) (Hg.) (2021): Handbuch für Mitgliedsverbände. FIFA-Qualitätsprogramm für Kunstrasen. Online verfügbar unter https://digitalhub.fifa.com/m/382981fb2a8e5a7/original/ma-handbook_20210624_clean-version_en_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Fédération Internationale de Football Association (FIFA) (Hg.) (2022): FIFA Quality Programme for Football Turf. Test Manual I - Test Methods: 2015 Edition. v3.4 01.02.2022. Online verfügbar unter <https://digitalhub.fifa.com/m/f13b1cd18027f40/original/FIFA-quality-programme-for-football-turf-Test-Manual-I-Test-Methods-2015v-3-4.pdf>, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

Fleming, Paul Richard (2011): Maintenance best practice and recent research. In: *Journal of Sports Engineering and Technology*, S. 159–170. Online verfügbar unter <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337111405256>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Fleming, Paul Richard; Watts, Charlie; Forrester, Stephanie (2020): A new model of third generation artificial turf degradation, maintenance interventions and benefits. Special Issue Article. In: *Journal of Sports Engineering and Technology* 237, S. 1–15. Online verfügbar unter <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337120961602>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) (Hg.) (2014): Sportplatzpflegerichtlinien. Richtlinien für die Pflege und Nutzung von Sportanlagen im Freien, Planungsgrundsätze. 2. Ausgabe. Bonn.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) (Hg.) (2022): Fachbericht Kunststoffsportböden. Nachhaltige Kunststoffbelagsauswahl für Sportfreianlagen. 1. Ausgabe. Bonn.

Fuller, Colin W.; Dick, Randall W.; Corlette, Jill; Schmalz, Rosemary (2007a): Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 1: match injuries. In: *British Journal of Sports Medicine*. Online verfügbar unter https://bjsm.bmj.com/content/41/suppl_1/i20, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Fuller, Colin W.; Dick, Randall W.; Corlette, Jill; Schmalz, Rosemary (2007b): Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 2: training injuries. Online verfügbar unter https://bjsm.bmj.com/content/41/suppl_1/i27, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Göswein, Verena; Reichmann, Jana; Habert, Guillaume; Pittau, Francesco (2021): Land availability in Europe for a radical shift toward bio-based construction. In: *Sustainable Cities and Society*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721002158>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Gouin, T.; Avalos, J.; Brunning, I.; Brzuska, K.; Graaf, J. de; Kaumanns, J. et al. (2015): Use of Micro-Plastic Beads in Cosmetic Products in Europe and Their Estimated Emissions to the North Sea Environment. English Edition. In: *SOFW-Journal* 141 (3), S. 40–46. Online verfügbar unter https://www.ikw.org/fileadmin/IKW_Dateien/downloads/Schoenheitspflege/SOFW_Micro-Plastic_beads_in_Cosmetic_Products.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Graça, Cátia A. L.; Rocha, Filipe; Gomes, Filipa O.; Rocha, M. Rosário; Homem, Vera; Alves, Arminda; Ratola, Nuno (2022): Presence of metals and metalloids in crumb rubber used as infill of worldwide synthetic turf pitches: Exposure and risk assessment. In: *Chemosphere*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522008724>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Gugumus, F. (2000): Light stabilizers. In: R. Gächter und H. Müller (Hg.): *Plastics additives handbook*. München: Hanser.

Hahn, Laura (2020): Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus Kunststofffragensystemen – Empfehlungen für Betreiber von Sportfreianlagen. Masterarbeit. Hochschule Osnabrück, Osnabrück. Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur.

Hanel, Hagen; Roth, Achim (2021): Stabil ins zweite Kunststoffleben. Methode zur Bestimmung des Readditivierungsbedarfs bei Rezyklaten. In: *Kunststoffe*, S. 38–41. Online verfügbar unter <https://epaper.kunststoffe.de/storefront/24>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Hann, Simon; Sherrington, Chris; Jamieson, Olly; Hickman, Molly; Kershaw, Peter; Bapasola, Ayesha; Cole, George (2018): Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products. Final Report. Eunomia;

ICF. London/Bristol. Online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2018-04/microplastics_final_report_v5_full.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Hardbarger, Ashley N. (2012): Viability of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* on Artificial Turf Under Outdoor and Laboratory Environmental Conditions. Ohio University, Ohio. College of Health Sciences and Professions. Online verfügbar unter https://etd.ohio-link.edu/acprod/odb_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ohiou1338581271, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Harmeling, Francesco Antonius Lodewijk; Wijers, Bart; van der Gaag, Frederik Jan (2020): Infill Mixture for Artificial Turf. Angemeldet durch Ten Cate Thiolon B.V. Anmeldenr: 16/628,686. Veröffentlichungsnr: 20200224374. E01C 13/08 (20060101).

Harper, Richard Eugene (2015): Development of novel synthetic turf infill materials. Georgia Institute of Technology, Georgia. School of Materials Science and Engineering. Online verfügbar unter <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/41a6fdf1-d328-4c00-ac3b-2afc8310de53/content>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Hartmann, Nanna B.; Hüffer, Thorsten; Thompson, Richard C.; Hassellöv, Martin; Verschoor, Anja; Daugaard, Anders E. et al. (2019): Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. In: *Environmental Science & Technology* 53 (3), S. 1039–1047. DOI: 10.1021/acs.est.8b05297.

Hauschild, Torge (2023): Urbaner Sportstättenbau. Erste Umsetzung der Ergebnisse der Innovationskonferenz 2020 im Rahmen des Auftaktprojektes Sportanlage Snitgerreihe in Hamburg. In: *Neue Landschaft* (02). Online verfügbar unter <https://neulandschaft.de/artikel/erste-umsetzung-der-ergebnisse-der-innovationskonferenz-2020-im-rahmen-des-auftaktprojektes-sportanlage-snitgerreihe-in-hamburg-urbaner-sportstaettenbau-10023>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Hauschild, Torge; Schneider, Oliver (2017): Granulated cork piloted in Hamburg, Germany. Pros and cons of cork as an infill for artificial turf pitches. In: *sb - International magazine for sports, leisure and recreational facilities* (2), S. 46–49. Online verfügbar unter https://issuu.com/i-aks/docs/sb_2-2017_final_en, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Heisterkamp, Ines; Gartiser, Stefan; Kretschmar; Schoknecht, Ute; Kalbe, Ute; Happel, Oliver; Ratte, Monika (2022): Methoden und Kriterien zur Bewertung der Ökotoxizität von Produkten. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (Texte, 151/2022). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methoden-kriterien-zur-bewertung-der-oekotoxizitaet>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

- Hennig, Malte; Stallkamp, Christoph; Volk, Rebekka; Stapf, Dieter (2022): Chemisches Recycling von Automobilkunststoffen mittels Pyrolyse. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Alexander Gosten (Hg.): Energie aus Abfall. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz. Berlin. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag (Energie aus Abfall, 19), S. 236–250. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/361865358_Chemisches_Recycling_von_Automobilkunststoffen_mittels_Pyrolyse, zuletzt geprüft am 18.12.2023.
- Hernandez, Edgar; Nowack, Bernd; Mitrano, Denise M. (2017): Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release During Washing. In: *Environmental Science & Technology* 51 (12), S. 7036–7046.
- Hongling, Yi; Baicun, Zheng; Heng, Lin; Weiguang, Gong; Ting, Wei; Weishan, Wang (2014): Nano-silica and Polyethylene Based Artificial Turf-abrasion Resistance and Mechanical Properties. In: *Procedia Engineering*, S. 901–906. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814006705>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.
- Hornei, B.; Bornkessel, U.; Manterfeld, Y.; Prämaßing, W. (2009): Vergleichende hygienisch-mikrobiologische Untersuchungen auf Naturrasen- und Kunststoffrasenflächen. In: *European Journal of Turfgrass Science* 40 (2), S. 90–93. Online verfügbar unter https://www.rasengesellschaft.de/files/downloads/zeitschrift/2009_2.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.
- Hufenus, Rudolf; Affolter, Christian; Camenzind, Martin; Halbeisen, Marcel; Spierings, Adriaan; Tischhauser, Andreas et al. (2010): Bicomponent artificial turf fibers for future sports flooring. The Fiber Society Spring Conference. Bursa. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/255825618_Bicomponent_artificial_turf_fibers_for_future_sports_flooring, zuletzt geprüft am 24.10.2023.
- Hufenus, Rudolf; Affolter, Christian; Camenzind, Martin; Reifler, Felix A. (2013): Design and Characterization of a Bicomponent Melt-Spun Fiber Optimized for Artificial Turf Applications. In: *Macromolecular - Materials and Engineering*, S. 653–663. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/mame.201200088>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.
- ISO 10640:2011-08: Kunststoffe - Anleitung für die Abschätzung beschleunigter Photoalterung.
- ISO 15033:2018-06: Kunststoffe - Bestimmung von Caprolactam und seiner zyklischen und linearen Oligomere durch HPLC.
- ISO 19702:2015-08: Leitfaden für die Probenahme und Analyse von toxischen Gasen und Dämpfen in Brandgasen unter Anwendung der FTIR - Spektroskopie.
- Itten, René; Glauser, Lukas; Stucki, Matthias (2020): Ökobilanzierung von Rasensportfeldern: Natur-, Kunststoff- und Hybridrasen der Stadt Zürich im Vergleich. Institut für Umwelt und Natürliche

Ressourcen, Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Wädenswil. Online verfügbar unter https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/20774/3/2020_Ippen-Glauser-Stucki_Oekobilanzierung-Rasensportfelder.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

James, Iain; McLeod, Andrew (2010): The effect of maintenance on the performance of sand-filled synthetic turf surfaces. In: *Sports Technology*, S. 43–51. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/233149640_The_effect_of_maintenance_on_the_performance_of_sand-filled_synthetic_turf_surfaces, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Jastifer, James R.; McNitt, Andrew S.; Mack, Christina D.; Kent, Richard W.; McCullough, Kirk A.; Coughlin, Michael J.; Anderson, Robert B. (2021): The development of mandatory practices for the testing and maintenance of synthetic turf fields in the National Football League. In: *International Turfgrass Society Research Journal*, S. 352–363. Online verfügbar unter <https://online-library.wiley.com/doi/full/10.1002/its2.94>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Jensen, Oliver (2022): NFL-Studie zur Verletzungsgefahr auf Kunstrasen bringt interessantes Ergebnis. Online verfügbar unter <https://www.ran.de/sports/american-football/nfl/news/nfl-studie-zur-verletzungsgefahr-auf-kunstrasen-bringt-interessantes-ergebnis-107914>, zuletzt aktualisiert am 09.11.2022, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

Johansson, Kristin (2018): Life cycle assessment of two end-of-life tyre applications: artificial turfs and asphalt rubber. Hg. v. Ragn-Sells Däckåtervinning AB. Ragn-Sells Däckåtervinning AB. Online verfügbar unter https://www.ragnsellstyrerecycling.com/globalassets/tyre-company/dokument/lca-konstgrasplaner-gummiasfalt-version-1.4_2018_rs.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Kalbe, Ute; Krüger, Oliver; Wachtendorf, Volker; Berger, Wolfgang; Hally, Stefan (2013): Development of Leaching Procedures for Synthetic Turf Systems Containing Scrap Tyre Granules. In: *Waste and Biomass Valorization*, S. 745–757. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-013-9248-5>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Kazakova, Sophia V.; Hageman, Jeffrey C.; Matava, Matthew; Srinivasan, Arjun; Phelan, Larry; Garfinkel, Bernard et al. (2005): A Clone of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* among Professional Football Players. In: *New England Journal of Medicine*. Online verfügbar unter <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa042859>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Keller, Marcus; Turco, Ronald F.; Gray, Marianne; Von Sigler (2020): The Fate of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* in a Synthetic Turf System. In: *Sports Health* 12 (3), S. 263–270. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/340544772_The_Fate_of_Methicillin-Resistant_Staphylococcus_aureus_in_a_Synthetic_Turf_System, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Kieft, Gert-Jan (2009): Quality Monitoring of 50 Artificial Turf Football Fields. A study of the correlation between field properties, usage and maintenance. SportSURF workshop. Instituut voor Sportaccommodaties (ISA Sport), 04.03.2009.

Kirkland, Eugene Brent; Adams, Brian B. (2008): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in athletes. In: *Journal of the American Academy of Dermatology* 59 (3), S. 494–502. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0190962208005227>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Knebel, Alexander (2021): Beim Design schon ans Recycling denken. In: *Kunststoffe*, S. 22–24. Online verfügbar unter https://www.zuse-gemeinschaft.de/images/News/2021/Kunststoffe_Special-Kreislaufwirtschaft_Beim_Design_schon_ans_Recycling_denken_Zuse_Gemeinschaft.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Kole, Pieter Jan; Löhr, Ansje J.; van Belleghem, Frank G. A. J.; Ragas, M. J. (2017): Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Online verfügbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5664766/pdf/ijerph-14-01265.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Krebs, Christian; Marc-André, Avondet; Leu, Kurt W. (1998): Langzeitverhalten von Thermoplasten. Alterungsverhalten und Chemikalienbeständigkeit. München: Hanser.

Kristenson, Karolina; Bjørneboe, John; Waldén, Markus; Andersen, Thor Einar; Ekstrand, Jan; Hägglund, Martin (2013): The Nordic Football Injury Audit: higher injury rates for professional football clubs with third-generation artificial turf at their home venue. In: *British Journal of Sports Medicine*, S. 775–781. Online verfügbar unter <https://bjsm.bmj.com/content/47/12/775>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Krüger, Oliver; Kalbe, Ute; Berger, Wolfgang; Christoph, Gabriele; Walzel, Hans-Peter; Nordhauß, Katja (2012): Comparison of Batch and Column Tests for the Elution of Artificial Turf System Components. In: *Environmental Science & Technology*, S. 13085–13092. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/233422386_Comparison_of_Batch_and_Column_Tests_for_the_Elution_of_Artificial_Turf_System_Components, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Kuck, Birger; Neto, António (2020): Der Natur ein Stück näher. Kunstrasen-Einstreugranulate auf EPDM-Basis. In: *KU Kunststoffe* 92 (1), S. 84–87. Online verfügbar unter <https://res.cloudi->

nary.com/sternwald-systems/raw/upload/v1/hugo-prd/ARTIKEL_ATTACH/0024054D_9712DC284BA8/a90f0790e016754042abd098759604c2bb68e47b/KU_2002_01_Der-Natur-ein-Stueck-naeher.pdf, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Kuitunen, Ilari; Immonen, Ville; Pakarinen, Oskari; Mattila, Ville M.; Ponkilainen, Ville T. (2023): Incidence of football injuries sustained on artificial turf compared to grass and other playing surfaces: a systematic review and meta-analysis. In: *eClinicalMedicine*. Online verfügbar unter [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/eclinm/PIIS2589-5370\(23\)00133-5.pdf](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/eclinm/PIIS2589-5370(23)00133-5.pdf), zuletzt geprüft am 11.10.2023.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hg.) (2021): Kunststoffhaltige Tretschichten auf Reitplätzen. Recklinghausen (LANUV-Arbeitsblatt, 53). Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40053.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2023.

Lassen, Carsten; Hansen, Steffen Foss; Magnusson, Kerstin; Hartmann, Nanna B.; Rehne Jensen (2015): Microplastics. Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark. Environmental project No. 1793. Hg. v. The Danish Environmental Protection Agency. Online verfügbar unter https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/118180844/Lassen_et_al._2015.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Lassen, Carsten; Ihlemann, Christina; Skyggebjerg, Jan Gravers; Christensen, Frans; Johansen, Marius; Malmgren-Hansen, Bjørn et al. (2020): Kunstgræsbaner. Alternativer til gummi-granulat som infill og erfaringer med bane-pleje. Miljøprojekt nr. 2124. Hg. v. Dänisches Amt für Umweltschutz. Online verfügbar unter <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2020/02/978-87-7038-164-2.pdf>, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

Liebezeit, Gerd (2012): Mikroplastik - Quellen, Umweltaspekte und Daten zum Vorkommen im Niedersächsischen Wattenmeer. In: *Natur- und Umweltschutz* 11 (1), S. 21–31. Online verfügbar unter https://www.mellumrat.de/wp-content/uploads/2017/11/Mikromuell_B11_H1.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Liebmann, Bettina (2015): Mikroplastik in der Umwelt. Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf. Unter Mitarbeit von Heike Brielmann, Holger Heinfellner, Philipp Hohenblum, Sebastian Köppl, Stefan Schaden und Maria Uhl. Hg. v. Umweltbundesamt. Wien. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0550.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Løkkegaard, Hanne; Malmgren-Hansen, Bjørn; Nilsson, Nils H. (2019): Mass balance of rubber granulate lost from artificial turf fields, focusing on discharge to the aquatic environment. Danish

Technological Institute (Teknologisk Institut). Aarhus. Online verfügbar unter https://www.genan.eu/wp-content/uploads/2020/02/Teknologisk-Institut_Mass-balance-of-rubber-granulate-lost-from-artificial-turf-fields_May-2019_v1.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Lopez-Galvez, Nicolas I.; Claude, Jocelyn; Wong, Patty; Bradman, Asa; Hyland, Carly; Castorina, Rosamary et al. (2022): Quantification and Analysis of Micro-Level Activities Data from Children Aged 1–12 Years Old for Use in the Assessments of Exposure to Recycled Tire on Turf and Playgrounds. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/358778665_Quantification_and_Analysis_of_Micro-Level_Activities_Data_from_Children_Aged_1-12_Years_Old_for_Use_in_the_Assessments_of_Exposure_to_Recycled_Tire_on_Turf_and_Playgrounds, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Mack, Christina D.; Hershman, Elliott B.; Anderson, Robert B.; Coughlin, Michael J.; McNitt, Andrew S.; Sendor, Rachel R.; Kent, Richard W. (2019): Higher Rates of Lower Extremity Injury on Synthetic Turf Compared With Natural Turf Among National Football League Athletes: Epidemiologic Confirmation of a Biomechanical Hypothesis. In: *The American journal of sports medicine*, S. 189–196.

Magnusson, Simon; Mácsik, Josef (2017): Analysis of energy use and emissions of greenhouse gases, metals and organic substances from construction materials used for artificial turf. In: *Resources, Conservation and Recycling* 122, S. 362–372. Online verfügbar unter http://www.syn-turf.org/images/CFP-2017-03-Analysis_of_energy_use_and_emissions_of_greenhouse_gases,_metals_magnusson2017.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Maisels, Arkadi; Hiller, Andreas; Simon, Franz-Georg (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. In: *Chemie Ingenieur Technik*, S. 1742–1750. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Massey, Rachel; Pollard, Lindsey; Jacobs, Molly; Onasch, Joy; Harari, Homero (2020): Artificial Turf Infill: A Comparative Assessment of Chemical Contents. In: *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy* 30 (1). Online verfügbar unter <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1048291120906206>, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

McGhie, David; Ettema, Gertjan (2012): Biomechanical analysis of surface-athlete impacts on third-generation artificial turf. In: *The American journal of sports medicine*, S. 177–185. Online verfügbar unter <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0363546512464697>, zuletzt geprüft am 09.10.2023.

McLeod, Andrew (2008): The management and maintenance of second generation sand-filled synthetic sports pitches. Dissertation. Cranfield University. National Resources department. Online verfügbar unter https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/2625/Andy_McLeod_EngD.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

McNitt, Andrew S.; Petrunak, Dianne M.; Serensits, Thomas J. (2022): Survival of *Staphylococcus aureus* applied to *Poa pratensis* L. and synthetic turf. In: *International Turfgrass Society Research Journal*, S. 364–376. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/its2.35>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Meyer, Volker (2020): Mengenermittlung der Mikroplastikemission von Kunststoffgranulat aus Kunststoffrasensystemen. Bachelorarbeit. Hochschule Osnabrück, Osnabrück.

Miklos, David; Obermaier, Nathan; Jekel, Martin (2016): Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts. Erste Überlegungen zur Relevanz von synthetischen Polymeren in der Umwelt. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte, 32/2016). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2016_mikroplastik_entwicklung_eines_umweltbewertungskonzeptes.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Mintenig, S. M.; Löder, M. G. J.; Primpke, S.; Gerdt, G. (2019): Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. In: *Science of The Total Environment*, S. 631–635.

Misund, Audun Olsen; Orvik, Casper Pilskog (2020): Degradering av en 4G-kunstgressbane: Effekt av vinterdrift og UV-stråling. Bachelorarbeit.

Mittag, Hans-Joachim; Schüller, Katharina (2020): Statistik. Eine Einführung mit interaktiven Elementen. 6., vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage. Heidelberg: Springer Spektrum Berlin.

Müller, Benjamin (2018): Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Austrags von Mikroplastik aus Kunststoffrasensystemen. Masterarbeit. Hochschule Osnabrück, Osnabrück. Fakultät Agrarwissenschaften und Landschafts.

Müller, Benjamin; Bußmann, Jens; Thieme-Hack, Martin (2019): Verschleiß von Kunststoffrasen. Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Austrags von Mikroplastik aus Kunststoffrasensystemen. In: *Neue Landschaft* (5). Online verfügbar unter <https://neuelandschaft.de/artikel/entwicklung-einer-pruefmethode-zur-bestimmung-des-austrags-von-mikroplastik-aus-kunststoffrasensystemen-verschleiss-von-kunststoffrasen-6196>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Müller, Clemens (2010): Einfluss von Traktion auf das Bewegungsverhalten im Fußball. Interaktion zwischen Sohlenkonfigurationen von Fußballschuhen und Kunstrasen der dritten Generation. Dissertation. Technische Universität Chemnitz. Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/71310929-Einfluss-von-traktion-auf-das-bewegungsverhalten-im-fussball.html>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Naim, Ayman (2020): An Investigation into PFAS in Artificial Turf around Stockholm. Summary. Hg. v. Stockholm University. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1544989/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Nilsson, Nils H.; Malmgren-Hansen, Bjørn; Thomsen, Uffe Sognstrup (2008): Mapping, emissions and environmental and health assessment of chemical substances in artificial turf. Hg. v. Danish Ministry of the Environment (Survey of Chemical Substances in Consumer, 100). Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.502.4250&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Norges Forskningsråd; Miljølare.no; Norsk Institutt for Luftforskning; Akvaplan-Niva; SINTEF; Havforskningsinstituttet (2017): Sjekk kunstgressbanen. Forskningskampanjen 2017. Rapport fra undersøkelser om svinn av gummigranulat fra kunstgressbaner, gjennomført av over 12 000 elever og spillere høsten 2017. Online verfügbar unter <https://www.miljolare.no/aktiviteter/kunstgress/rapport>, zuletzt geprüft am 11.10.2023.

Novotny, Thomas E.; Slaughter, Elli (2014): Tobacco Product Easte: An Environmental Approach to Reduce Tobacco Consumption. In: *Current Environmental Health Reports*, S. 208–216.

Orchard, John (2002): Is There a Relationship Between Ground and Climatic Conditions and Injuries in Football? In: *Sports Medicine*, S. 419–432. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.2165/00007256-200232070-00002>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Österreichisches Institut für Schul- und Sportstättenbau (ÖISS) (Hg.) (o. J.): Forschungsergebnisse. Online verfügbar unter <https://www.oeiss.org/oeiss/de/service/forschung/forschungsergebnisse/>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

PD CEN/TR 17519:2020-07-29: Sportböden. Kunststoffrasenflächen. Leitfaden zur Minimierung des Austrags von Verfüllgut in die Umgebung.

Petrass, Lauren A.; Twomey, Dara M.; Harvey, Jack T. (2014): Understanding how the Components of a Synthetic Turf System Contribute to Increased Surface Temperature. In: *Procedia Engineering*, S. 943–948. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814006754>, zuletzt geprüft am 09.10.2023.

Planas, D.; Sarahan, F.; Dube, L.; Gomaire, H.; Cadieux, C. (1981): Ecological significance of phenolic compounds of *Myriophyllum spicatum*. In: *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, S. 1492–1496. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.1980.11897219>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Polyclean (Hg.) (o. J.): Umweltschonende Kunstrasen-Intensivwäsche durch Entwicklung von Feinstfiltersystemen. Forschungsarbeit gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Online verfügbar unter <https://www.polyclean.biz/forschungsprojekt-umweltschonende-kunstrasen-intensivwaesche/>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Pronk, Marja E. J.; Woutersen, Marjolijn; Herremans, Joke M. M. (2020): Synthetic turf pitches with rubber granulate infill: are there health risks for people playing sports on such pitches? In: *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, S. 567–584. Online verfügbar unter <https://www.nature.com/articles/s41370-018-0106-1>, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

RAL-GZ 944:2022-10: Kunststoffrasensysteme in Sportfreianlagen - Gütesicherung.

Redman, Iliana (2021): High-School-Fußballmannschaft in Niigata spielt auf Resten von grünem Tee. In: *Sumikai*, 12.12.2021. Online verfügbar unter <https://sumikai.com/nachrichten-aus-japan/umwelt/high-school-fussballmannschaft-in-niigata-spielt-auf-resten-von-gruenem-tee-302484/>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Reifferscheid, Georg; Brennholt, Nicole (2014): Mikroplastik in Bundeswasserstraßen. Hg. v. Rheinland-Pfalz: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (Mainzer Arbeitstage des LUWG, 12.).

Rennie, David J.; Vanrenterghem, Jos; Littlewood, Martin; Drust, Barry (2015): Can the natural turf pitch be viewed as a risk factor for injury within Association Football? In: *Journal of Science and Medicine in Sport*, 574-552. Online verfügbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26209426/>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Rischmüller, Sophie Nathalie (2022): Untersuchung von Kunstrasenplätzen als Belastungsquellen von Mikropartikeln für umgebende Systeme. Emission, Transportverhalten und Verbleib von Kunstrasenplatz-Infill am Beispiel von zwei Standorten (Osnabrück und Oberhausen). Masterarbeit. Universität Osnabrück, Osnabrück. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/9501337d-c4af-431a-99ae-809f69723b68/details>, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Röthemeyer, Fritz; Sommer, Franz (2013): Kautschuk Technologie. Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte. 3., neu bearbeitete und und erweiterete Auflage. München: Carl Hanser.

Ryu, Han-Sun; Moon, Jinah; Kim, Heejung; Lee, Jin-Yong (2021): Modeling and Parametric Simulation of Microplastic Transport in Groundwater Environments. In: *Applied Sciences* (11), S. 1–12.

Samandra, Subharthe; Johnston, Julia M.; Jaeger, Julia E.; Symons, Bob; Xie, Shay; Currell, Matthew et al. (2021): Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. In: *The Science of the total environment*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/354094625_Microplastic_contamination_of_an_unconfined_groundwater_aquifer_in_Victoria_Australia, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Sánchez-Sánchez, Javier; Felipe, José Luis; Burillo, Pablo; Del Corral, Julio; Gallardo, Leonor (2014): Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf. In: *Journal of Sports Engineering and Technology*, S. 155–164. Online verfügbar unter <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1754337114527276>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.

Sandkuehler, Peter; Torres, Enrique; Allgeuer, Thomas (2010): Polyolefin materials and technology in artificial turf I: Yarn developments. In: *Sports Technology*, S. 52–58. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19346190.2010.504276>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Schneider, Klaus; Bierwisch, Anne; Kaiser, Eva (2020a): ERASSTRI - European risk assessment study on synthetic turf rubber infill. Part 3: Exposure and risk characterisation. In: *Science of The Total Environment*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720312328>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Schneider, Klaus; Hoogd, Manfred de; Haxaire, Pascal; Philipps, Arne; Bierwisch, Anne; Kaiser, Eva (2020b): ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill. Part 2: Migration and monitoring studies. In: *Science of The Total Environment*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720306835>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Schneider, Klaus; Hoogd, Manfred de; Madsen, Maria Pelle; Haxaire, Pascal; Bierwisch, Anne; Kaiser, Eva (2020c): ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill. Part 1: Analysis of infill samples. In: *Science of The Total Environment*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720306847>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Schrier, Nicole; Wannop, John William; Worobets, Jay T.; Stefanyshyn, Darren J. (2022): Influence of Compliance and Aging of Artificial Turf Surfaces on Lower Extremity Joint Loading. In: *biomechanics*, S. 66–75. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2673-7078/2/1/7>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Schwarz, Niklaus (2014): Intensiv genutzte Fussballplätze - gibt es Alternativen zu Kunststoffrasen? Berner Fachhochschule, Bern. Eidgenössische Hochschule für Sport Magglingen. Online verfügbar unter file:///C:/Users/aleritte/Downloads/cas-sportanlagen-1214-schwarz-intensiv-genutzte-fussballplaetze_DE-1.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Scott, Troy (2016): Comparing Artificial Turf Infill: Zeofill vs Silica Sand. Hg. v. Heavenly Greens. Online verfügbar unter <https://www.heavenlygreens.com/blog/comparing-artificial-turf-infill-zeo-fill-vs-silica-sand>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Seifert, Kevin (2022): NFL data shows recent injury rates same on grass, artificial turf. Hg. v. ESPN. Online verfügbar unter https://www.espn.com/nfl/story/_/id/34982032/nfl-data-shows-recent-injury-rates-same-grass-artificial-turf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Sen, Ali; Zhianski, Miglena; Glushkova, Maria; Petkova, Krasimira; Ferreira, Joana; Pereira, Helena (2016): Chemical composition and cellular structure of corks from *Quercus suber* trees planted in Bulgaria and Turkey. In: *Wood Science and Technology*, S. 1261–1276. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-016-0836-y>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Sharma, Prateek; Fleming, Paul Richard; Forrester, Stephanie; Gunn, Jon (2016): Maintenance of Artificial Turf – Putting Research into Practice. In: *Procedia Engineering*, S. 830–835. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816307457?ref=pdf_download&fr=RR-7&rr=81a900aeea856a6b, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Shorten, Martyn R. (2009): Estimated risk of head injury on artificial turf surfaces with Brock underlayment. Report to Brock. Hg. v. L. L.C. BioMechanica. Portland, Oregon, USA. Online verfügbar unter https://www.brockeurope.com/wp-content/uploads/2021/03/Est.-Risk-Head-Injury-Artificial-Turf-w-Brock_Biomechanica_2009-02-06.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Siekmann, Jorg; Sick, Stephan (2019): Natural fiber coated artificial turf infill. Angemeldet durch Melos GmbH. Anmeldenr: 16/316,914. Veröffentlichungsnr: 20190292731. E01C 13/08 (20060101); D06N 7/00 (20060101).

Simon, Rachel (2010): Review of the Impacts of Crumb Rubber in Artificial Turf Applications. University of California, Berkeley. Laboratory for manufacturing an sustainability. Online verfügbar unter <https://escholarship.org/uc/item/9zp430wp>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

- Slogard, T.; Bahr, Roald; Andersen, Thor Einar (2010): Injury risk on artificial turf and grass in youth tournament football. In: *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, S. 356–361. Online verfügbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20738822/>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.
- Smollett, Jason; Gill, Darren; Kramer, Tina (2021): Olive pits infill systems and artificial turfs having the same. Anmeldenr: 16/795,540. Veröffentlichungsnr: 20210254290. E01C 13/08 (20060101).
- Stadionwelt (Hg.) (2023): Die neueste Entwicklung im Bereich der ökologischen Infills. Online verfügbar unter <https://www.stadionwelt.de/news/55535/die-neueste-entwicklung-im-bereich-der-oekologischen-infills>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.
- Stahel, Werner A. (2007): Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler. 5., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Su, Sheng; Zhou, Sifan; Lin, Guoqing (2021): Existence of microplastics in soil and groundwater in Jiaodong Peninsula. In: *International Conference on Tourism, Economy and Environmental Sustainability*.
- Tausendpfund, Markus (2019): Quantitative Datenanalyse. Eine Einführung mit SPSS. Wiesbaden: Springer (Studientexte zur Soziologie).
- Tay, Sock Peng; Fleming, Paul Richard; Forrester, Stephanie; Hu, Xiao (2015): Insights to Skin-turf Friction as Investigated Using the Securisport. In: *Procedia Engineering*, S. 320–325. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581501509X>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.
- Tsvetkov, Ivaylo; Zafirov, Nikolay; Mirtchev, Stefan (2017): Dendrochronological Analysis of Cork Oak (*Q. suber* L.). Adaptation in southwestern Bulgaria. In: *Silva Balcanica*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/324965210_DendroAnal_CorkOak_BG, zuletzt geprüft am 23.10.2023.
- Twomey, Dara M.; Otago, Leonie; Saunders, Natalie (2011): The effects of testing procedure on critical fall height determination for third-generation synthetic turf. In: *Sports Engineering*, S. 145–151. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s12283-011-0061-8>, zuletzt geprüft am 09.10.2023.
- Twomey, Dara M.; Petrass, Lauren A.; Fleming, Paul Richard; Lenehan, Kurt (2019): Abrasion injuries on artificial turf: A systematic review. In: *Journal of Science and Medicine in Sport*, S. 550–556. Online verfügbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30503328/>, zuletzt geprüft am 24.10.2023.

Vacano, Bernhard von; Mangold, Hannah; Seitz, Christian (2021): Kunststoffe im Kreislauf: Die Zeit ist reif. In: *Chemie in unserer Zeit* 55 (6), S. 374–385.

Valeriani, Federica; Margarucci, Lory Marika; Gianfranceschi, Gianluca; Ciccarelli, Antonello; Tajani, Filippo; Mucci, Nicolina et al. (2019): Artificial-turf surfaces for sport and recreational activities: microbiota analysis and 16S sequencing signature of synthetic vs natural soccer fields. In: *Heliyon* 5 (8). Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019359948>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

van Kleunen, Mark; Brumer, Anna; Gutbrod, Lisa; Zhang, Zhijie (2019): A microplastic used as infill material in artificial sport turfs reduces plant growth. In: *Plants, People, Planet*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/336426954_A_microplastic_used_as_infill_material_in_artificial_sport_turfs_reduces_plant_growth, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Verordnung 1272/2008: Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32008R1272&qid=1702741386385>, zuletzt geprüft am 16.12.2023.

Verschoor, Anja J.; van Gelderen, Alex; Hofstra, Ulbert (2021): Fate of recycled tyre granulate used on artificial turf. In: *Environmental Sciences Europe*. Online verfügbar unter <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-021-00459-1>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Vessella, Federico; López-Tirado, Javier; Simeone, Marco Cosimo; Schirone, Bartolomeo; Hidalgo, Pablo J. (2017): A tree species range in the face of climate change: cork oak as a study case for the Mediterranean biome. In: *European Journal of Forest Research*, S. 555–569. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-017-1055-2>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Viaroli, Stefano; Lancia, Michele; Re, Viviana (2022): Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. In: *The Science of the total environment*.

Vineyard, Michael F.; Labrake, Scott; Chalise, Sajju; Clark, Morgan Lynn; Conlan, Skye T.; Porat, Zachary H. (2018): PIXE Analysis of Synthetic Turf. In: *Environment and Ecology Research*, S. 60–65. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/324519628_PIXE_Analysis_of_Synthetic_Turf, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Wagner, Jörg; Steinmetzer, Sonja; Theophil, Laura; Strues, Anna-Sophie; Kösegi, Nicole; Hoyer, Stefan (2022): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

(Texte, 31/2022). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_31-2022_evaluation_der_erfassung_und_verwertung_ausgewaehelter_abfallstroeme_zur_fortentwicklung_der_kreislaufwirtschaft.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Wallberg, Petra; Keiter, Susanne; Andersen, Tove Juhl; Nordenadler, Marianne (2016): DÄCKMATERIAL I KONSTGRÄSPLANER. RAPPORT. Hg. v. SWECO ENVIRONMENT AB. Online verfügbar unter https://www.sdab.se/media/1120/daeckmaterial_i_konstgraesplaner.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2023.

Waninger, Kevin N.; Rooney, Thomas P.; Miller, James E.; Berberian, Jeremy; Fujimoto, Alyssa; Buttaro, Bettina A. (2011): Community-Associated Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus Survival on Artificial Turf Substrates. Basic Sciences. In: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 43 (5), S. 779–784. Online verfügbar unter https://journals.lww.com/acsm-msse/Full-text/2011/05000/Community_Associated_Methicillin_Resistant.6.aspx, zuletzt geprüft am 17.08.2023.

Watterson, Andrew (2017): Artificial Turf: Contested Terrains for Precautionary Public Health with Particular Reference to Europe. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/319652981_Artificial_Turf_Contested_Terrains_for_Precautionary_Public_Health_with_Particular_Reference_to_Europe, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Weijer, Annet; Knol, Jochem; Hofstra, Ulbert (2017): Verspreiding van infill en indicatieve massabalans. Hg. v. Branchevereniging Sport en Cultuurtechniek (BSNC).

Williams, Sean; Hume, Patria; Kara, Stephen (2011): A Review of Football Injuries on Third and Fourth Generation Artificial Turfs Compared with Natural Turf. In: *Sports Medicine*, S. 903–923. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/51707506_A_Review_of_Football_Injuries_on_Third_and_Fourth_Generation_Artificial_Turfs_Compared_with_Natural_Turf, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Wuillemin, Dominic (2022): Spitzenreiter bei den Verletzten - Achtet YB nicht genug auf die Gesundheit der Spieler? In: *Berner Zeitung*, 13.08.2022. Online verfügbar unter <https://www.bernerzeitung.ch/achtet-yb-nicht-genug-auf-die-gesundheit-der-spieler-233603422704>, zuletzt geprüft am 11.10.2023.

Zhang, Xiaoran; Wang, Yinrui; Liu, Junfeng; Jiang, Yucheng; Tian, Yiran; Zhang, Ziyang (2021): Distribution and Health Risk Assessment of Some Trace Elements in Runoff from Different Types of

Athletic Fields. In: *Journal of Chemistry*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/355378064_Distribution_and_Health_Risk_Assessment_of_Some_Trace_Elements_in_Runoff_from_Different_Types_of_Athletic_Fields, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Zuccaro, Philip; Licato, James; Davidson, Emily A.; Thompson, David C.; Vasiliou, Vasilis (2023): Assessing extraction-analysis methodology to detect fluorotelomer alcohols (FTOH), a class of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), in artificial turf fibers and crumb rubber infill. In: *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016422001025>, zuletzt geprüft am 14.09.2023.

Zuccaro, Philip; Thompson, David C.; Boer, Jacob de; Watterson, Andrew; Wang, Qiong; Tang, Song et al. (2022): Artificial turf and crumb rubber infill: An international policy review concerning the current state of regulations. In: *Environmental challenges*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010022001767>, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Zweifel, Hans (1997): *Stabilization of Polymeric Materials*. Berlin: Springer.

13 Anhang

13.1 Eigene Methoden

13.1.1 Methode der Umfrage zur Spieleigenschaften

Datenerhebung und Auswertung durch Enje Clüver

Um die Frage der Sportfunktionalität und möglicher Unterschiede des subjektiven Empfindens der Spieleigenschaften von Kunststoffrasensystemen beantworten zu können, wurden zwei Befragungen 2021 und 2022 bei unterschiedlichen Nutzergruppen von Fußballplätzen durchgeführt. Teilgenommen haben

- 2021: 322 Personen durch persönliche Befragung
- 2022: 290 Personen durch online Befragung, Limesurvey

Bei der statistischen Auswertung werden die Datenzusammenhänge hinsichtlich ihrer Signifikanz durch das Programm „SPSS“ bewertet. Ein Schwerpunkt der Auswertung liegt auf der Durchführung von Hypothesentests, um von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit zu schließen und signifikante Unterschiede zu analysieren. Die Antworten wurden für die Auswertung in SPSS codiert. Dabei erhalten die positiven und höchsten Eigenschaften die Codierung 1 angelehnt am Schulnotenprinzip:

- | | | | |
|------------------|---|-----------------|---|
| – gut: | 1 | – hoch: | 1 |
| – eher gut: | 2 | – eher hoch: | 2 |
| – eher schlecht: | 3 | – eher niedrig: | 3 |
| – schlecht: | 4 | – niedrig: | 4 |

Die nichtparametrischen Tests geben Rückschlüsse auf den Zusammenhang des Kunststoffrasensystems einer Sportfreianlage in Bezug zur Sportfunktionalität. Vorteil nichtparametrischer Tests ist, dass diese geringen Anforderungen an die Daten stellen (Brosius 2018). Bei den Fragen 6.1- 6.8 liegt ein Ordinalskalenniveau vor. Die Auswertung erfolgt nach Brosius über die Betrachtung und den Vergleich von mittleren Rangwerten (Brosius 2018). Folgend wird der Kruskal-Wallis-Test gewählt. Dieser Test prüft, ob die Wahrnehmung der unabhängigen Stichprobe auf die Wahrnehmung der Grundgesamtheit übertragen werden kann. Einen möglichen Einfluss des Geschlechts auf die Wahrnehmung der Spieleigenschaften wird ebenfalls über den Kruskal-Wallis-Test geprüft.

Über den Signifikanztest wird ermittelt, ob die Nullhypothese über das Fünf-Prozent-Signifikanzniveau abgelehnt werden kann. Die Nullhypothese gibt vor, dass kein Unterschied oder Zusammenhang zwischen den betrachteten Faktoren besteht. Übertragen bedeutet das Niveau, dass bei einer Wahrscheinlichkeit geringer als fünf Prozent der Stichprobenbefund auf die Gesamtheit übertragen

werden kann und die Irrtumswahrscheinlichkeit gering ist (Tausendpfund 2019, S. 142). Folgende Einteilung des Signifikanzniveaus wird angenommen:

- $p > 0,05$: nicht signifikant
- $0,05 \geq p > 0,01$ schwach signifikant
- $0,01 \geq p > 0,001$ stark signifikant
- $0,001 \geq p$ sehr stark signifikant (Stahel 2007, S. 193)

Der Einfluss des Nutzeralters wird über die ein- und zweifaktorielle Varianzanalyse untersucht (allgemeines lineares Modell). Die Varianzanalyse ist durchführbar, wenn eine Varianzhomogenität ermittelt über den Levene-Test gegeben ist ($p = > 0,003$) (Bühl 2018, S. 531). Bei der Varianzanalyse wird der lineare Zusammenhang zwischen einem oder mehreren unabhängigen Merkmalen untersucht. Dabei findet ein Vergleich der Mittelwerte statt. Die separate Betrachtung der Füllstoffe und der mögliche Einfluss der Spielausgänge wird über eine einfaktorielle Varianzanalyse ermittelt.

Die Gesamtbetrachtung der gesamten Altersgruppen findet über die zweifaktorielle Varianzanalyse statt. Es werden mehrere Einflussgrößen betrachtet (Mittag und Schüller 2020, S. 308).

Für den Fall, dass die Nullhypothese (zwischen zwei Gruppen besteht ein statistisch signifikanter Unterschied) abgelehnt werden muss, können über den paarweisen Gruppenvergleich die Füllstoffe ermittelt werden, die diese Unterschiede aufweisen. Um mögliche Auswirkungen des Alters der Nutzer auf die Wahrnehmung der Spieleigenschaften zu untersuchen, wird das Alter in Altersgruppen zusammengefasst und codiert.

- < 20: 1
- 21-28: 2
- > 28: 3
- Keine Angabe: 9

Es ist davon auszugehen, dass es subjektive Unterschiede bei der Beantwortung gibt. Folgend wird die Auswertung der Angaben die zweifaktorielle Varianzanalyse für Ränge nach Friedman bei verbundenen Stichproben gewählt (nicht parametrischer Mittelwertvergleich). Durch den Friedman-Test werden Ränge statt der tatsächlichen Werte verwendet und dadurch die personenbezogenen Daten und Einflüsse minimiert. Die deskriptive Statistik zeigt die mittleren Ränge und die Häufigkeiten an.

Die Auswertung der Bewertung verschiedener Kunststoffrasensysteme mit einer Note nach dem Schulnotensystem in Abhängigkeit vom Nutzeralter erfolgt nach der bivariate Datenanalyse. Die Bewertung der verschiedenen Kunststoffrasensysteme über ein Schulnotensystem werden dem ordinal Skalenniveau zugeordnet. Folgend wird ein ordinales Zusammenhangsmaß verwendet. Dabei wird der Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen untersucht. Die Stärke der Beziehung zwischen diesen beiden Merkmalen wird durch einen Korrelationskoeffizienten definiert. Der Korrelationskoeffizient nach Spearmann stellt ein angemessenes Zusammenhangsmaß dar, um die Beziehungsstärke von Nutzeralter und Bewertung der Kunststoffrasensysteme zu quantifizieren (Tausendpfund 2019, S. 127 ff.).

Die Stärke der Korrelationen sind folgend einzuordnen:

- $r < 0,5$ schwache Korrelation
- $0,5 < r < 0,8$ mittlere Korrelation
- $0,8 < r$ starke Korrelation (Fahrmeir et al. 2016, S. 130)

Veranschaulicht wird der Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen über ein Streuungsdiagramm (Tausendpfund 2019, S. 110).

Umfrage im Rahmen des Forschungsprojekt UKuRA zu den Spieleigenschaften von Kunststoffrasensystemen

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen des Forschungsprojektes „Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag- und -verbrauch (UKuRA)“, gefördert aus Mitteln des Bundesinstitutes für Sportwissenschaften (BISp), werden Einschätzungen der Nutzer zu den Spieleigenschaften unterschiedlicher **Kunststoffrasensysteme** wissenschaftlich untersucht. Das Projekt wird geleitet von Prof. Thieme-Hack.

Die Teilnahme an dieser Umfrage bleibt strikt anonym. Die Angabe zum Verein dient zur späteren Zuordnung des Infills und werden nicht weiterverwendet. Bei Fragen melden Sie sich gerne unter enje.cluever@hs-osnabrueck.de. Weitere Informationen finden Sie unter www.hs-osnabrueck.de/ukura.

Vielen Dank im Voraus für die Unterstützung in dem Forschungsprojekt.

1. Vereinsanlage (Vereinsname): _____
2. Geschlecht: weiblich männlich divers
3. Alter: _____
4. Ausgang des Spiels: gewonnen verloren unentschieden k. Angaben
5. Spielstätte: Heim Auswärts
6. Spieleigenschaften:

	gut	eher gut	eher schlecht	schlecht
Wie war die Standfestigkeit?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie war das Ballrollverhalten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie war das Ballsprungverhalten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie war die Härte des Kunststoffrasenspielfeldes?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	hoch	eher hoch	eher niedrig	niedrig
Wie hoch war die Bereitschaft zum Grätschen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie hoch war die Bereitschaft für ein Tackling?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie hoch würden Sie das Verletzungsrisiko einschätzen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie war die Rutschfestigkeit auf dem Kunststoffrasenspielfeld?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7. Bewerten Sie verschiedene Kunststoffrasensysteme mit einer Note nach dem Schulnotensystem:

Füllmaterial	1	2	3	4	5	6	Keine Angabe möglich
Gummigranulat							
Sand							
Kork							
Ohne Füllmaterial							

13.1.2 Methode zur Untersuchung des Faserverschleißes

Die Durchführung und Messung auf den Kunststoffrasenplätzen erfolgte in vier Schritten.

Im ersten Schritt werden die jeweiligen Daten des Spielfeldes aufgenommen.

Darunter fällt das Ausmessen des Spielfeldes mit einem Messrad. Zusätzlich werden die Abstände zwischen der Außenlinie des Spielfeldes und des Spielfeldrandes vermessen.

Als weitere Daten werden die Einfüllhöhen der Spielfelder nach FIFA-Testmethode (FIFA TM 21) gemessen. Die jeweiligen Messpunkte A bis S sind der Abbildung 49 zu entnehmen. Eine Fotodokumentation des gesamten Spielfeldes mit den Prüfstellen wird ebenfalls durchgeführt.

Im zweiten Schritt werden die jeweiligen Prüfstellen bestimmt. Die jeweilige Position der Prüfstellen ist in Abbildung 49 abgebildet. Für die Plätze in den Niederlanden, Großbritannien und Italien wurden jeweils Proben an den Prüfstellen 1, 2, 3, 4 und 5 entnommen. Für die Plätze, die in Hamburg untersucht werden, entfallen zwei Prüfstellen und es werden Proben an den Prüfstellen 1, 2 und 4 entnommen.

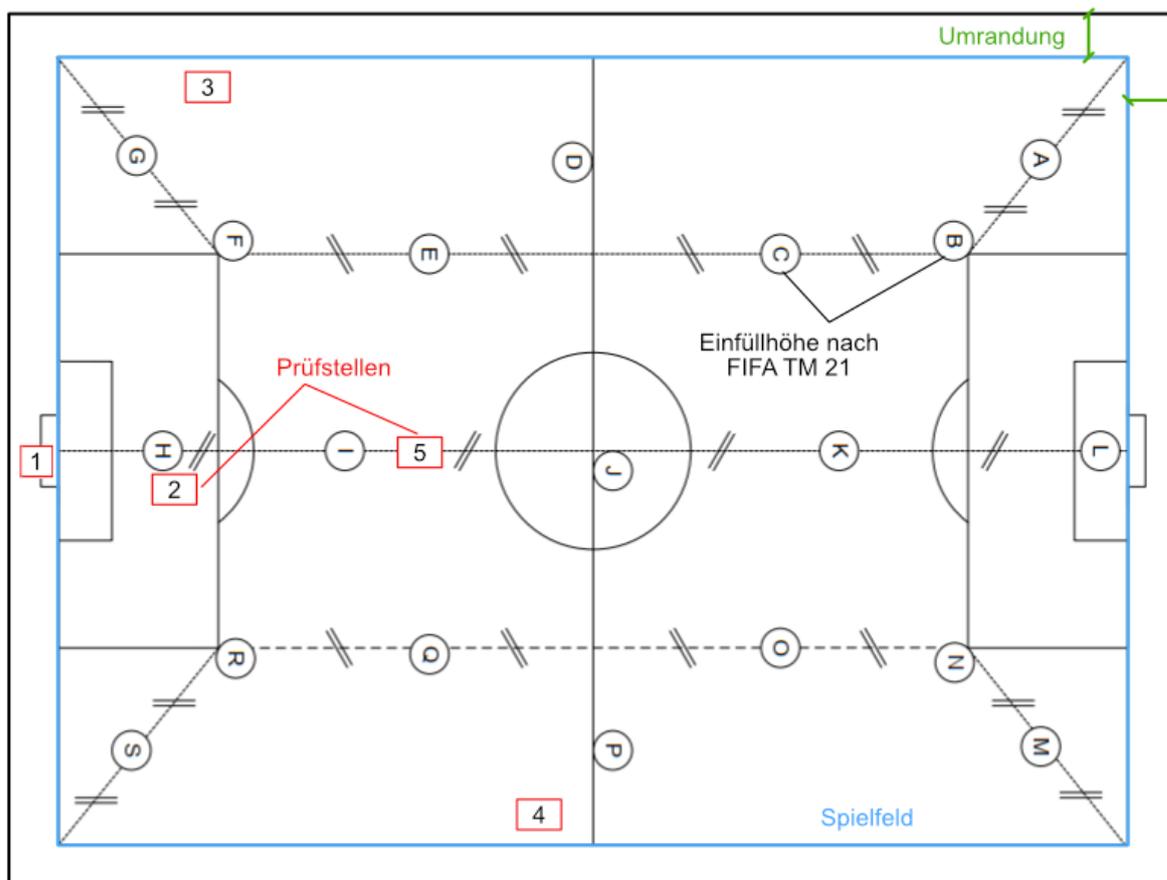


Abbildung 49: Übersicht der Prüfstellen und Messpunkte (Fédération Internationale de Football Association (FIFA) 2022, verändert)

Im dritten Schritt wird der Füllstoff soweit vorhanden mittel Staubsauger des Modells Milwaukee M18 VC-2 bis zum Grundgewebe aufgesaugt. Mit diesem Schritt werden die Faserbündel freigestellt, um die Bündelentnahme zu erleichtern. Der Arbeitsschritt ist in Abbildung 50 abgebildet.



Abbildung 50: Absaugen des Füllstoffes mittel Milwaukee M18 VC-2

Im vierten Schritt werden die freiliegenden Faserbündel mit einer Schere direkt am Trägergewebe abgeschnitten und in Tütchen abgepackt. Die Tütchen werden jeweils mit der Nummer der Prüf-
stelle und der Zahl des Faserbündels beschriftet. Insgesamt werden pro Prüf-
stelle 20 Faserbündel entnommen (vgl. Abbildung 51).



Abbildung 51: Faserentnahme

Die Labormessungen wurden an der Hochschule Osnabrück im Labor für Bodenmechanik für alle Faserproben unter gleichen Bedingungen in drei Schritten durchgeführt (vgl. Abbildung 52). Um eine gleichmäßige Temperatur und Feuchtigkeit der Proben zu gewährleisten, werden die Fasern davor entsprechend der DIN EN ISO 139:2011-10 und der DIN EN ISO 291:2008-08 konditioniert und getrocknet.



Abbildung 52: Labortechnische Arbeiten

Im ersten Schritt werden die Faserbündel aus den Tüten entnommen und auf Vollständigkeit mit den Angaben der Hersteller, welche Faseranzahl pro Faserbündel angegeben werden, verglichen. Die Fasern werden anschließend auf Verunreinigung untersucht und dementsprechend gereinigt (vgl. Abbildung 53).

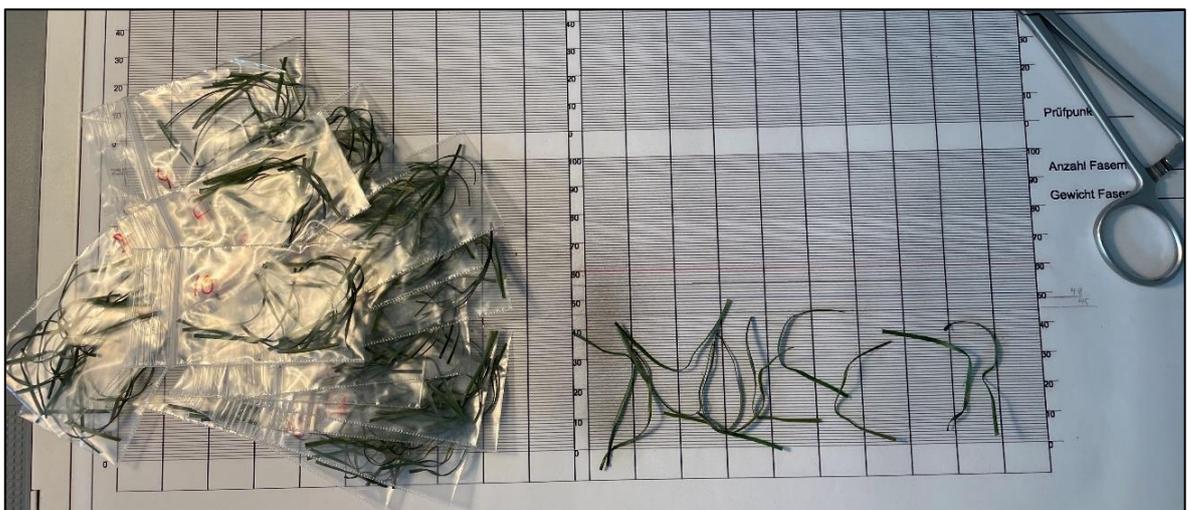


Abbildung 53: Untersuchung der Fasern

Im zweiten Schritt werden die Fasern auf möglichen Faserbruch untersucht. Durch diesen Arbeitsschritt wird eine Differenzierung zwischen Faserbruch und Faserverschleiß möglich. Dazu werden die Fasern, wie in Abbildung 54 zu sehen ist, einzeln je Faserbündel auf einen Auswertungsbogen gelegt und vermessen.



Abbildung 54: Differenzierung zwischen Faserbruch und Faserverschleiß durch Ausmessen

Im dritten Schritt der Auswertung im Labor wird die Wägung mittels Analysewaage im Labor durchgeführt und anschließend dokumentiert. Hier werden die Faserbündel im Ganzen gewogen. Die Grammgenauigkeit wird in 10^{-4} angegeben (vgl. Abbildung 55).



Abbildung 55: Analysewaage

Der Faserverschleiß wurde anhand des Gewichtes der einzelnen Faserbündelproben ermittelt. Zur Auswertung der Daten wird angenommen, dass die Nutzungsintensität den Faserverschleiß fördert. Aus diesem Grund werden den Prüfstellen, Nutzungsintensitäten zugeordnet.

Prüfstelle 1: keine bis geringe Nutzungsintensität → Kontrollprüfstelle

Prüfstelle 2: intensive Nutzungsintensität

Prüfstelle 3 - 5: extensive Nutzungsintensität

Es wird davon ausgegangen, dass an der Prüfstelle 1 kein beziehungsweise ein sehr geringer Faserverschleiß stattfindet. Deshalb wurde dieser Punkt als Kontrollstelle gewählt. Zur Auswertung der Daten wurden alle Faserproben, die an den Prüfstellen 2 bis 5 entnommen wurden mit dieser Prüfstelle 1 verglichen. Damit die Prüfstelle 1 als Kontrollprüfstelle keine Fehlerindikatoren bezüglich fehlender Fasern mit sich bringt, wurden die Werte der Prüfstelle korrigiert und mögliche fehlende Fasern proportional ergänzt. Eine Korrektur der Prüfstelle 2 bis 5 erfolgte nicht. Für die Auswertung des prozentualen Verschleißes wird dieser in Abhängigkeit von der Zeit, mit der am besten angepassten Regressionsfunktion modelliert.

Fehleranalyse

Für die bessere Einordnung der Daten wird auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen und deren jeweilige Gewichtung. In einer Voruntersuchung zu der Forschungsarbeit wurde von einem Quadratmeter eines neuen Kunststoffrasens die Faserbündel wie in der Methode beschrieben entnommen. Insgesamt wurden 1.500 Faserbündel entnommen und gewogen. Der Variationskoeffizient der Ergebnisse dieser Voruntersuchung beträgt 3,4 % bei einer Ausreißerquote von 4,2 %. Die bereits vorhandene große Streuung innerhalb eines neuen Kunststoffrasens reduziert die statistische Belastbarkeit der gewonnenen Daten dieser Studie.

Die Annahme, dass an der Prüfstelle 1, die als Kontrollpunkt dient, kein Abrieb vorhanden ist, weil sie im Torbereich liegt und keine Nutzungsintensität erfährt, ist nicht korrekt. Gebrochene und abgenutzte Fasern sind auch an der Prüfstelle 1 zu finden. Selbst wenn die fehlenden Fasern in der Kontrollstelle berücksichtigt werden, sind die berechneten Massenverluste geringer als die tatsächlichen Massenverluste.

Der Massenverlust an der Kontrollstelle kann mit dieser Methode nicht bestimmt werden. Ebenfalls ist die Verwendung der Herstellerdaten als Kontrollprüfstelle, nicht sinnvoll, da diese eine Toleranz von +/- 10 % aufweisen (vgl. Abbildung 56).

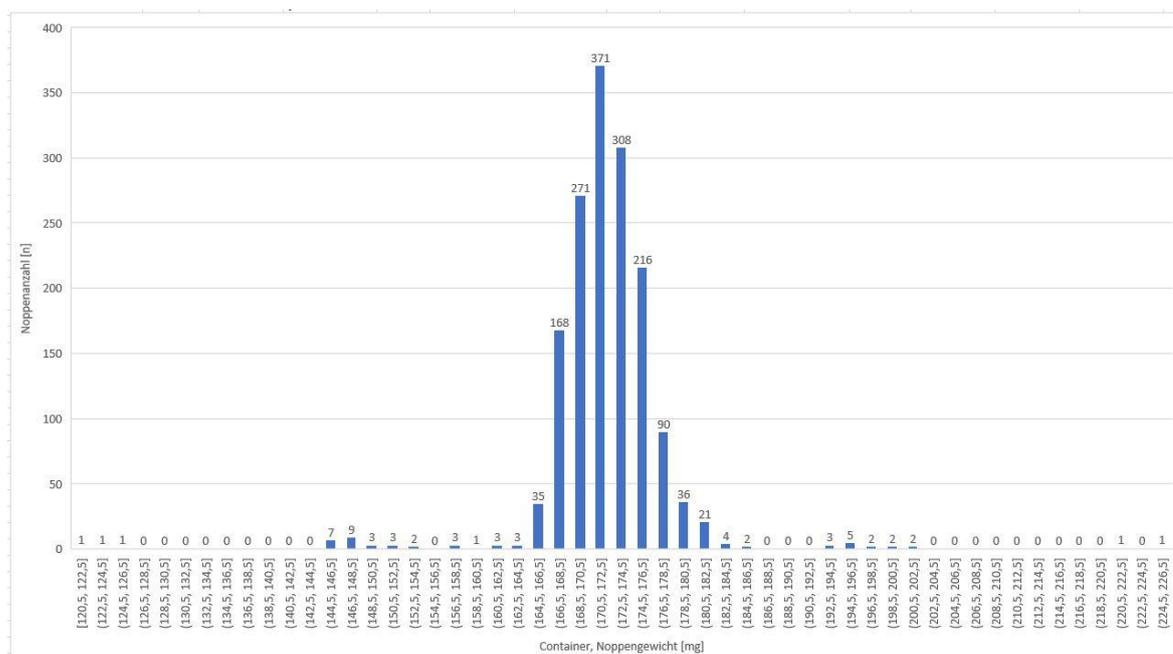


Abbildung 56: Varianz der Masse je Faserbündel bei neuem Kunststoffrasen

Als weitere Fehlerquelle muss die Tatsache genannt werden, dass ein Abschneiden der Faserbündel direkt am Trägergewebe nicht immer vollständig möglich ist. Schon kleine Schrägstellungen der Schäre können zu unsauberem Abschneiden und einem zurückbleiben von Faserbündelmasse am Trägergewebe führen. Die Schrägstellung kann beispielsweise aus dichter Tuftung der Faserbündel resultieren. Da diese Fehlerquelle an jedem Stichprobenpunkt vorhanden ist, trägt sie zu der Erhöhung der Varianz bei, hat aber nur einen sehr geringen Einfluss auf die berechneten Massenverluste. Alternative Methoden, wie das Ziehen der Fasern, weisen größere Fehlerquellen auf, da die Schlingen unter dem Trägergewebe unterschiedlich lang sind und die Polschicht während der Produktion auf eine einheitliche Höhe über dem Trägergewebe geschnitten wird. In Abbildung 57 ist zu sehen wie unterschiedlich die Schlaufengrößen der Faserbündel unterhalb des Trägergewebes ausfallen können.



Abbildung 57: Unterschiedliche Schlaufengrößen der Faserbündel unterhalb des Trägergewebes

Des Weiteren hat sich das Herausziehen der Fasern aus dem Trägergewebe nicht als effektive Methodik bewährt. Die Faserstabilität liegt bei vielen in der Praxis untersuchten Kunststoffrasenplätzen unterhalb des Ausziehwiiderstandes der Tuftung. So reißen die einzelnen Fasern beim Versuch sie aus dem Trägergewebe herauszuziehen.

Bewertung der Sportplätz in Hamburg, Deutschland

Die Box des Boxplots stellt den Bereich dar, in dem 50 % der ermittelten Faserbündelgewichte liegen. Der Median (Wert, der die nach Größe sortierte Datenreihe halbiert) ist als horizontale Linie innerhalb der Box dargestellt. Die Einschnürungen/Kerben der Box zeigen das 95%-Konfidenzintervall für den Median. Die Antennen/Whisker zeigen das maximale bzw. minimale Gewicht an, sofern dieses nicht mehr als das 1,5-fache der Boxhöhe von der Box entfernt ist. Punkte, die über oder unter den Antennen liegen, sind wahrscheinlich Ausreißer.

Methodendiskussion:

Die Messergebnisse weisen eine große Streuung auf. Die intensive Nutzungszone bei der Prüfstelle 2 weist den höchsten durchschnittlichen Faserverslust auf. Die extensiven Nutzungszonen der Prüfstelle 3 bis 5 weisen erwartungsgemäß geringere prozentuale Masseverluste auf. Die negativen Werte sind auf die irrtümliche Annahme zurückzuführen, dass an der Prüfstelle 1 keine Massenverluste auftreten.

Verstärkt wird dies durch statistische Ausreißer aufgrund der hohen Varianz. Insgesamt kann ein signifikanter Massenverlust der Fasern festgestellt werden. Da jedoch die Messergebnisse eine hohe Varianz aufweisen, ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen Massenverlust und ortsspezifischen Eigenschaften, wie geografische Lage, Füllstofftyp oder Faserkubatur, nachweisbar. Es lassen sich jedoch statistische Trends beobachten. So nimmt der beobachtete Massenverlust beispielsweise bei höherem Platzalter zu. Die bisherigen Untersuchungen geben einen ersten Hinweis auf die Abnutzungsraten von Kunstrasen. Die Methodik ist ein Mittel zur objektiven Messung des Faserverlusts auf Spielfeldern. Um die Ergebnisse in der Aussagekraft zu stärken, ist allerdings eine höhere Anzahl an Daten notwendig. Hierfür ist vorgesehen weiterhin Daten zu sammeln.

13.2 Eigene Ergebnisse

13.2.1 Auswertungen Faserverschleiß bei Kunststoffrasensystemen

Hamburg, Datenerhebung durch Luca Schmidt

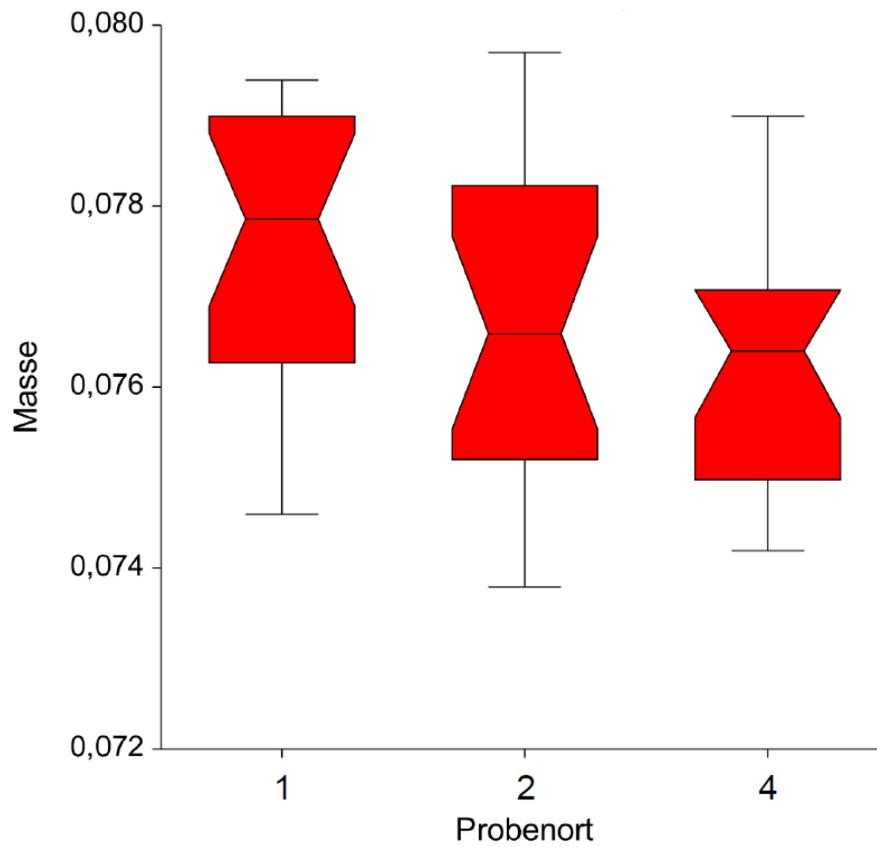


Abbildung 58: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 1

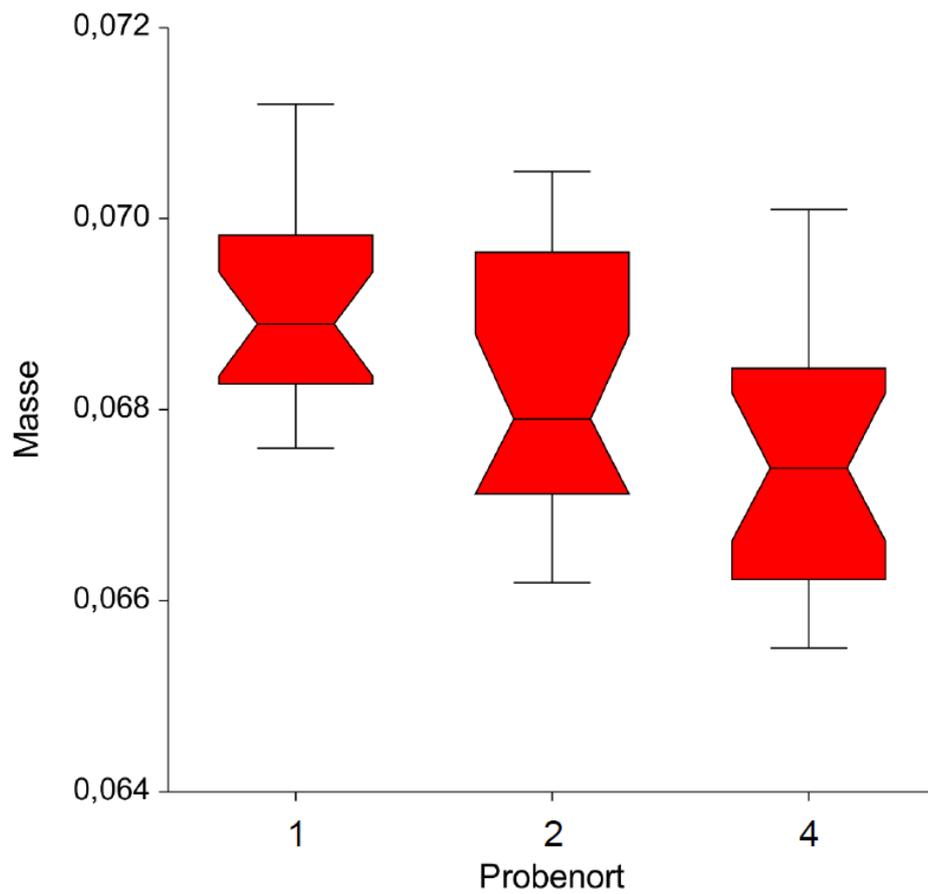


Abbildung 59: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 2

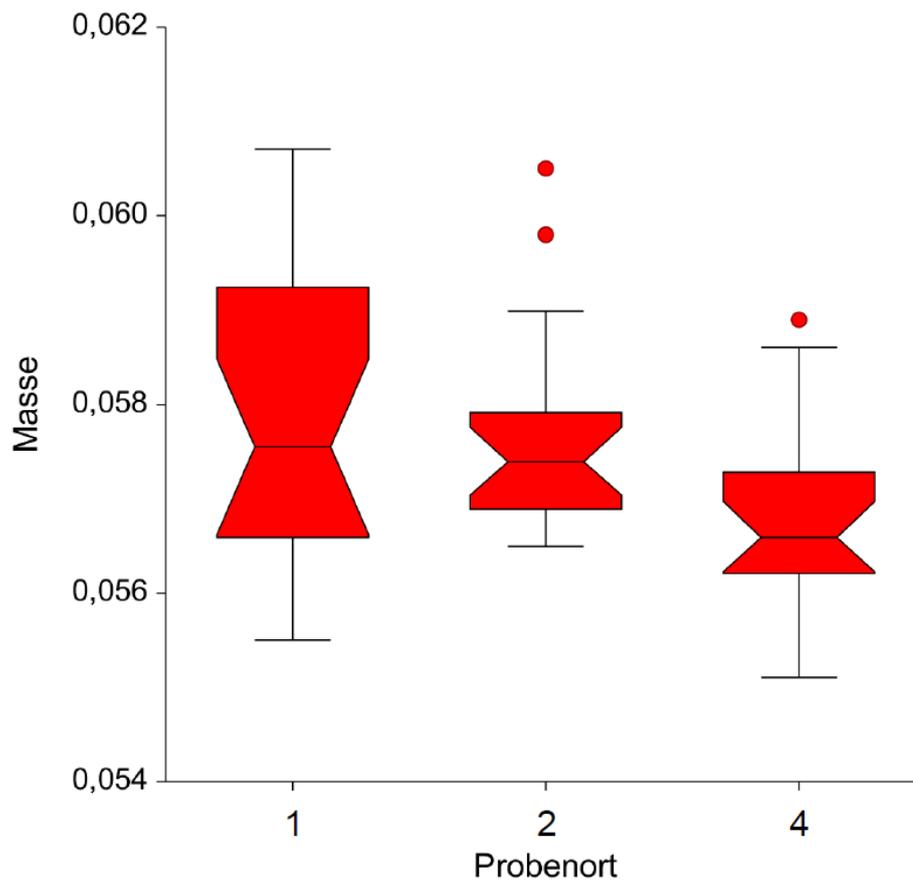


Abbildung 60: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 3

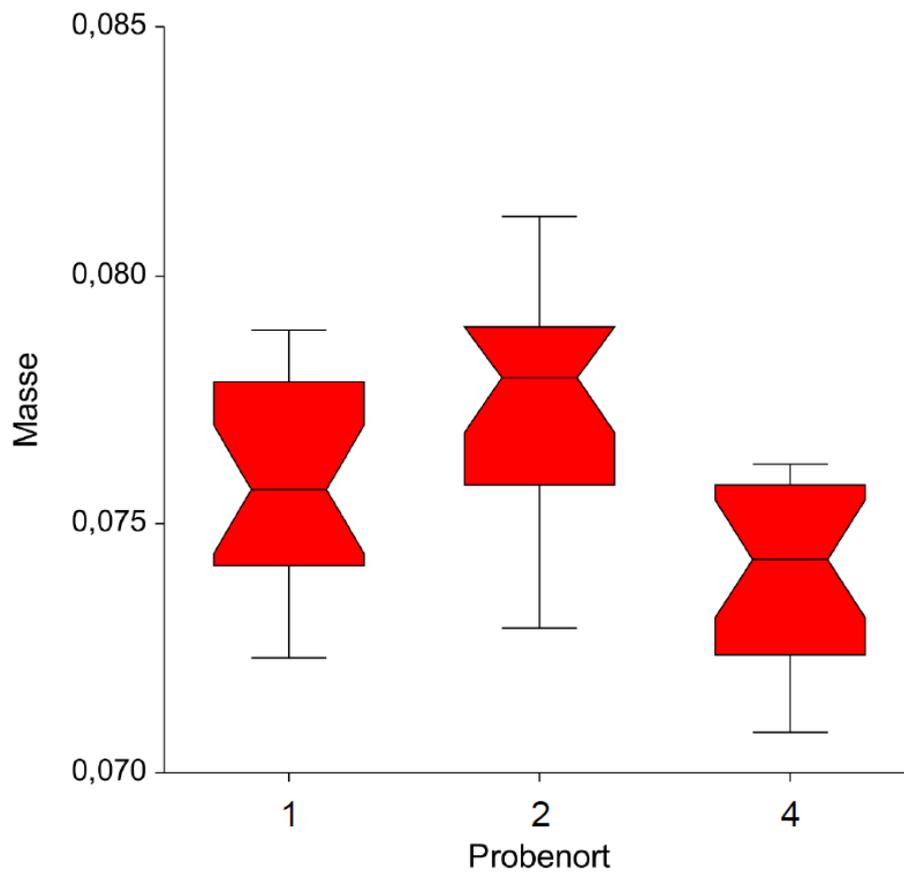


Abbildung 61: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 4

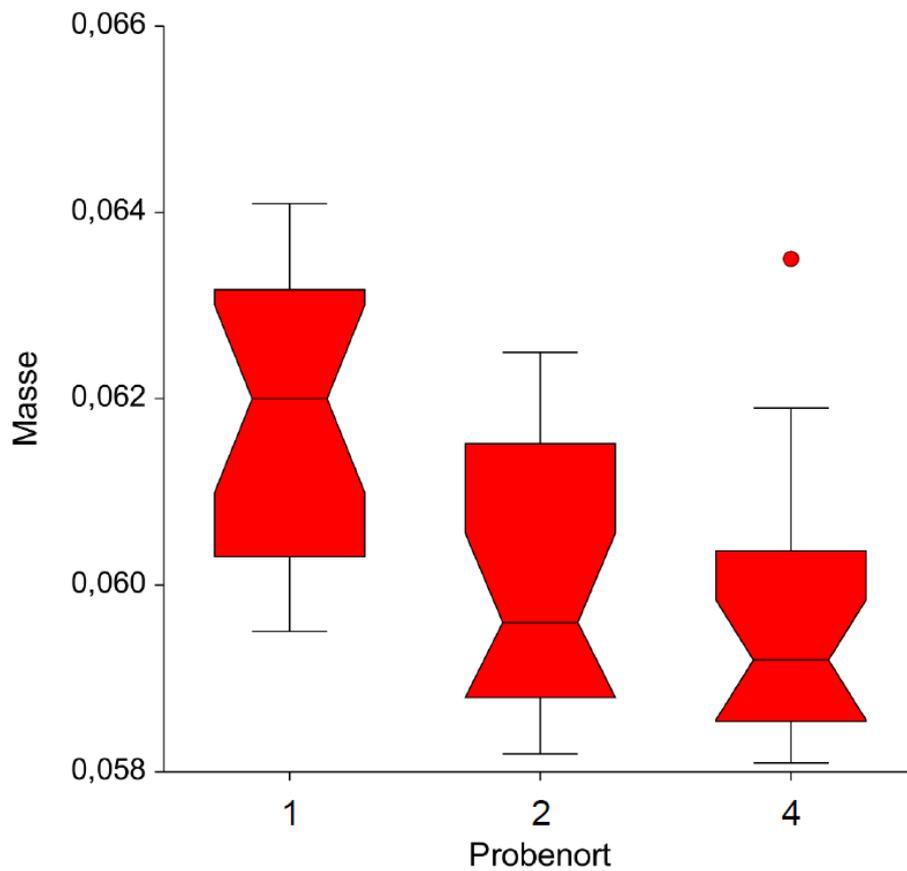


Abbildung 62: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 5

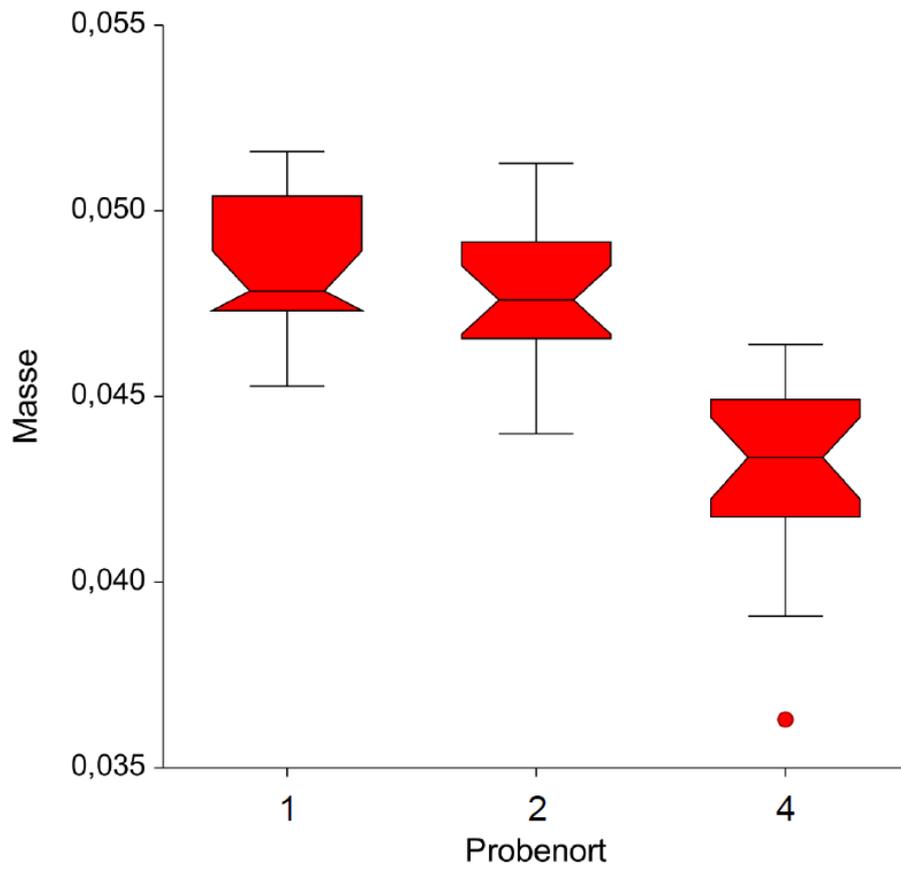


Abbildung 63: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 6

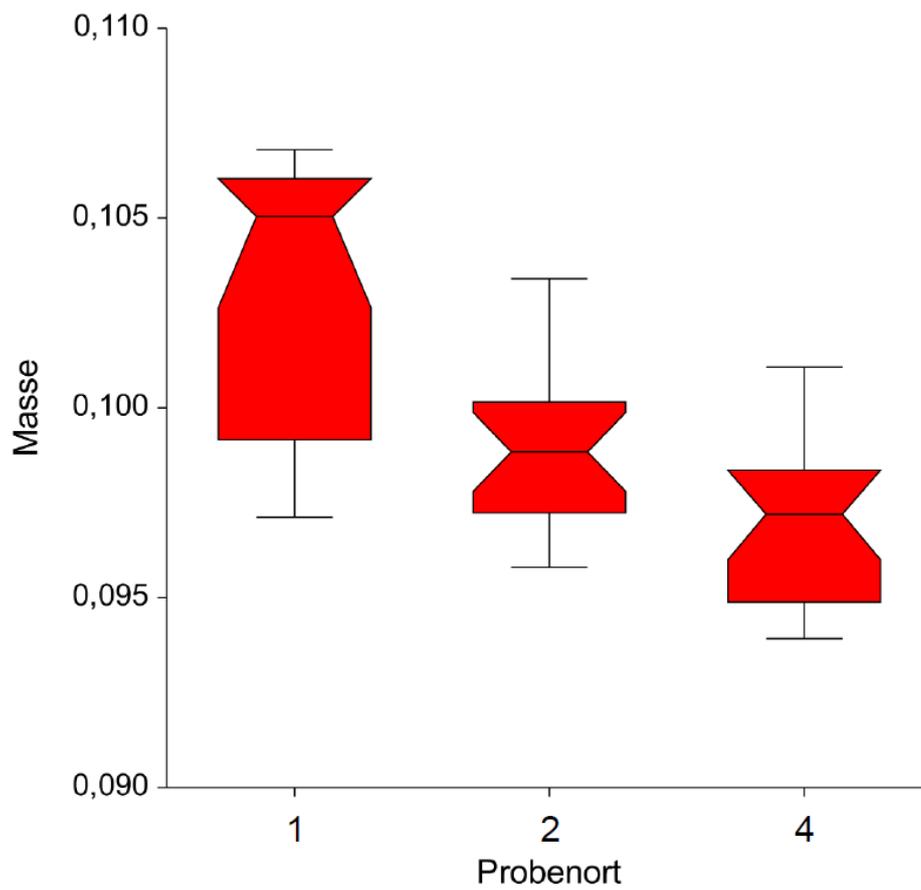


Abbildung 64: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 7

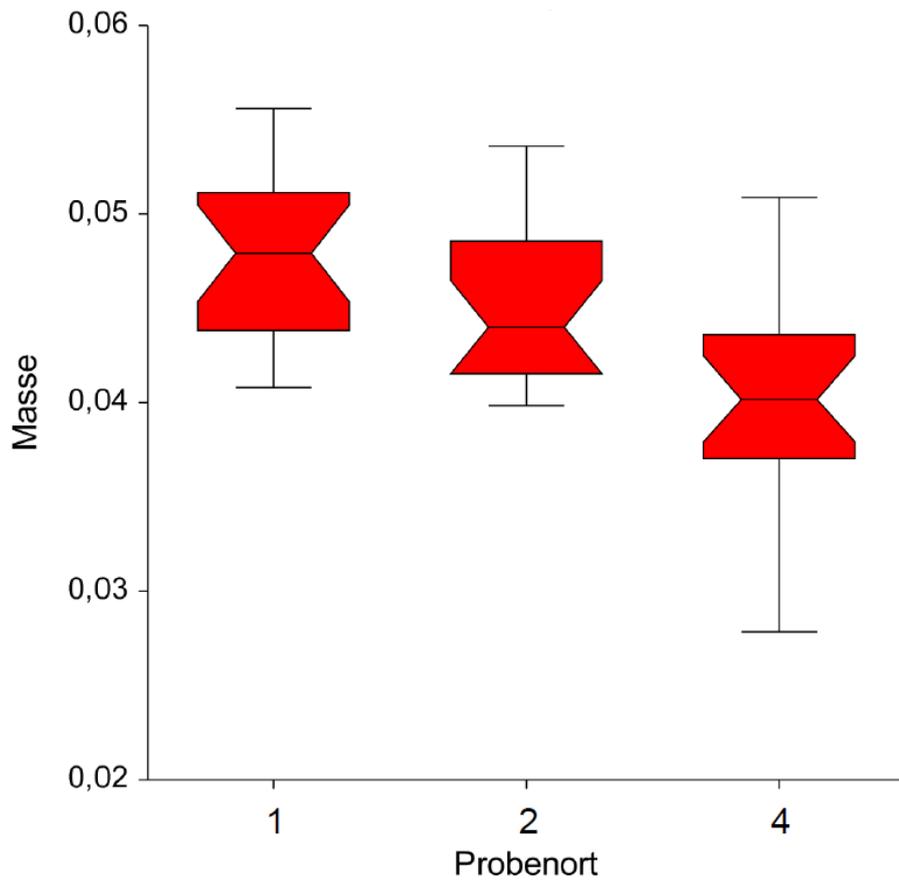


Abbildung 65: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 8

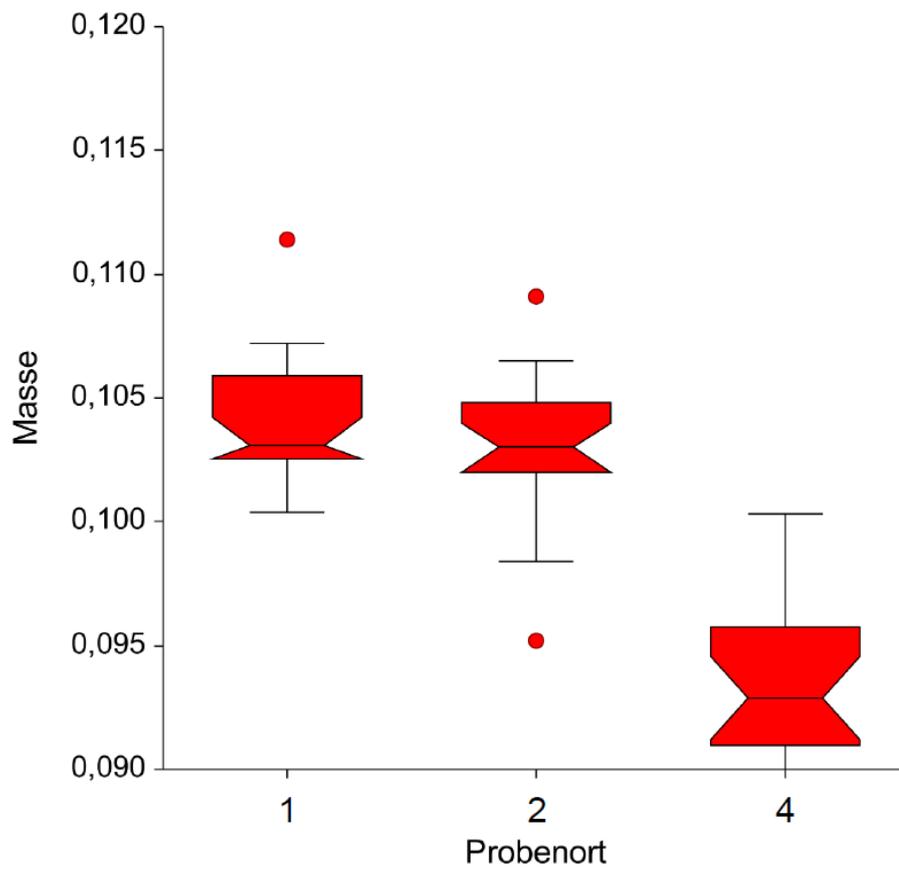


Abbildung 66: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 9

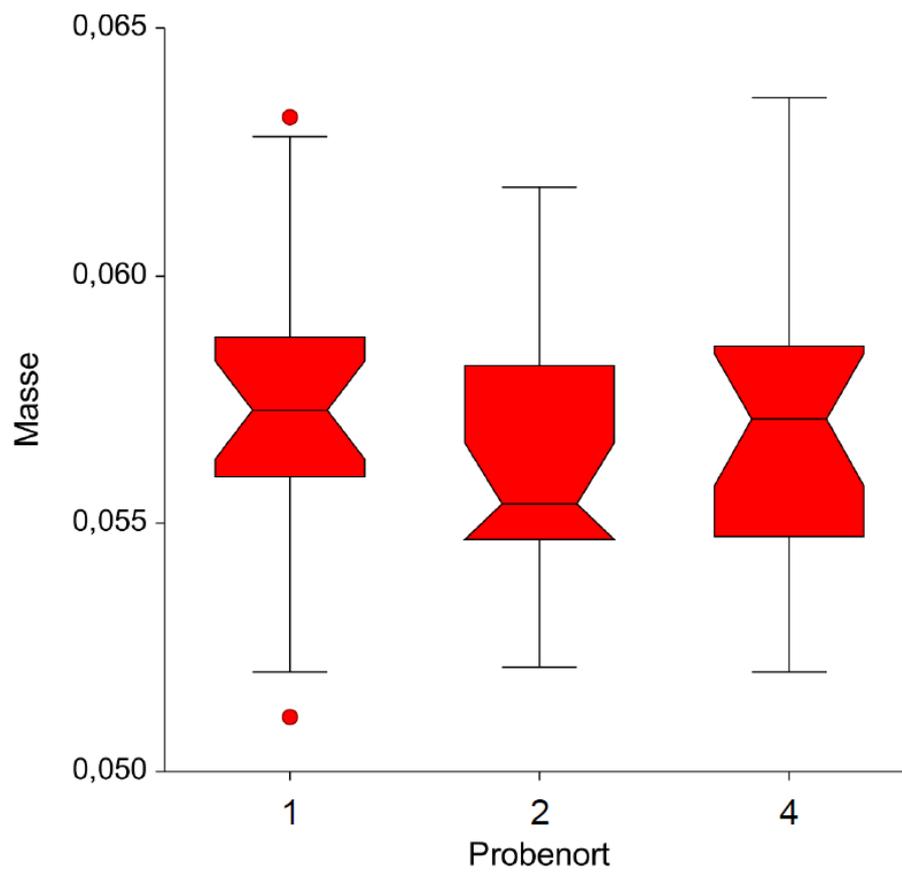


Abbildung 67: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 10

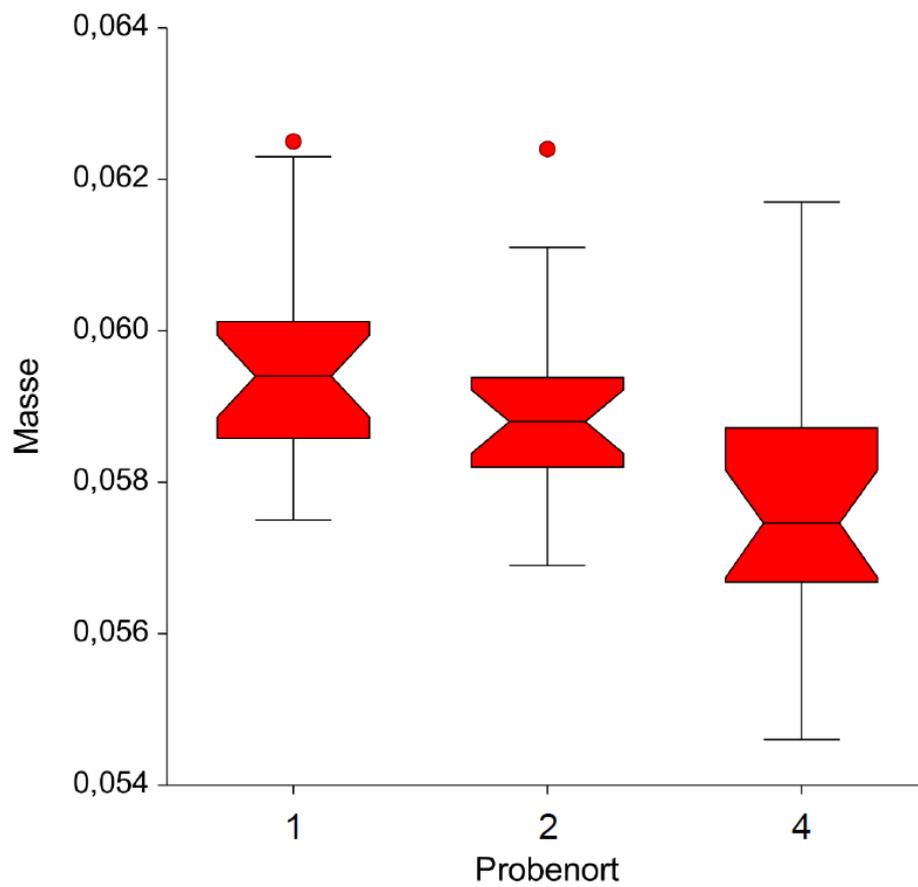


Abbildung 68: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 11

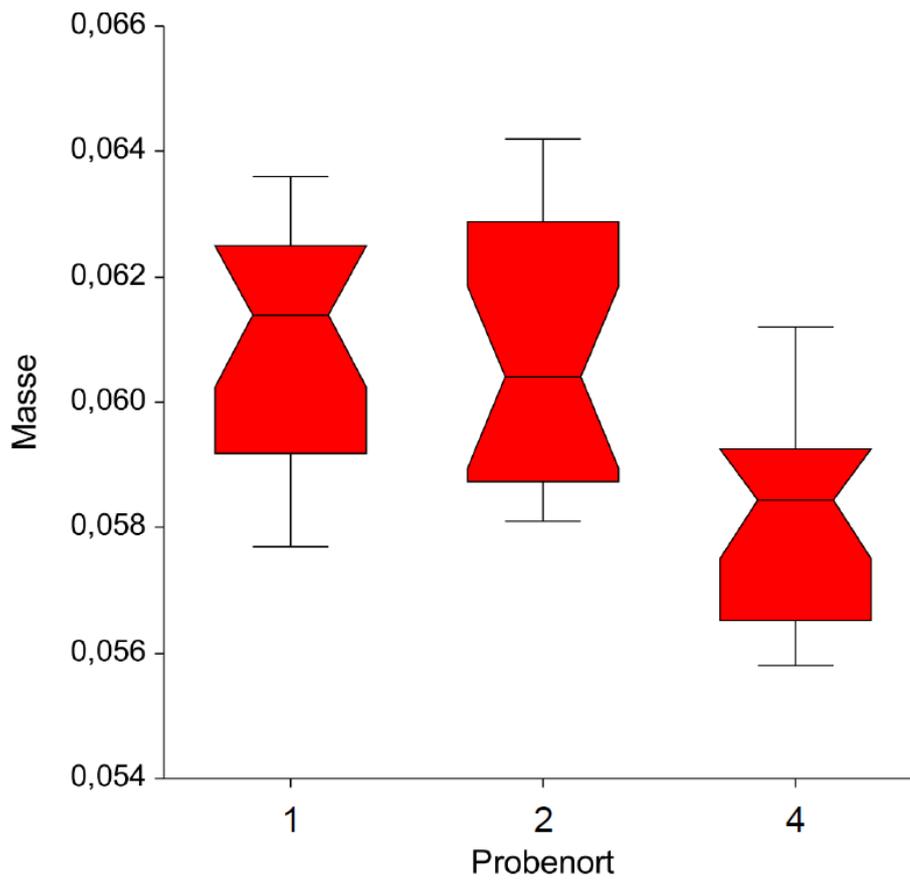


Abbildung 69: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 12

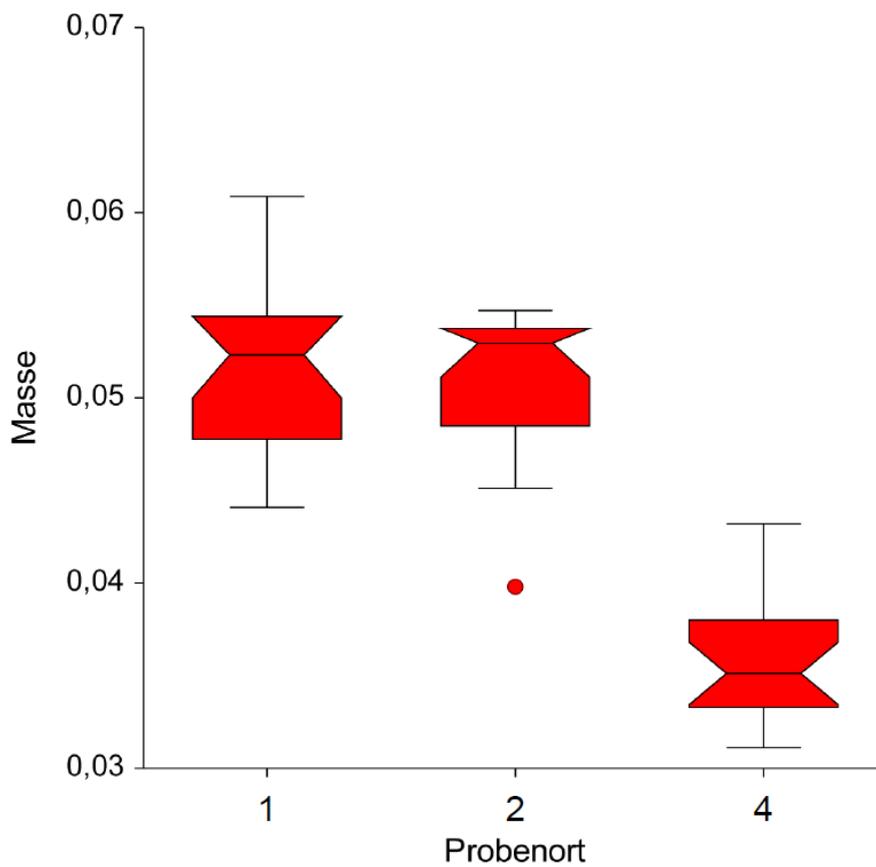


Abbildung 70: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 13

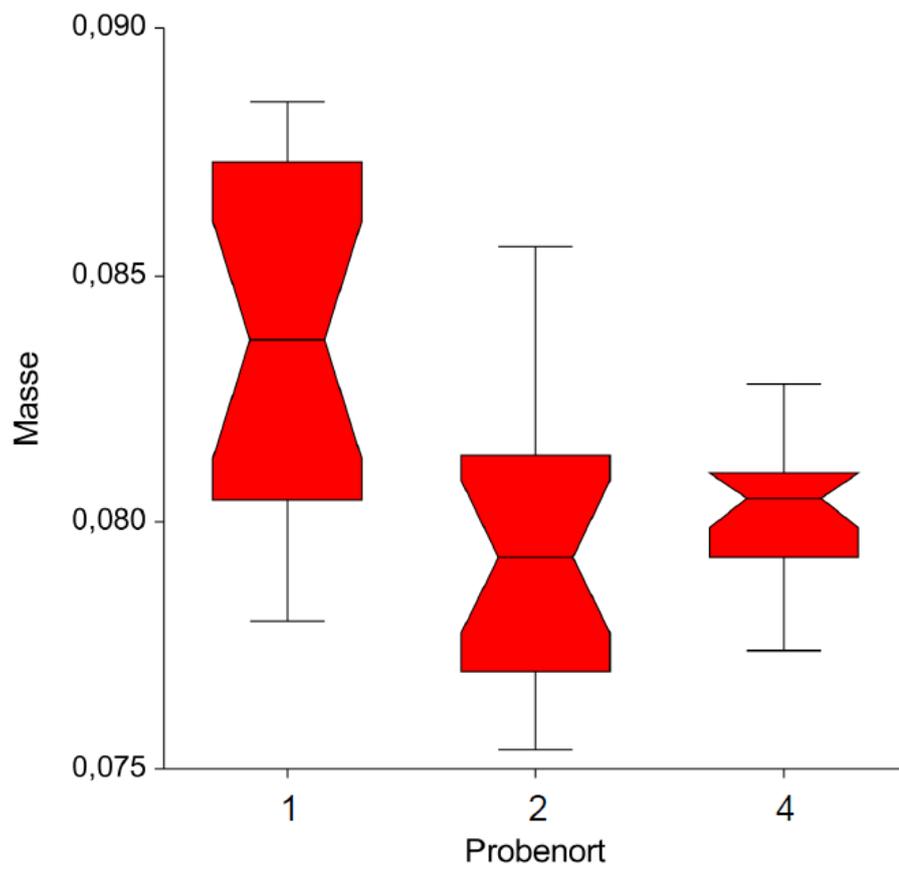


Abbildung 71: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 14

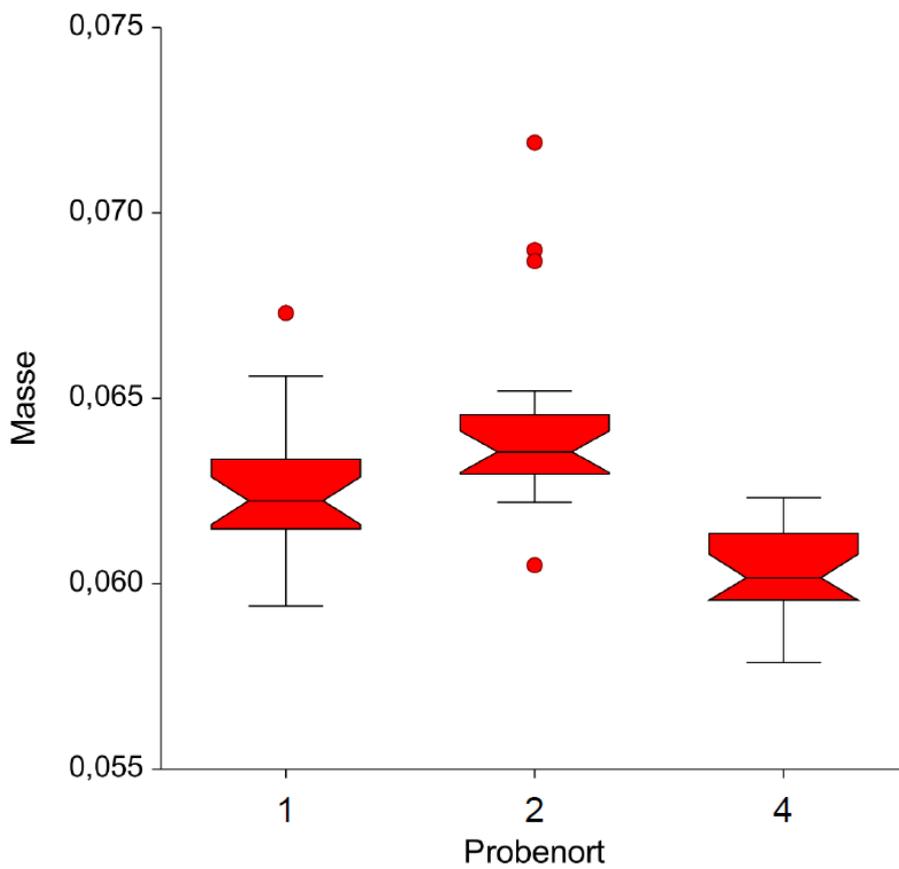


Abbildung 72: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 15

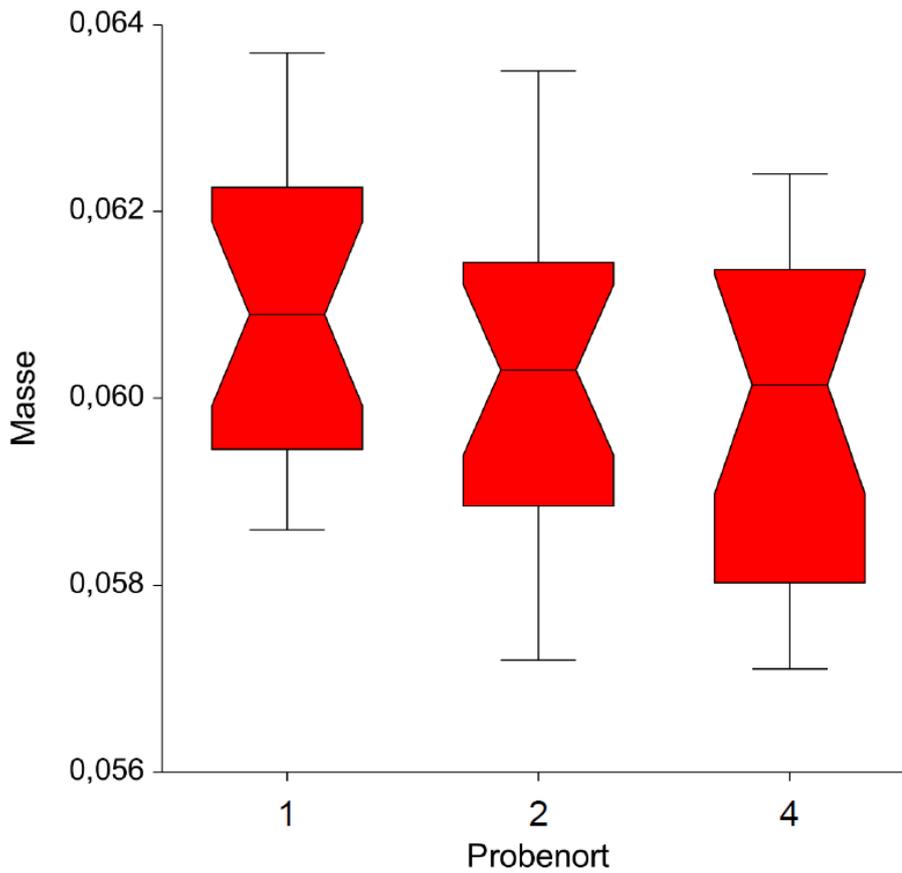


Abbildung 73: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 16

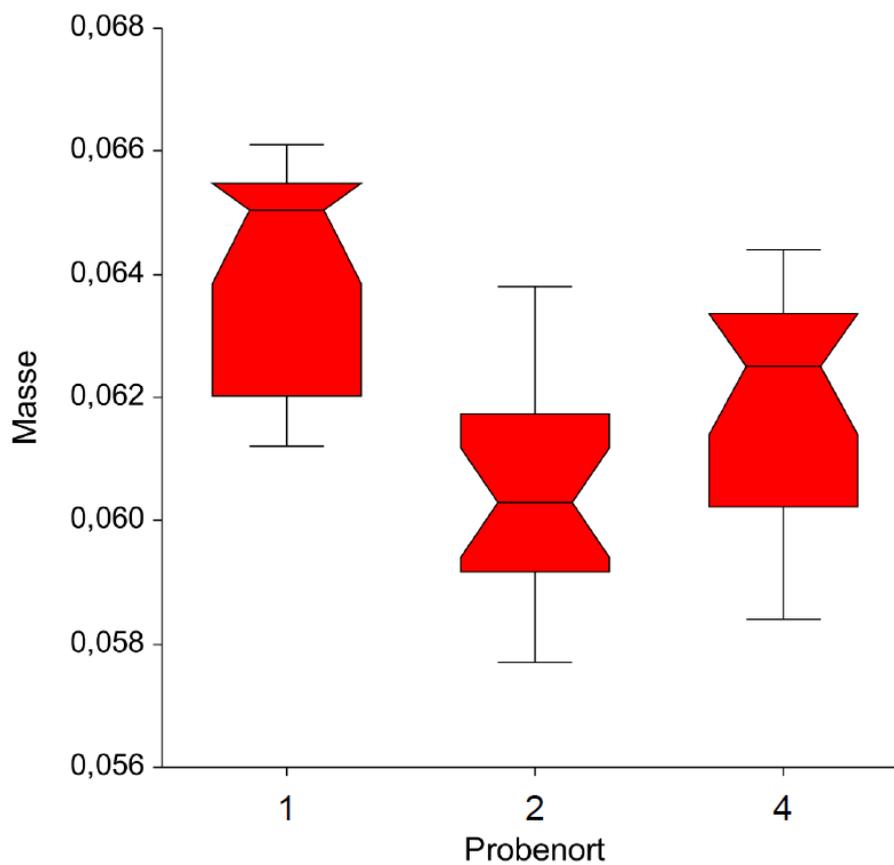


Abbildung 74: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 17

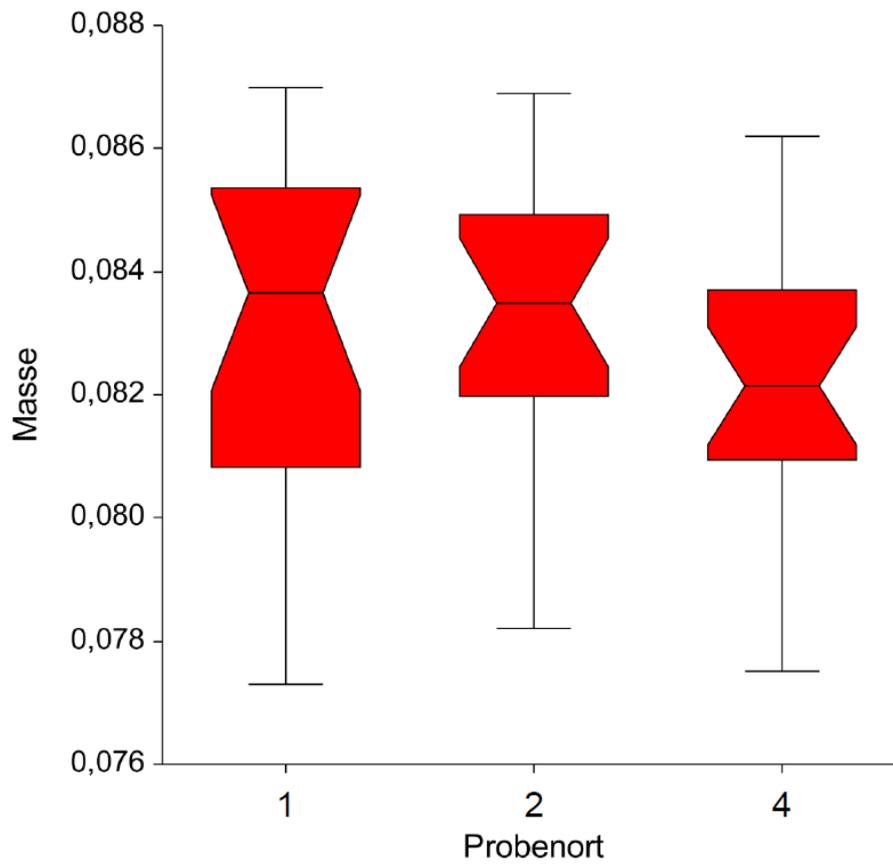


Abbildung 75: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 18

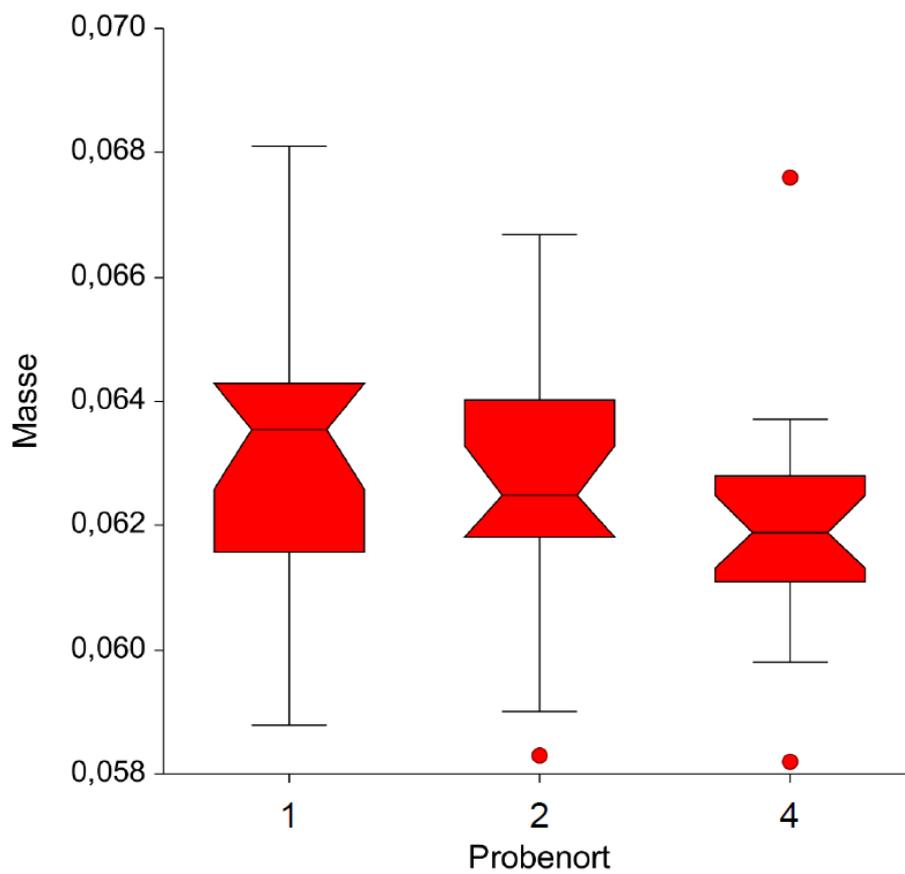


Abbildung 76: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 19

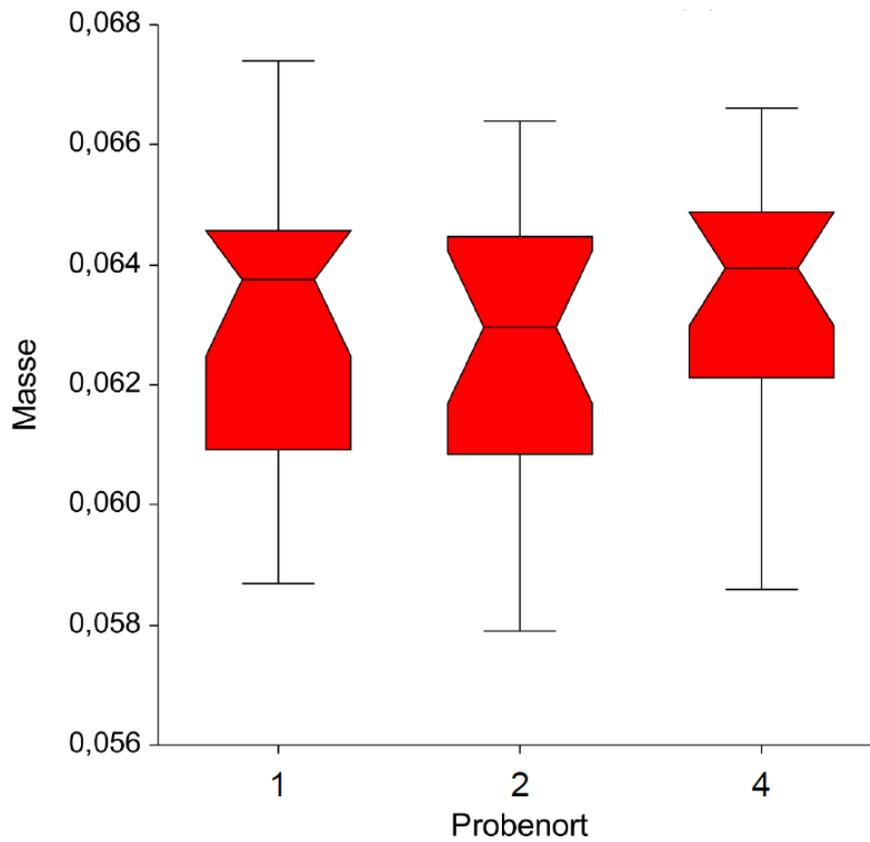


Abbildung 77: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 20

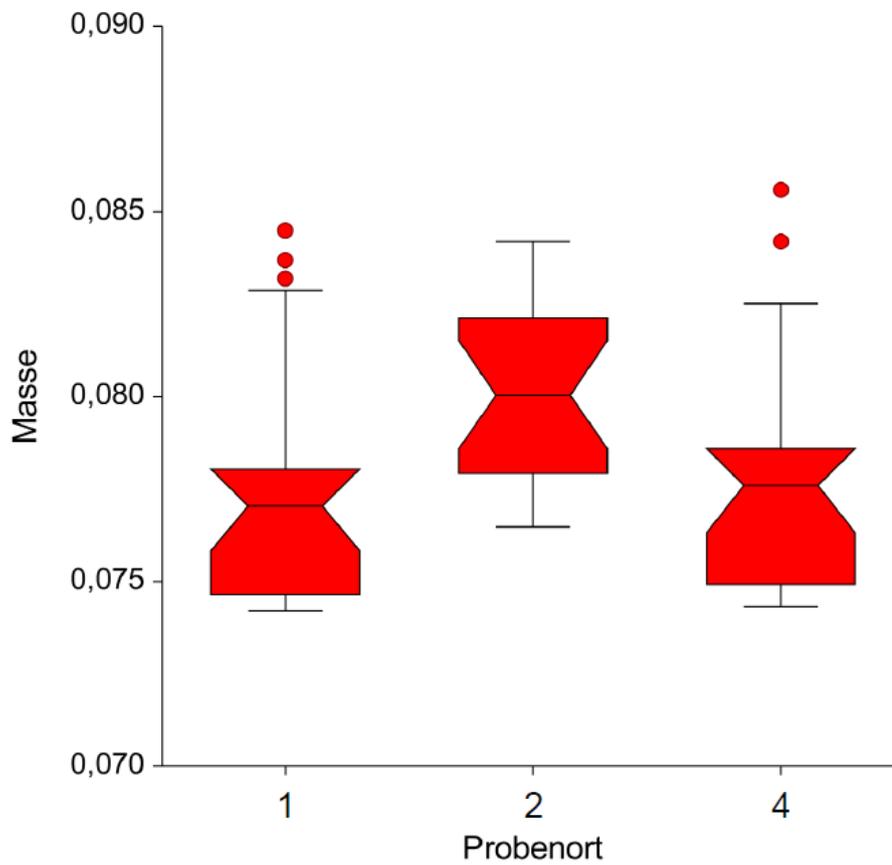


Abbildung 78: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 21

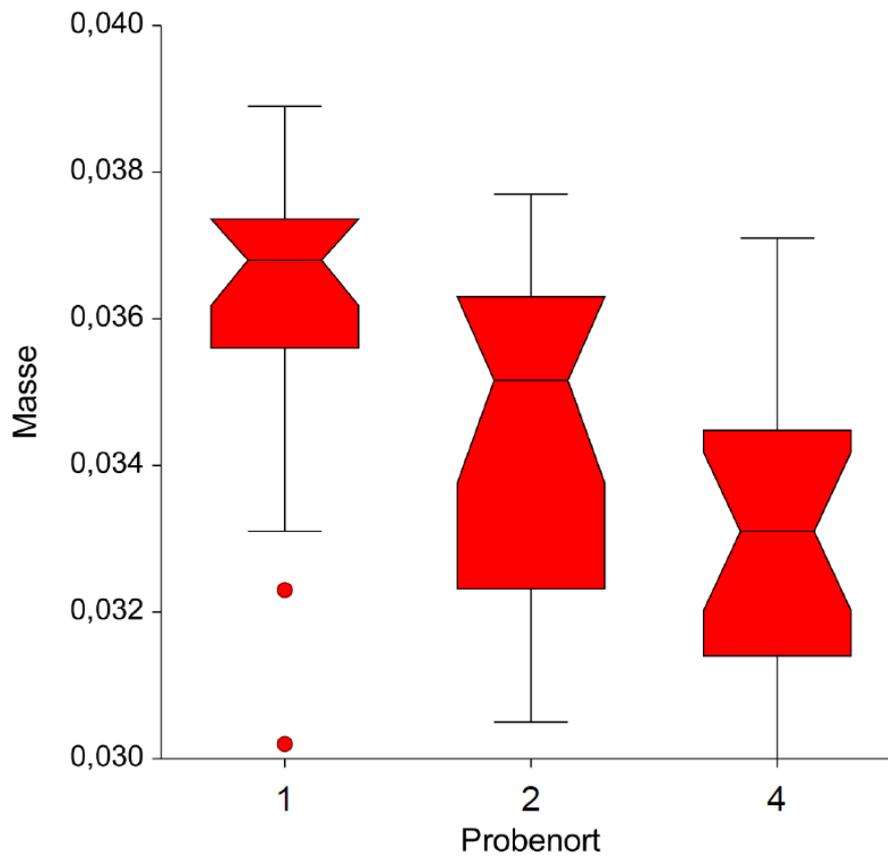


Abbildung 79: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 22

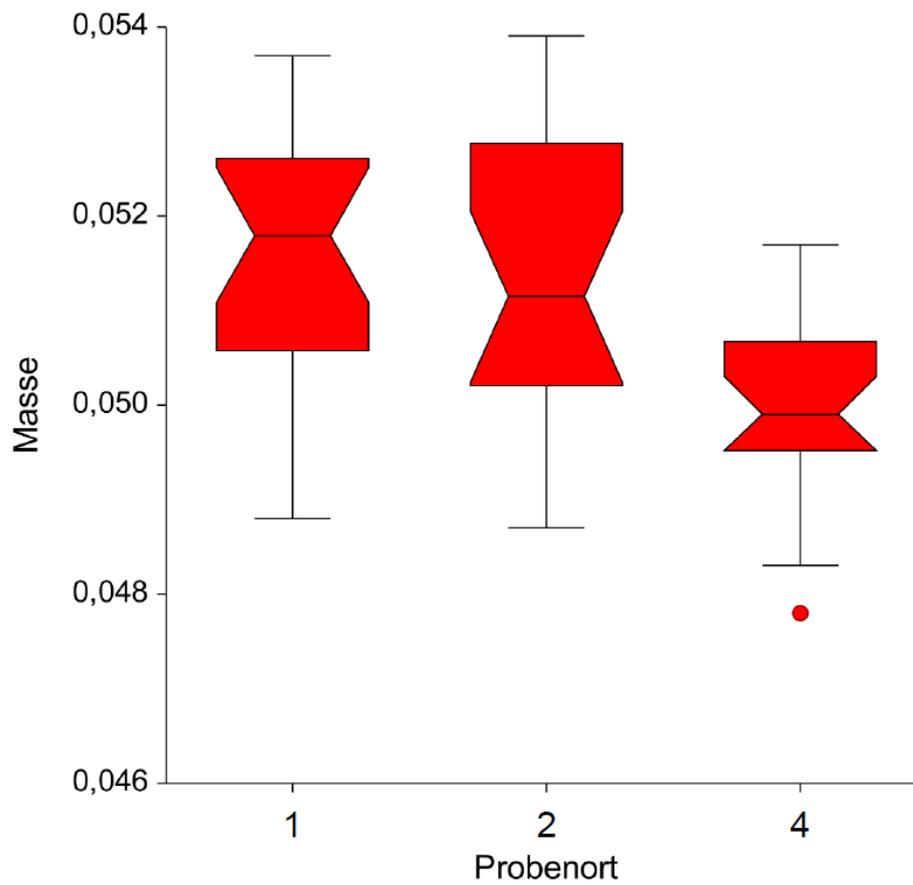


Abbildung 80: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 23

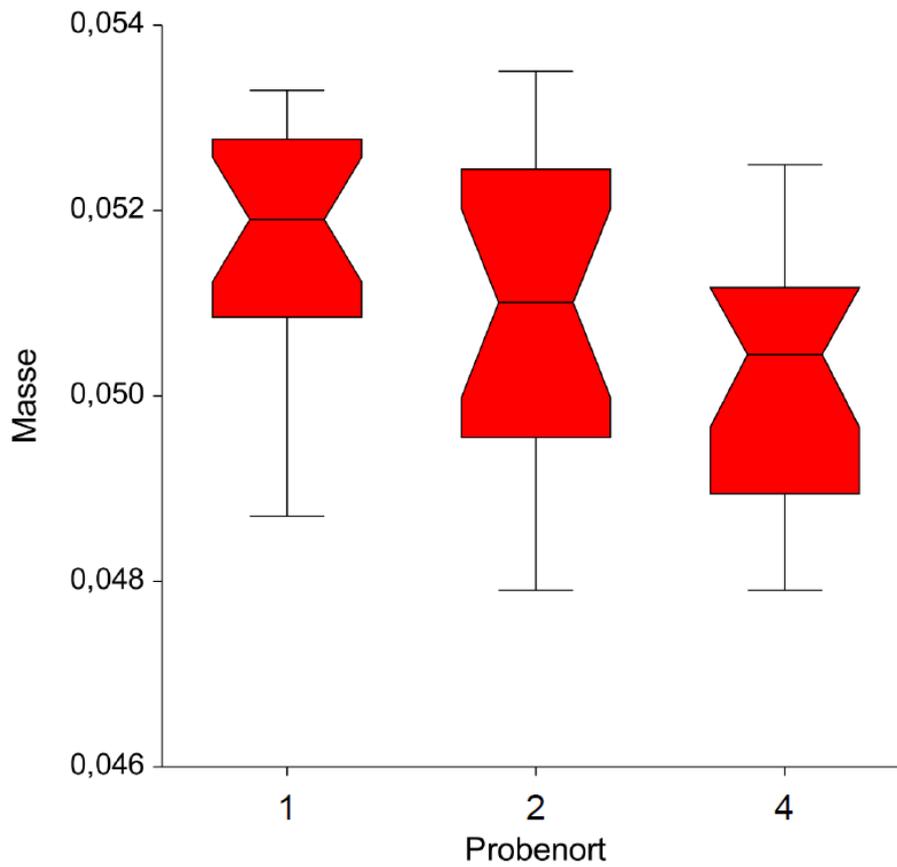


Abbildung 81: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 24

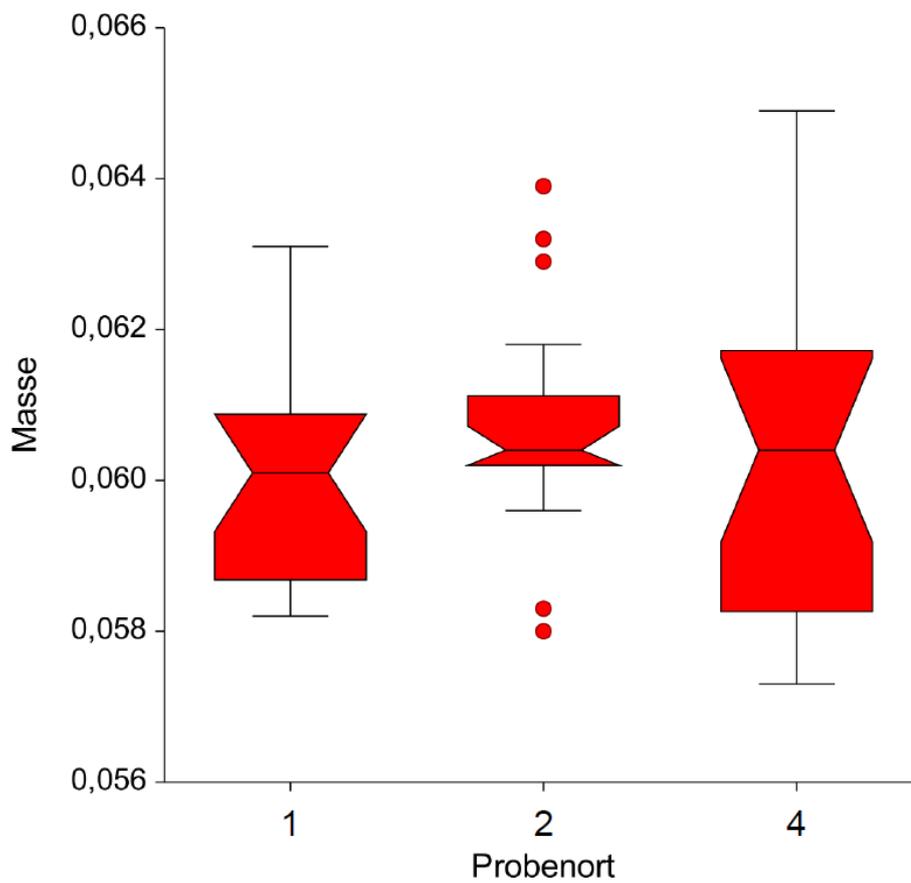


Abbildung 82: Verteilung der ermittelten Faserbündelgewichte Hamburg 25